

На правах рукописи



**Гармакова Маргарита Егоровна**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

2.1.6 - Гидротехническое строительство, гидравлика и  
инженерная гидрология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)».

**Научный руководитель:** **Дегтярев Владимир Владимирович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Коротаяева Татьяна Александровна**  
доктор физико-математических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения  
Российской академии наук, лаборатория «Физических  
проблем управления газодинамическими течениями»,  
старший научный сотрудник

**Грицук Илья Игоревич**  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт водных проблем Российской академии  
наук, лаборатория «Динамики русловых потоков и  
ледотермики», старший научный сотрудник

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «20» июня 2023 г. в 15:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ауд. зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте [www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Бестужева А. С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность исследования.**

Подводные переходы трубопроводов относятся к сложным инженерным объектам с повышенным уровнем ответственности, занимающие особое место в транспортной системе нашей страны. На территории Российской Федерации трассы магистральных трубопроводов пересекают более 1000 водных преград. На сегодняшний день компанией ПАО «Газпром» реализованы такие масштабные проекты как: «Турецкий поток» - экспортный газопровод из России в Турцию через Черное море, протяженность морского участка составляет более 900 км; «Сила Сибири» - магистральный газопровод, по которому транспортируется газ из Иркутского и Якутского центров газодобычи российским потребителям на Дальнем Востоке и на экспорт в Китай, трасса данного газопровода включает в себя строительство подводных переходов через реки Лена, Алдан и Амур.

На подводные переходы трубопроводов, уложенных по дну водной преграды, оказывается силовое воздействие со стороны набегающего потока, а также волн и льда. Но в тоже время трубопроводы сами вносят изменения в скоростную структуру потока, а это в свою очередь влияет на русловые переформирования. Риск размыва донного грунта, слагающего ложе речного русла, в местах расположения подводного перехода может возникнуть по причине транспорта влекомых наносов, а также из-за обтекания потоком препятствия, в данном случае, трубопровода. Чем больше величина размыва под подводным переходом, тем больше будет провисать трубопровод, что приведет к образованию свободных колебаний и развитию резонансных режимов. Практика показывает, что недостаточно обоснованные результаты гидродинамических исследований приводят к ошибочным рекомендациям и нередко служат причиной возникновения аварий с серьезными экономическими и экологическими последствиями.

Стремление предупредить негативные последствия, в результате повреждения подводных трубопроводов требует выполнения не только теоретических и экспериментальных исследований, но и проведение численного моделирования.

**Степень разработанности темы.** Вопросами, связанными с переформированием речного дна в зоне расположения подводных магистральных трубопроводов посвящены работы Алтунина С.Т., Берковича К.М., Букреева В.И., Великанова М.А., Гончарова В.Н., Гришанина К.В., Кукушкина Б.М., Леви И.И., Медведведева С.С., Пережогина Ю.Д., Румянцева И.С., Хачатряна А.Г., Шапиро Х.Ш., Шлычкова В.А., Штеренлихта Д.В., Мао Y., Sumer В.М. и других авторов. Следует отметить, что до настоящего время малоизученным является влияние на процесс переформирования дна расположение нескольких ниток подводных трубопроводов и учет их взаимного влияния.

На основе выполненного обзора литературы можно выделить следующие методы исследования, позволяющие прогнозировать возникновение и развитие воронок размыва: гидроморфологический подход, экспериментальные исследования в лабораторных условиях с целью выявления механизма деформаций грунта и его переноса и численные методы моделирования.

Согласно нормативным документам прогнозирование плановых деформаций русла выполняется на основе русловых съемок, путем совмещения поперечных сечений. Данный метод дает приближенные величины размыва русла, что является недостаточным для обеспечения безаварийной эксплуатации данных сооружений. Помимо гидроморфологического

подхода, используются методы, основанные на решении следующих уравнений: движения жидкости, транспорта наносов, деформаций русла. Перечисленные методы, отражающие естественные процессы переформирования русла, успешно применяются на этапах выбора створа прокладки подводных коммуникаций, но не отражают развитие деформаций русла непосредственно в окрестности подводных переходов, которые вносят изменения в процессы выноса и отложения донных наносов. В связи с этим необходимо выяснить влияние трубопровода на скоростную структуру потока. Исследования обтекания потоком жидкости препятствий в виде модельного цилиндра, отражены в работах V. Strouhal, Th. Karman, A.A. Таунсенда, Л. Прандтля, D. J. Tritton, Ван Дайка. Однако, следует заметить, что полученные результаты относятся к кинематическим характеристикам потока, а не к деформациям русла. Таким образом, можно констатировать, что надежные и универсальные методы расчета локальных деформаций речного дна с учетом влияния наличия препятствия на дне, в настоящее время отсутствуют. Процессы переноса полидисперсных взвесей могут быть описаны с помощью проведения физического и численного моделирования. Математическое моделирование процесса размыва под трубопроводами позволяет существенно дополнить физические эксперименты и получить более детальную информацию о течении данного процесса.

**Цель исследований** заключается в разработке методики численного моделирования процесса переформирования дна в зоне расположения подводного трубопровода с учетом гранулярности, моделей турбулентности и многофазности.

Для достижения поставленной цели сформулированы **основные задачи** диссертации:

- провести экспериментальные исследования переформирования дна в зоне расположения одного и более цилиндров, имитирующих подводный переход, при различных схемах их расположения относительно дна и выполнить оценку их взаимного влияния на процесс переформирования дна;
- разработать и реализовать вычислительную методику, основанную на полных моделях гетерогенных сред с применением моделей многофазности, гранулярности и турбулентности в программном комплексе ANSYS Fluent;
- выполнить верификацию численных моделей при решении задач, имеющих подтверждение экспериментальными данными;
- выполнить численное моделирование переформирования дна для двух случаев: один цилиндр и два цилиндра и оценить, как это влияет на процесс переформирования.

**Научная новизна.** На основании выполненных исследований научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые проведен физический эксперимент при расположении двух цилиндров, имитирующих нитки подводных трубопроводов. Выявлено, что при наличии двух цилиндров процесс переформирования дна происходит быстрее.
2. С использованием комплекса ANSYS Fluent разработан набор пользовательских функций, позволяющих учитывать гранулярность, многофазность, трехмерность и нестационарность процесса с учетом их турбулентного характера в сложной геометрической области, при решении задач по прогнозированию русловых переформирований в зоне расположения подводных переходов.

**Практическая и теоретическая значимость работы.** Разработанная автором численная методика может быть использована в проектной и эксплуатационной деятельности для прогнозирования и развития воронок размыва на участках расположения подводных переходов.

Результаты исследования имеют особое значение для описания процессов взаимодействия водного потока и донного грунта в зоне расположения подводных трубопроводов.

**Методология и методы исследования.** Основным подходом, используемым в работе, является численное моделирование переформирования дна в зоне расположения цилиндров, имитирующих подводные трубопроводы в программном комплексе ANSYS Fluent. Для моделирования турбулентного потока используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, которые замыкаются с помощью двухпараметрических моделей турбулентности  $k-\omega$  SST и  $k-\varepsilon$  Realizable. Для описания многофазности использован подход взаимопроникающих континуумов, в котором концентрации всех участвующих в процессе фаз предполагаются непрерывными функциями пространства и времени. С этой целью реализованы модель объема жидкости (Volume of Fluid) и эйлерова (Eulerian) модель многофазности.

