

## **ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертационную работу Крат Юлии Георгиевны «Математическое моделирование донной неустойчивости в каналах с песчаным основанием», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### **1. Актуальность темы диссертации**

Исследование природных процессов и явлений с помощью математического моделирования служит одним из основных инструментов изучения сложной динамики, в том числе в геофизических потоках. В задачах, осложненных наличием границ, погранслоев и многофазных компонент, учитывающих эффекты турбулентности, этот подход дает наиболее адекватные результаты. Примером такой задачи может быть моделирование процессов возникновения донной неустойчивости в каналах с песчаным основанием. Ненадлежащий учет закономерностей донной неустойчивости при проектировании гидротехнических сооружений может привести к интенсивному размыву русел рек в нижних бьефах ГЭС, заилению городских водозаборов, нарушению в работе трубопроводов, проходящих по дну рек и другим нежелательным последствиям.

Диссертационная работа Крат Ю.Г. направлена на построение математических моделей, которые позволяют более глубоко исследовать процесс возникновения донной неустойчивости в условиях измененного гидрологического и руслового режима и строить надежные прогнозы.

Математическое моделирование процесса донной неустойчивости начало свое развитие в середине прошлого века, и на сегодняшний день предложено большое количество подходов, которые предложены различными учеными, среди которых следует отметить Гончарова В.Н., который связывал



возникновение донной неустойчивости с вихревым обтеканием донных частиц; Кеннеди Дж.Ф. связывал возникновение донной неустойчивости с возмущением свободной поверхности потока и наличием фазового сдвига между максимумами средней скорости потока и придонными напряжениями определяющими транспорт наносов; Энегелунд Ф. и Фредсо Дж. связывали возникновение донной неустойчивости с наличием фазового сдвига между донными волнами и периодическим расходом влекомых наносов; Михайлова Н.А., Гришанин К.В., Мельникова О.Н. показали, что возникновение донной неустойчивости связано с крупномасштабными пульсациями потока; Бэгнольд, Дебольский В.К., Шуляк Б.А., Coleman S.E. установили связь между длиной донной волны и параметрами донного материала и гидродинамического потока.

В представленной работе на основе аналитической модели транспорта влекомых наносов Петрова А.Г.-Потапова И.И. предложены математические модели для описания процесса возникновения донной неустойчивости, которые учитывают гидродинамические параметры потока, физико-механические и гранулометрические параметры донного материала, турбулентный характер гидродинамического потока, имеющего свободные границы и нелинейность гидравлического сопротивления русла. На основе предложенных математических моделей выполнены аналитические и численные исследования для нескольких русловых задач. Выполнен сравнительный анализ результатов аналитических и численных исследований с экспериментальными данными и решениями по другим моделям.

## 2. Новизна

Новизна полученных результатов заключается в следующем:

1) предложены одномерные и двумерная математические модели, описывающие изменение донной поверхности канала с песчаным основанием под действием водного потока; модели учитывают турбулентную вязкость потока, влияние транспорта влекомых и лавинных наносов, физико-



механических и гранулометрических параметров донного материала на движение грунта;

2) получены аналитические оценки и разработаны численные алгоритмы решения одномерных и двумерной русловых задач о развитии донной неустойчивости;

3) выполнены исследования для нескольких задач о развитии донной неустойчивости, в ходе которых получены аналитические и численные закономерности развития донной неустойчивости в каналах с песчаным основанием, учитывающие гидродинамические параметры потока, физико-механические и гранулометрические характеристики грунта. Выполнен сравнительный анализ полученных аналитических и численных решений с экспериментальными и теоретическими закономерностями других авторов.

Все основные результаты диссертации являются новыми.

### **3. Достоверность полученных результатов и выводов**

Достоверность предложенных математических моделей и разработанных алгоритмов решения задач о возникновении донной неустойчивости обеспечивается использованием современной теории математического моделирования гидродинамических и русловых процессов, использованием методов, созданных на основе современной теории дифференциальных уравнений. Согласование полученных аналитических и численных решений с известными экспериментальными данными и решениями, полученными другими авторами, подтверждает достоверность предложенных моделей и их способность описывать процесс возникновения донной неустойчивости в каналах с песчаным основанием.

Основные результаты апробированы на региональных, всероссийских и международных научно-практических конференциях, а также при реализации комплексной программы фундаментальных исследований ДВО



РАН «Дальний Восток», ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и грантов РФФИ в период 2010-2015 гг.

#### **4. Значимость полученных результатов**

Полученные в диссертации результаты развивают теорию математического моделирования процессов возникновения донной неустойчивости в каналах с песчаным основанием. Основным результатом работы Крат Ю.Г. является разработка и верификация новых математических моделей, которые позволяют аналитически и численно решить одномерные и двумерную профильную русловые задачи и предсказать изменение донной поверхности канала в краткосрочной и среднесрочной перспективе.