**Положения и результаты, выносимые на защиту:**

- результаты экспериментальных исследований по обтеканию турбулентным потоком цилиндра, имитирующего подводный трубопровод, при двух схемах расположения относительно песчаного дна: при заглублении цилиндра на половину его диаметра, при расположении цилиндра на дне, которые показали особенности переформирования дна с образованием донных гряд и их перемещением во времени, а также увеличение интенсивности процесса размыва в случае незаглубленного цилиндра;

- результаты сравнения экспериментальных исследований по обтеканию турбулентным потоком одиночного незаглубленного цилиндра и двух параллельно расположенных на расстоянии 2D незаглубленных цилиндров, которые показали, что процесс переформирования дна в случае двух цилиндров происходит более интенсивно.

- результаты численного моделирования, выполненное в RANS постановке, с использованием  $k-\omega$  SST модели турбулентности и модели многофазности Volume of Fluid, показали адекватность использования методики моделирования при анализе скоростной структуры при обтекании турбулентным потоком цилиндра, при возвышении его над недеформированным дном.

- результаты численного моделирования переформирования песчаного дна в зоне расположения одиночного цилиндра и двух цилиндров на поверхности дна, выполненное в RANS постановке, с использованием  $k-\varepsilon$  Realizable модели турбулентности и эйлеровой модели многофазности (Eulerian), с учетом гранулярности частиц показали адекватность использования методики моделирования при сравнении результатов с экспериментальными данными.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность результатов диссертационного исследования основаны на применении математически обоснованных численных методов; сопоставлении результатов численного моделирования с результатами экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Результаты исследования были представлены в научных докладах и выступлениях на научно-практических конференциях и семинарах:

- Международная конференция «Экологически безопасные технологии природообустройства и водопользования: теория и практика» (Новосибирск, 2017);

- XV Всероссийский семинар «Динамика Многофазных Сред» с участием иностранных ученых, ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, 2017);

- XVI Всероссийский семинар «Динамика Многофазных Сред» с участием иностранных ученых. ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск, 2019);

- XIII Международная научно-техническая конференция, посвященная 90-летию НГАСУ

(Сибстрин) «Актуальные вопросы архитектуры и строительства», (Новосибирск, 2020);

- III Международная научно-практическая конференция «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений», (Санкт-Петербург, 2020);

- IV Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства», (Москва, 2021);

- XVII Всероссийский семинар с международным участием «Динамика Многофазных Сред» (ДМС-2021), (Новосибирск, 2021);

- XV Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы архитектуры и строительства», (Новосибирск, 2022);

- V Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства», (Москва, 2022).

**Публикации.** Материалы диссертации достаточно полно изложены в 13 научных публикациях, из которых 3 статьи опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий), 10 работ опубликовано в журналах, индексируемых в базе Scopus Web of Science и других.

**Личный вклад автора** заключается в сборе и анализе материалов исследований; проведении экспериментальных исследований при различной схеме расположения цилиндров, имитирующих трубопровод; выполнении численных экспериментов в программном комплексе ANSYS, с использованием современных физико-математических моделей; анализе и обобщении полученных результатов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 109 наименований, одного приложения. Объем диссертации без учёта приложения составляет 121 страницу машинописного текста, общий объём, включая приложение 140 страниц, в том числе 77 рисунков и 19 таблиц.

Автор выражает благодарность доктору физико-математических наук, профессору Н. Н. Федоровой за сделанные советы, замечания и активное участие в обсуждении работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, дана оценка степени её разработанности, определены цели и задачи исследований, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, изложены методы исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности и апробации результатов.

**В первой главе** проанализированы причины, приводящих к аварийным ситуациям на подводных переходах трубопроводов через реки. При изучении отчетов, подготовленных по результатам обследования двух ниток подводных переходов через р. Обь в г. Новосибирске, на отдельных участках подводного перехода обнаружены развивавшиеся воронки местного размыва грунта с оголением труб, угрозой подмыва и образования провисания. Также отмечено, что фактическое плановое положение осей трубопроводов имеет отступление от проекта. Расстояние между осями трубопроводов в русловой и береговых частях переменное и колеблется от нуля до 10 м. Нитки переходов пересекаются и на некотором участке лежат одна на другой (рисунок 1), что является грубым нарушением требований СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы».

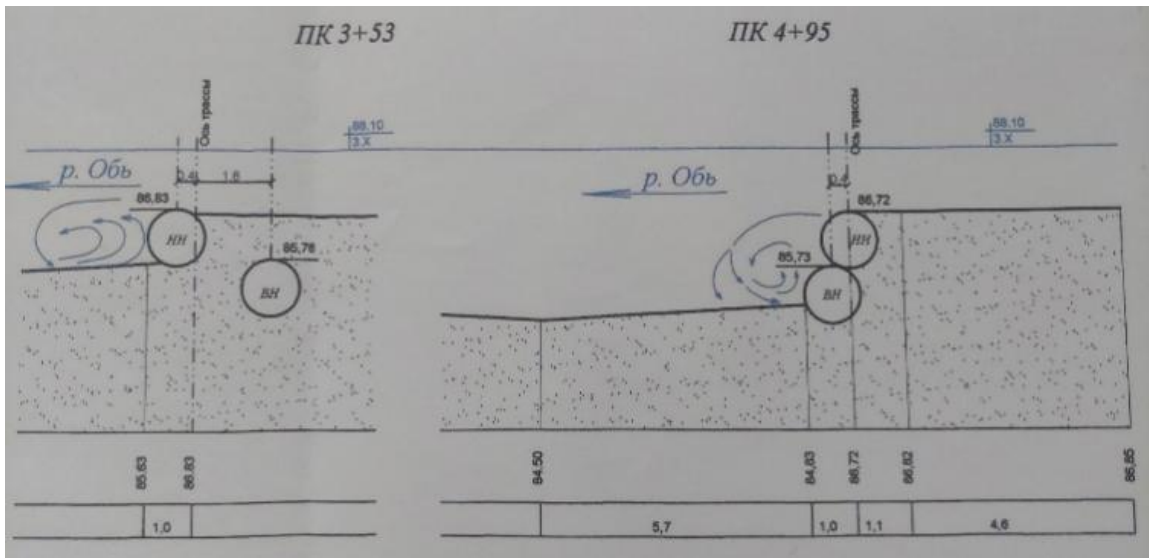


Рисунок 1 – Нитки трубопроводов, лежащие одна на другой ПК 4+95

Наиболее распространенной причиной, которая приводит к нарушению безаварийной эксплуатации подводных переходов трубопроводов, является деформация русла реки на участке подводного перехода. Донные отложения в местах залегания трубопровода подвержены переформированию с образованием воронок размыва. Интенсивность деформаций русла во времени зависит не только от свойств грунтов, слагающих ложе реки, но и от скоростей течения. С изменением сезонных расходов меняются гидравлические характеристики потока (глубина, продольный уклон, скорость течения), что приводит к соответствующей перестройке форм рельефа дна, образованию воронок размыва в зоне расположения подводных переходов трубопроводов. Выявление потенциальной опасности возникновения размывов и их развития во времени имеет большое значение на стадиях проектирования и эксплуатации подводных трубопроводов. Поэтому целью настоящей диссертации является разработка методики численного моделирования процесса переформирования дна в зоне расположения подводного трубопровода для определения причин и факторов, которые оказывают влияние на образование ямы размыва, а также гидравлических характеристик потока в зоне взаимодействия с трубопроводным переходом при различных схемах его расположения.

**Во второй главе** анализируются существующие методы прогнозирования переформирования русла, приводится обзор литературы и экспериментов, затрагивающих вопросы деформаций в зоне расположения подводных трубопроводов. Выполнен анализ исследований, которые были проведены А.В. Чеботниковым, 2012 г. на базе Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Для изучения и фиксации поля скоростей использовался PIV-метод (Particle Image Velocimetry). Схема PIV-метода приведена на рисунке 2. Фотоснимок экспериментальной установки и PIV-аппаратуры приведен на рисунке 3.

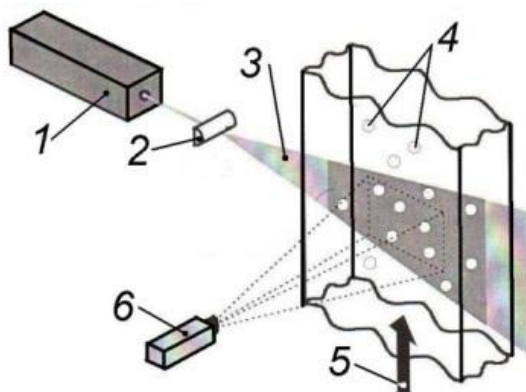


Рисунок 2 - Схема PIV-метода:

- 1 – импульсный лазер; 2 – оптическая система, формирующая световой нож;  
3 – световой нож; 4 – частицы-трассеры;  
5 – исследуемый поток; 6 – цифровая видеокамера

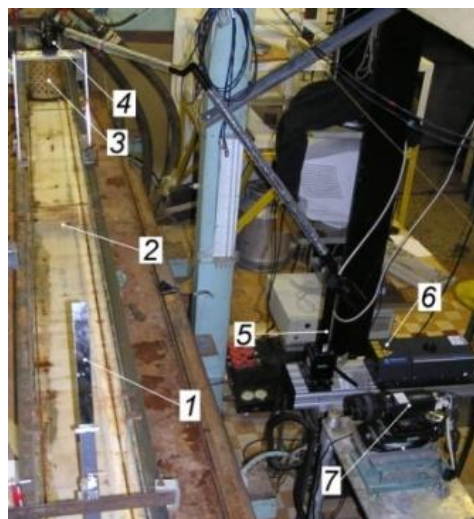


Рисунок 3 - Фотоснимок экспериментальной установки: 1 – зеркало для тени под цилиндром; 2 – рабочий канал; 3 – успокоитель потока; 4 – оптическая система, формирующая световой нож; 5 – гибкая зеркальная система; 6 – лазер; 7 – цифровая видеокамера

Экспериментальное изучение местного размыва было выполнено Ю.Д. Пережогиним, Г.В. Васильченко, Б.М. Кукушкиным, И.С. Румянцевым, Sumer В.М, Мао У, которые выявили, что, размыв дна в зоне незаглубленного трубопровода происходит при скоростях течения существенно меньших неразмывающей скорости. Подмыв дна под трубопроводом вызван фильтрацией воды в результате перепада давлений на верховой и низовой сторонах трубопровода. Фильтрация воды под трубопроводом вызывает взвешивание частиц грунта при некотором критическом значении градиента давления и последующее их вымывание.

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям переформирования песчаного дна в зоне расположения одиночного цилиндра, имитирующего подводный трубопровод, и при расположении двух цилиндров, расположенных параллельно друг другу.

Экспериментальные исследования автора были проведены в лаборатории кафедры гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин). Основная задача экспериментов заключалась в оценке особенностей деформаций дна вблизи цилиндра при различных схемах его расположения относительно дна.

Установка представляет собой лоток прямоугольной формы поперечного сечения шириной 0,1 м, длиной 1,3 м и высотой 0,19 м. Модель экспериментальной установки показана на рисунке 4. Глубина воды устанавливалась равной 0,11 м. На дно лотка равномерно укладывается песок. Диаметр частиц ( $d=0,05$  мм) подбирался так, чтобы исключить возникновения выноса частиц в случае отсутствия цилиндра. Скорость потока составляла 0,14 м/с. На песчаном дне находился цилиндр (диаметр 0,025 м), жестко закрепленный на боковых стенках лотка.



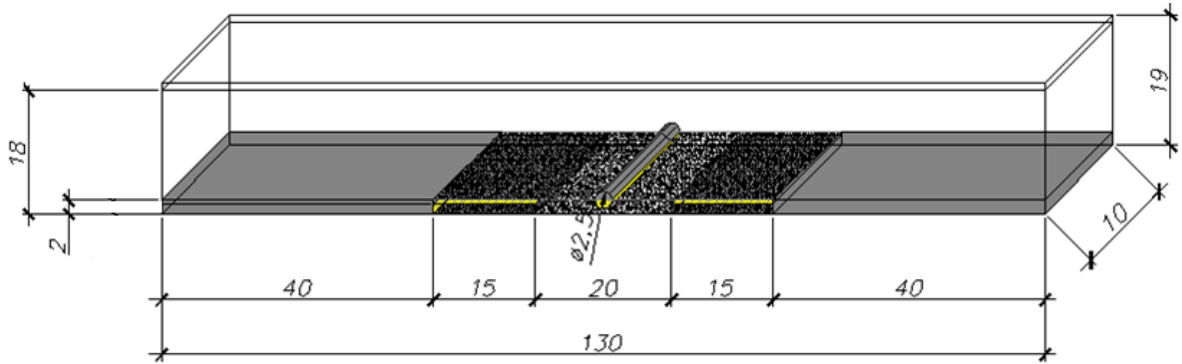


Рисунок 4 – Модель экспериментального лотка

Рассматривались три схемы расположения цилиндра. В первой – глубина погружения цилиндра составляла величину радиуса. Во второй – цилиндр располагался на поверхности песка и в третьей – на поверхность песка укладывались два цилиндра, с расстоянием между осями, равном  $2D$  ( $D = 0,025$  м) (рисунок 5).

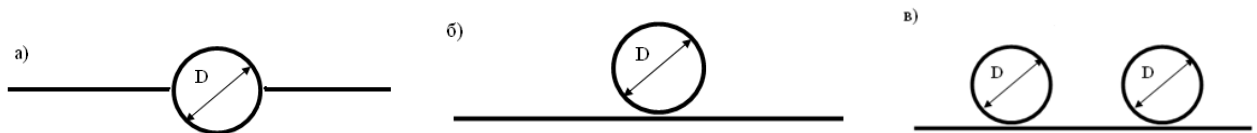


Рисунок 5 – Схемы проведенных экспериментов: а) заглублиение цилиндра на  $1/2D$ ; б) цилиндр на поверхности дна; в) на поверхности лежит два цилиндра.

В случае когда, цилиндр заглублиен в песок на  $1/2D$ , уже через 15 минут от начала эксперимента наблюдается появление ленточных гряд перед цилиндром (рисунок 6а).