Практическую значимость имеет возможность применения разработанных моделей в различных условиях местности без модификации модели расхода влекомых наносов, так как она не содержит феноменологических параметров и полуаналитических зависимостей. Нужно однако, отметить, что модель имеет достаточно узкую область применимости, к более менее однородным каналам.

#### **5. Общая характеристика работы**

Диссертационная работа изложена на 116 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, включающего 100 отечественных и зарубежных источников.

Во введении автором обоснована актуальность темы диссертации, изложена цель исследования, сформулированы задачи исследования, показана научная новизна работы и ее практическая значимость.

В первой главе сформулирована общая трехмерная математическая модель, описывающая процесс возникновения донной неустойчивости в каналах с песчаным основанием. В обзорной части главы приводятся и анализируются используемые в настоящее время модели транспорта донных наносов и модели турбулентности, осуществляется выбор модели



турбулентности и модели транспорта влекомых наносов для замыкания обобщенной трехмерной математической модели. Трехмерная математическая модель расширяется моделью лавинного обрушения донного материала.

**Во второй главе** сформулирована одномерная математическая модель, позволяющая численно исследовать процесс развития донных волн с учетом свободной поверхности потока и стохастического возмущения транзитного расхода влекомых наносов. На основе метода конечных разностей разработан алгоритм решения одномерной русловой задачи. Выполнены численные исследования влияния гидродинамических и стохастических свойств русловой системы, физико-механических и гранулометрических параметров донного материала на процесс образования и развития донных волн. Получены численные закономерности, позволяющие определить рост и развитие длин донных волн во времени, и выполнено их сравнение с экспериментальными данными и результатами, полученными другими авторами. Показано, что стохастическое возмущение твердого стока приводит к возникновению и развитию донных волн. Сравнительный анализ подтверждает качественное согласование полученных численных закономерностей с экспериментальными данными других авторов.

**В третьей главе** сформулирована одномерная математическая модель, которая позволяет провести анализ устойчивости донной поверхности напорного канала прямоугольной формы относительно одномерных по пространству возмущений. Для линеаризованной постановки сформулированной задачи получена аналитическая зависимость, позволяющая определить длину донной волны в зависимости от гидродинамических параметров потока, физико-механических и гранулометрических характеристик донного материала. Выполнен сравнительный анализ полученного аналитического решения с экспериментальными и данными других авторов, который показал их хорошее качественное согласование. Показано, что полученное решение



обобщает ряд известных эмпирических формул: Коулмана, Шуляка и Бэгнольда.

В четвертой главе сформулирована двумерная профильная математическая модель, позволяющая исследовать механизмы возникновения донной неустойчивости в напорном канале. На основе метода контрольных объемов предложен алгоритм решения сформулированной русловой задачи. Выполнено численное исследование механизмов, оказывающих влияние на возникновение донной неустойчивости в напорном канале с песчаным основанием в зависимости от параметра перекошенности донной волны. Показано, что процесс возникновения донной неустойчивости определяется балансом между диссипативным механизмом, связанным с уклоном дна и механизмом генерации донных волн, связанным с придонным градиентом напора. Сравнительный анализ полученных результатов с численными решениями других авторов показал их качественное согласование. Отмечено, что полученные результаты позволяют более полно выполнять анализ причин изменения донной поверхности напорного канала с песчаным основанием.

## 6. Замечания по диссертации

1. В тексте имеются опечатки. Они выделены в электронном варианте желтым цветом.
2. Автор довольно странным образом представил модель стохастических пульсаций расхода. Неясно идет ли речь по гауссовом распределении, либо же  $x^*$  случайная величина, через которую по соответствующим формулам вычисляется  $\delta^*$ ?

## Заключение

Диссертация Крат Ю.Г. представляет собой законченную научно-исследовательскую квалификационную работу, в которой предложены новые математических модели, описывающие процесс возникновения донной

неустойчивости в каналах с песчаным основанием. Реализованы эффективные численные методы и алгоритмы в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента. Теоретическая значимость диссертационной работы определяется полученными аналитическими решениями, обобщающими ряд известных феноменологических зависимостей.

Работа автора отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, автор Крат Юлия Георгиевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв составил

Заведующий Лабораторией геофизической гидродинамики

Д.ф.-м.н. Кошель К.В.

Отзыв заслушан и утвержден в качестве официального отзыва ведущей организации на семинаре

Дата 29.12.2016

Руководитель семинара

Директор ТОИ ДВО РАН

К.Г.Н.



В.Б. Лобанов.