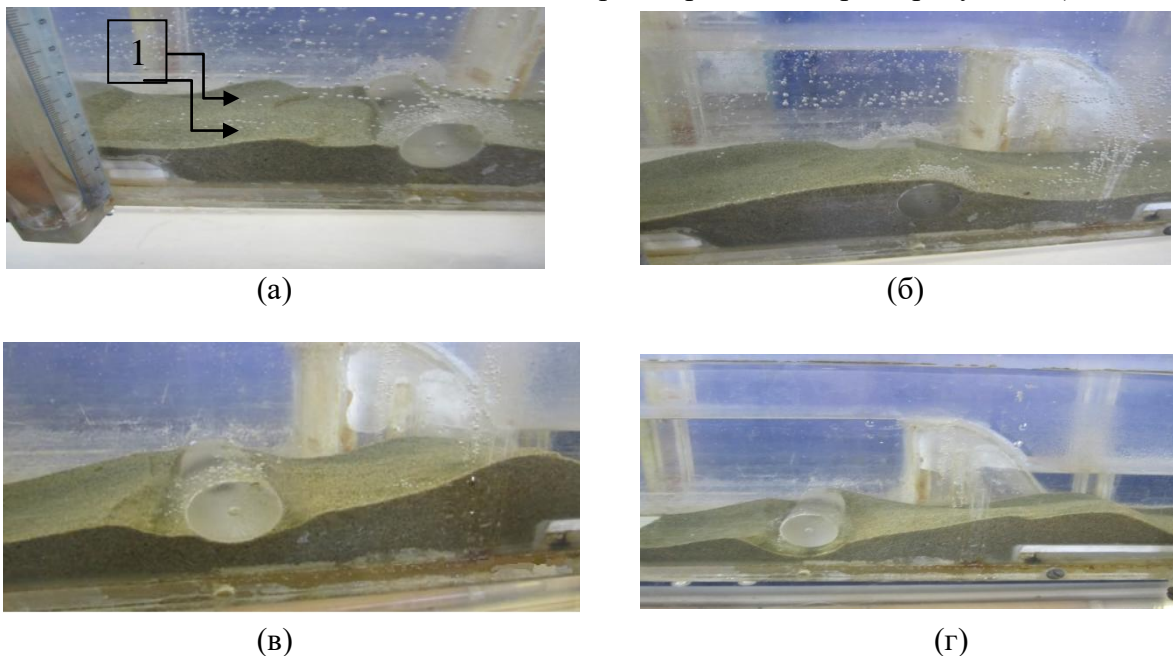


Рисунок 6 - Фрагменты эксперимента, выполненного по первой схеме: а)  $t = 30$  минут, б)  $t = 240$  минут, в)  $t = 600$  минут, г)  $t = 780$  минут; 1 – донная гряда

Размыв дна начал происходить через 30 минут с начала проведения опыта. А намыв песка на цилиндр – через 60 минут. На рисунке 6 показаны фотографии процесса для моментов времени  $t = 30$  минут (а),  $t = 240$  минут (б),  $t = 600$  минут (в),  $t = 780$  минут (г).

Переформирование дна начинается с образования донной гряды (1), которая перемещается в сторону цилиндра (рисунок 6а). На (рисунок 6б) донная гряда подошла в плотную к цилиндру и можно наблюдать, как происходит намыв песка на верхнюю грань цилиндра, которая ранее не была погружена в песок. После того как гребень гряды миновал цилиндр, происходит интенсивный размыв под цилиндром с напорной стороны (рисунок 6в). В дальнейшем песок полностью вымывается из-под цилиндра, с образованием ямы-размыва под цилиндром (рисунок 6г).

Эксперимент по второй схеме был проведен с цилиндром лежащим на поверхности песка. На рисунке 7 показан процесс размыва песка в области цилиндра, лежащего на поверхности размываемого дна.

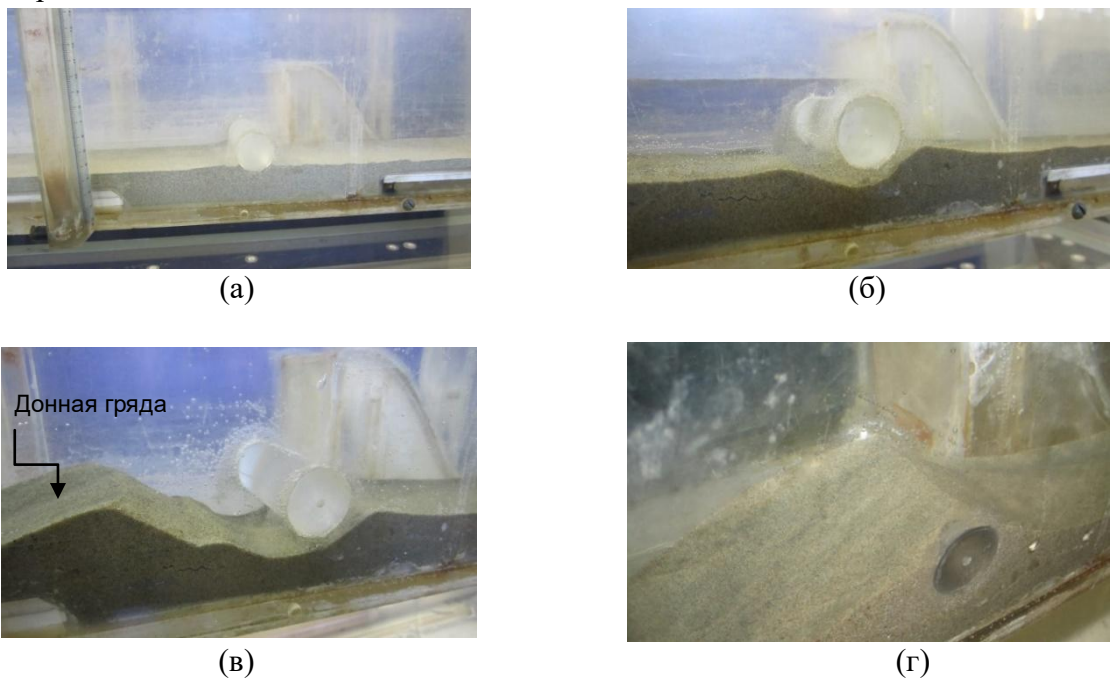


Рисунок 7 - Фрагменты эксперимента, выполненного по второй схеме: а)  $t = 0$  минут; б)  $t = 30$  минут; в)  $t = 50$  минут; г)  $t = 180$  минут

Через 30 минут с начала проведения эксперимента, наблюдался процесс вымывания песка под цилиндром (рисунок 7б). В течение незначительного промежутка времени формирующаяся вверх по течению гряда надвигается на цилиндр (рисунок 7в). Полость под цилиндром исчезает, а гряда накрывает цилиндр песком полностью (рисунок 7г). Далее гряда продолжает перемещаться вдоль лотка и цилиндр вновь обнажается.

На рисунке 8 представлены этапы размыва при расположении двух цилиндров на поверхности песка.

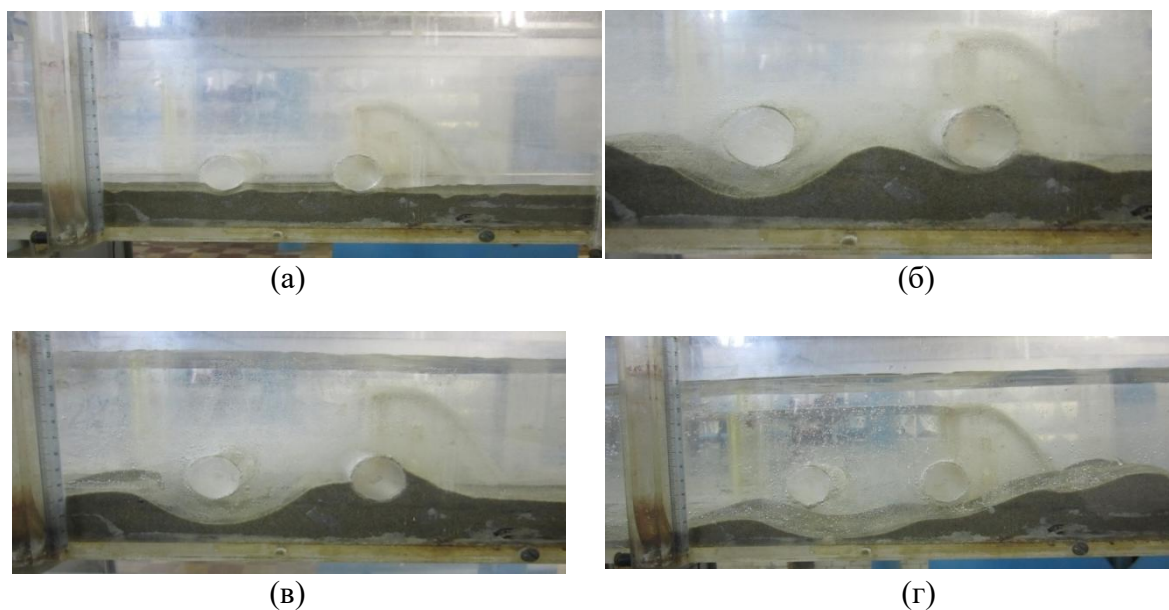


Рисунок 8 - Фрагменты эксперимента, выполненного по третьей схеме: а)  $t = 5$  минут; б)  $t = 10$  минут; в)  $t = 15$  минут; г)  $t = 35$  минут

Уже через 5 минут после начала эксперимента наблюдается подмыв с напорной стороны цилиндра (рисунок 8а). На рисунке 8б видно, что нижняя часть первого цилиндра обнажена, а между первым и вторым цилиндрами образовалась гряда. Далее гряда сместилась ко второму цилиндру (рисунок 8в), он заносится с двух сторон. Второй цилиндр обнажился (через 25 минут), с тыловой стороны образовалась гряда (рисунок 8г).

Проведенные эксперименты позволили сделать вывод, что эрозионно-аккумулятивный процесс имеет трехмерный характер. В результате экспериментов было выявлено, что интенсивность переформирования подвижного дна зависит от заглубления цилиндра и от их количества. Также было установлено, что при заглублении цилиндра в грунт на величину, составляющую половину диаметра, процесс подмыва значительно замедлен во времени по сравнению со второй частью эксперимента, которая длилась существенно меньше.

**В четвертой главе** приводятся математические модели гидромеханики, описываются различные современные методы численного моделирования: моделирование турбулентности с применением усредненных уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу, метод моделирования крупных вихрей, прямое численное моделирование. Оцениваются преимущества и недостатки каждого из методов. Выполнен краткий обзор подходов для описания многофазных течений. Приведены результаты применения методики численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent.

Рассмотрена 2D задача по исследованию полей скоростей и напряжений в окрестности цилиндра, имитирующего подводный трубопровод. Были выполнены две серии экспериментов. В первой - цилиндр отсутствовал, а во второй - между дном канала и цилиндром имелся зазор, равный диаметру цилиндра ( $D = 0,028$  м). На рисунке 9 показана геометрическая модель и границы расчетной области для второй серии экспериментов. Ось Y проходит через центр цилиндра.

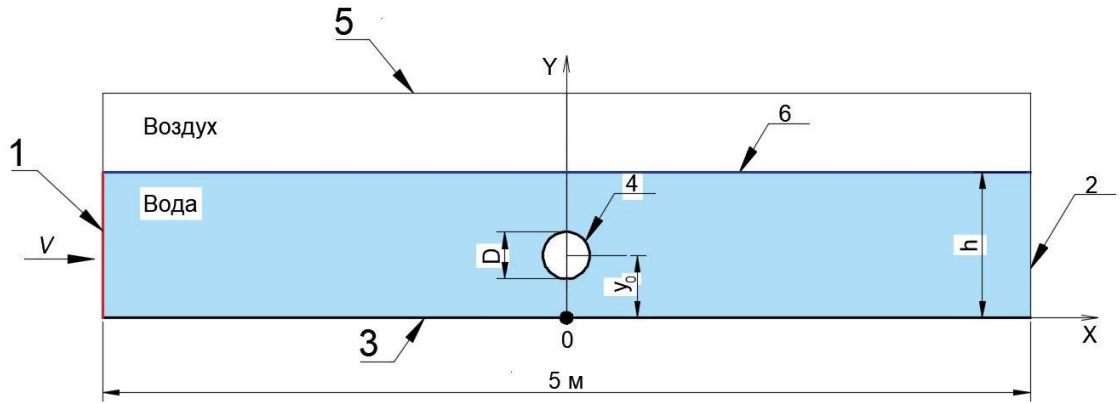


Рисунок 9 – Схема геометрической модели: 1 – входное отверстие (inlet); 2 – выходное отверстие (outlet); 3 – дно лотка (bottom\_wall); 4 – стенки цилиндра (cylinder\_wall); 5 – атмосфера; 6 – граница раздела двух фаз (вода-воздух);  $D = 0,028$  м;  $h = 0,12$  м – глубина;  $y_0 = 1,5D$

Моделирование проведено в условиях экспериментальных данных А.В. Чеботникова, 2012. Задача решалась в RANS постановке. Для моделирования турбулентного потока была выбрана  $k-\omega$  SST модель турбулентности со стандартной пристеночной функцией. Кинетическая энергия турбулентности ( $k$ ) и ее удельная скорость диссипации ( $\omega$ ) получаются из следующих уравнений переноса

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega, \quad (2)$$

где  $G_k$  – генерация кинетической энергии турбулентности из-за средних градиентов скорости;  $G_\omega$  – генерацию удельной скорости диссипации  $\omega$ ;  $\Gamma_k$ ,  $\Gamma_\omega$  – эффективная диффузия  $k$  и  $\omega$  соответственно;  $Y_k$ ,  $Y_\omega$  – рассеяние  $k$  и  $\omega$  из-за турбулентности;  $D_\omega$  – кросс-диффузионный член;  $S_k$ ,  $S_\omega$  – члены, определяемые пользователем.

Для описания многофазных течений (вода – воздух) использовалась модель многофазности Volume of Fluid (VOF). Моделирование границы раздела между фазами происходит путем решения уравнения неразрывности для объемной доли одной или нескольких фаз. Для фазы  $q$  уравнение будет иметь следующий вид

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq}, \quad (3)$$

где  $\alpha_q$  – объемная доля  $q$ -ой фазы;  $\rho_q$  – плотность  $q$ -ой фазы;  $\vec{v}_q$  – скорость  $q$ -ой фазы;  $\dot{m}_{pq}$  – скорость массообмена, которая считается положительной при поступлении  $q$ -ой фазы в  $p$ -ую фазу и отрицательной, когда  $q$ -ая фаза покидает  $p$ -ую фазу;  $n$  – число фаз;  $S_{\alpha_q}$  – внешний массовый источник  $q$ -ой фазы.

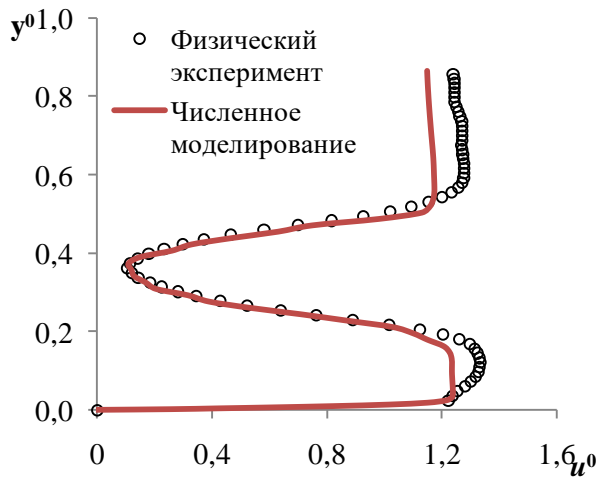
Во всей области решается одно уравнение импульса, а результирующее поле скоростей распределяется между фазами.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \rho + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (4)$$

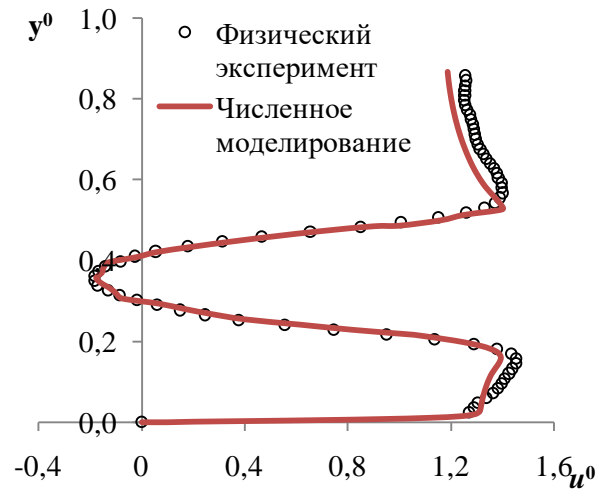
Уравнение импульса (4) зависит от объемных долей всех фаз через свойство плотности ( $\rho$ ) и вязкости ( $\mu$ ).

По результатам расчетов были измерены мгновенные значения продольной  $u$  и вертикальной  $w$  компоненты скорости, а затем были вычислены безразмерные значения продольной  $u^0 = \langle u \rangle / V$  и вертикальной  $w^0 = \langle w \rangle / V$  компонент скорости (где  $V$  – средняя скорость потока, м/с). Для построения графиков были использованы следующие безразмерные величины:  $x^0 = x/h$  и  $y^0 = y/h$ , ( $x$  – координата по длине лотка;  $y$  – координата по глубине потока;  $h$  – глубина в лотке, которая составляет 0,12 м).

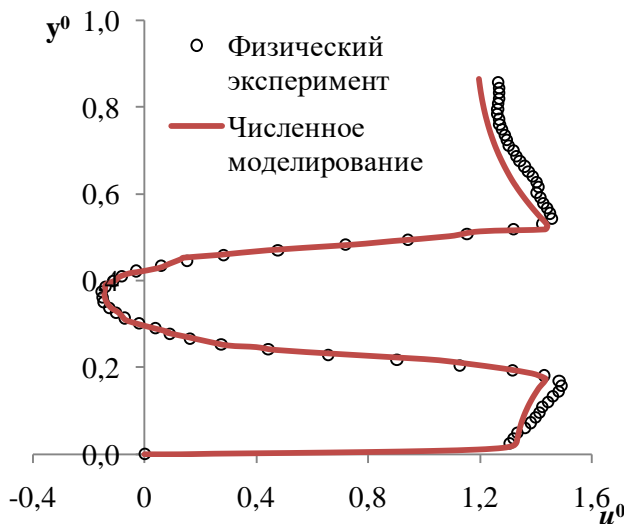
На рисунках 10 и 11 показано сопоставление экспериментальных данных графиков изменения профилей продольной  $u^0$  и вертикальной  $w^0$  компонент скорости при средней скорости потока  $V = 0,17$  м/с, полученных Чеботниковым А.В., и результаты численного исследования  $k-\omega$  SST модели турбулентности. Профили  $u^0$  и  $w^0$  построены в семи поперечных сечениях потока ( $x^0$ : 0,35; 0,23; 0,175; 0; -0,175; -0,23; -0,35).



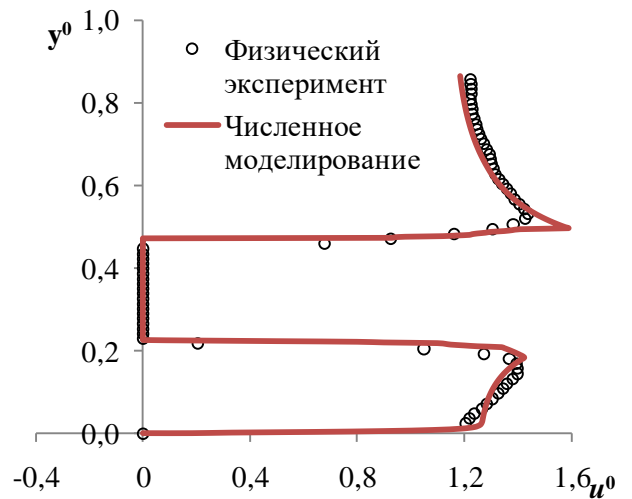
(a)



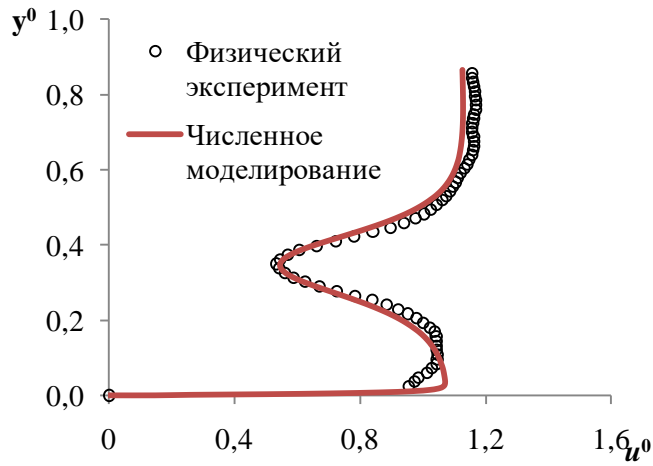
(б)



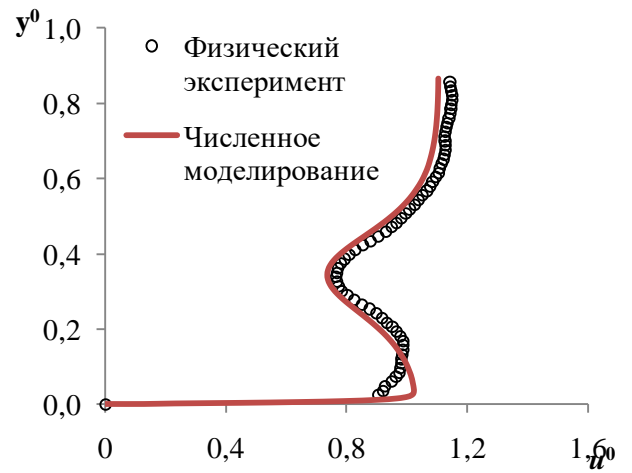
(в)



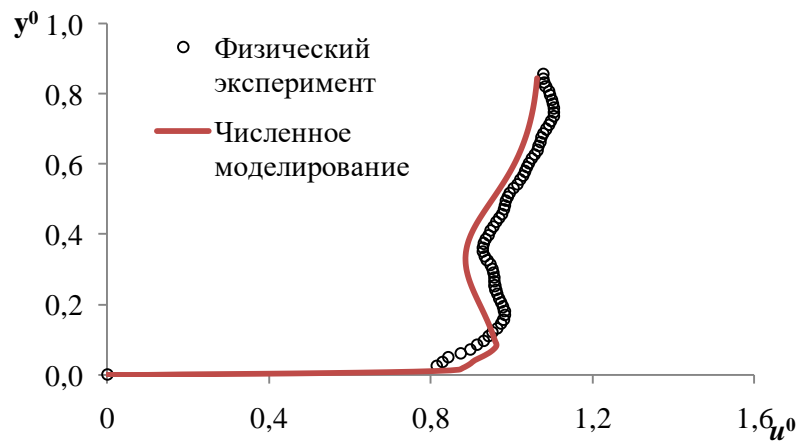
(г)



(д)

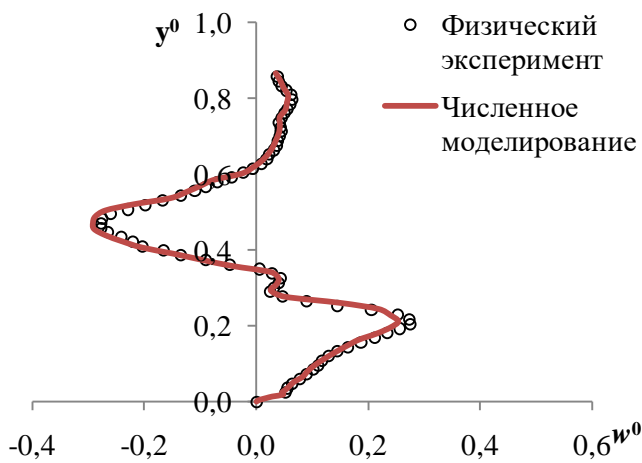


(е)

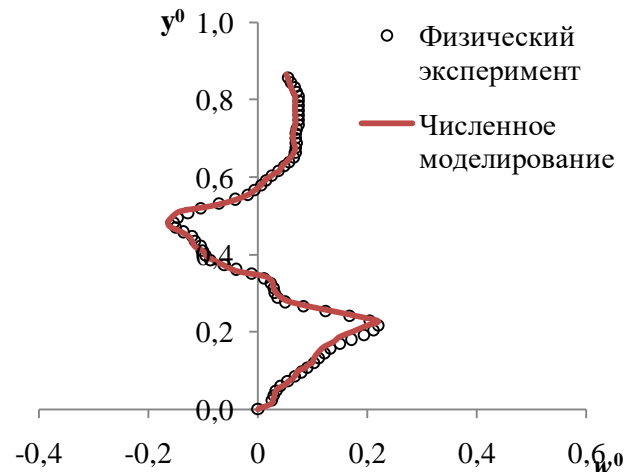


(ж)

Рисунок 10 – Экспериментальные и расчетные профили средней продольной  $u^0$  компоненты скорости в сечениях: а –  $x^0 = 0,35$ ; б –  $x^0 = 0,23$ ; в –  $x^0 = 0,175$ ; г –  $x^0 = 0$ ; д –  $x^0 = 0,175$ ; е –  $x^0 = -0,23$ ; ж –  $x^0 = -0,35$ ;  $V = 0,17$  м/с



(а)



(б)

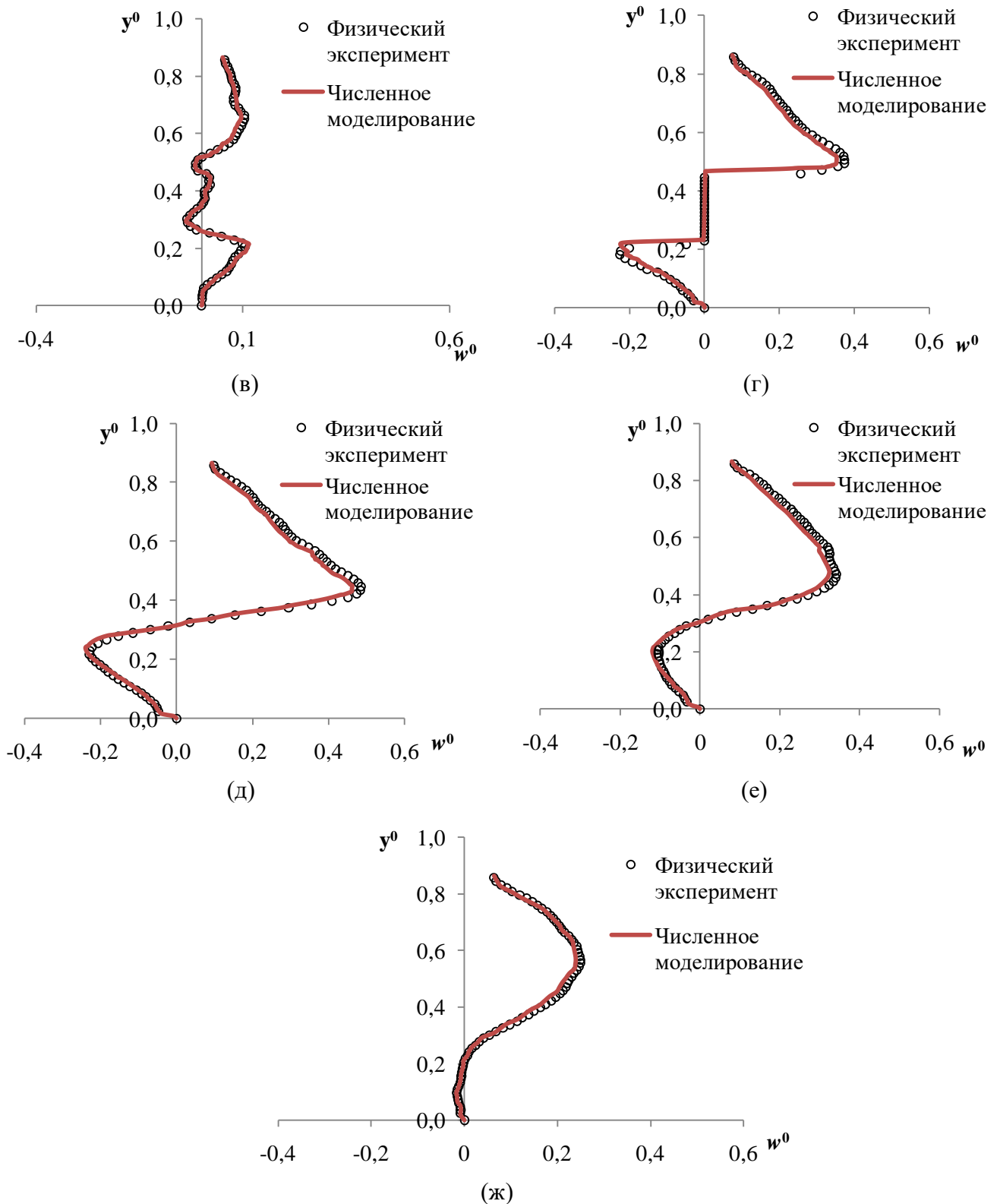


Рисунок 11 – Экспериментальные и расчетные профили средней продольной  $w^0$  компоненты скорости в сечениях: а –  $x^0 = 0,35$ ; б –  $x^0 = 0,23$ ; в –  $x^0 = 0,175$ ; г –  $x^0 = 0$ ; д –  $x^0 = 0,175$ ; е –  $x^0 = -0,23$ ; ж –  $x^0 = -0,35$ ;  $V = 0,17$  м/с

Как видно из этих графиков, соответствие экспериментальных данных и значений, полученных численным моделированием, выполненного в ПК ANSYS Fluent, очень хорошее, что говорит об адекватности использованной методики моделирования. Расхождения между

численными результатами моделирования и эксперимента не превышают 10%.

На рисунке 12 представлено сравнение профилей продольной компоненты скорости в случае, когда отсутствует цилиндр, с профилями скорости при наличии цилиндра.

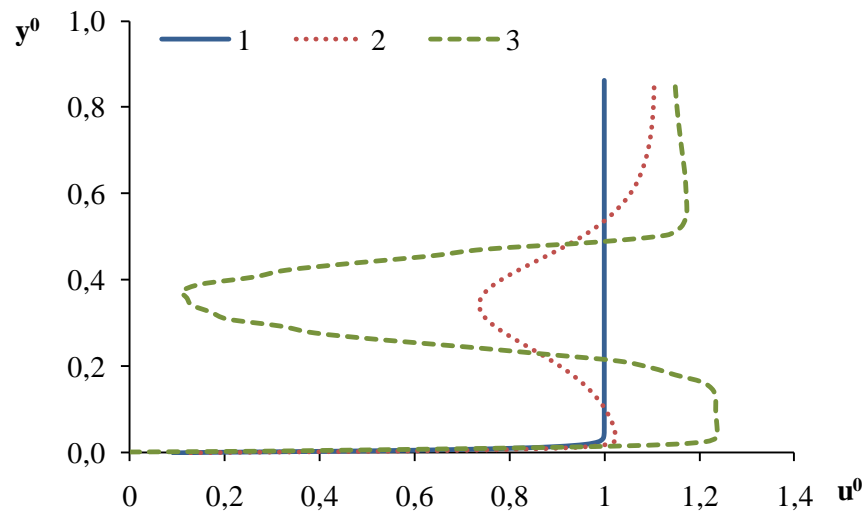


Рисунок 12 – Профили продольной компоненты скорости  $u^0$ :

1 – в отсутствие цилиндра,  $x^0 = 0$ ; 2 –  $y_0 = 1,5D$ ,  $x^0 = -0,23$ ; 3 –  $y_0 = 1,5D$ ,  $x^0 = 0,35$

Скорости вблизи дна в указанных поперечных сечениях (рисунок 12) больше, чем в случае отсутствия цилиндра. Скорость на расстоянии 2,4 мм от дна перед цилиндром возросла в 1,1 раз, а за цилиндром – в 1,27 раза, что согласуется с результатами физического эксперимента.

При анализе характера изменения касательных напряжений по длине расчетной области было установлено, что касательные напряжения на дне увеличились в 1,87 раз по сравнению с величиной касательных напряжений, когда цилиндр отсутствовал. Наибольшее превышение наблюдается немного ниже по потоку от цилиндра. Данный вывод согласуется с экспериментальными данными.

Выполнено численное моделирование в ПК ANSYS Fluent в 2D постановке. Моделирование проведено в условиях экспериментальных данных В. М. Sumer, 2001. В ходе численного моделирования приняты следующие допущения: дно сложено из однородного песка с постоянным диаметром частиц; материал трубы не учитывался. Для моделирования турбулентного потока использовалась  $k$ - $\varepsilon$  Realizable модель, основанная на уравнениях переноса кинетической энергии турбулентности ( $k$ ) и ее скорости диссипации ( $\varepsilon$ )

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b, \quad (6)$$

где  $\mu_t$  – турбулентная вязкость;  $G_k$  – генерация турбулентной кинетической энергии из-за средних градиентов скорости;  $G_b$  – кинетическая энергия выталкивающей силы;

Константы модели имеют следующие значения:  $G_{1\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_2 = 1,9$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1,9$ ;  $C_{3\varepsilon} = 1,3$ ;  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,2$ , а турбулентная вязкость вычисляется по формуле

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (7)$$

Для описания движения смеси жидкости и твердых частиц используется эйлера



модель многофазности (Eulerian), основанная на решении уравнений неразрывности и импульсов для каждой фазы

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) \\ & = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \sum_{l=1}^N K_{ls}(\vec{v}_l - \vec{v}_s) + (\vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{td,s}) \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\alpha_s$  - объемная доля фазы песка;  $\rho_s$  - плотность песка;  $\bar{\bar{\tau}}_s$  - тензор фазового напряжения – деформации;  $K_{ls}$  - коэффициент сопротивления;  $\vec{v}_s$  - скорость твердой фазы;  $\vec{v}_l$  - скорость жидкой фазы;  $\vec{F}_{lift,s}$  - подъемная сила;  $\vec{F}_{td,s}$  - турбулентная дисперсионная сила.

$$\bar{\bar{\tau}}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s \left( \lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{\bar{I}} \quad (10)$$

где  $\mu_s$  и  $\lambda_s$  - сдвиговая и объемная вязкость фазы;

На основе двухфазного подхода разработан оригинальный набор пользовательских функций, который учитывает гранулярность фазы песка, силу сопротивления и подъемную силу.

В расчетах получены распределения концентрации фаз воды и песка, векторного поля течения (рисунок 13), а также динамического давления в окрестности цилиндра (рисунок 14 и 15).

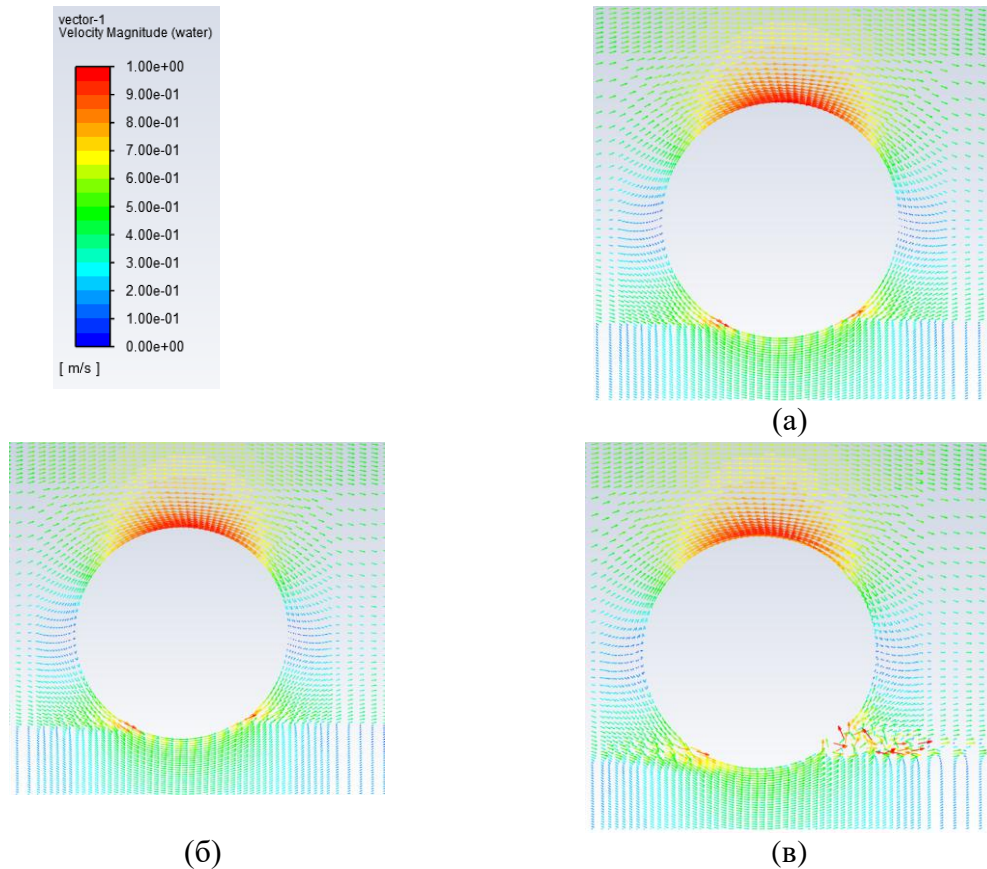


Рисунок 13 – Векторное поле течения в моменты времени: а)  $t = 0,004$  с; б)  $t = 0,1$  с; в)  $t = 0,2$  с

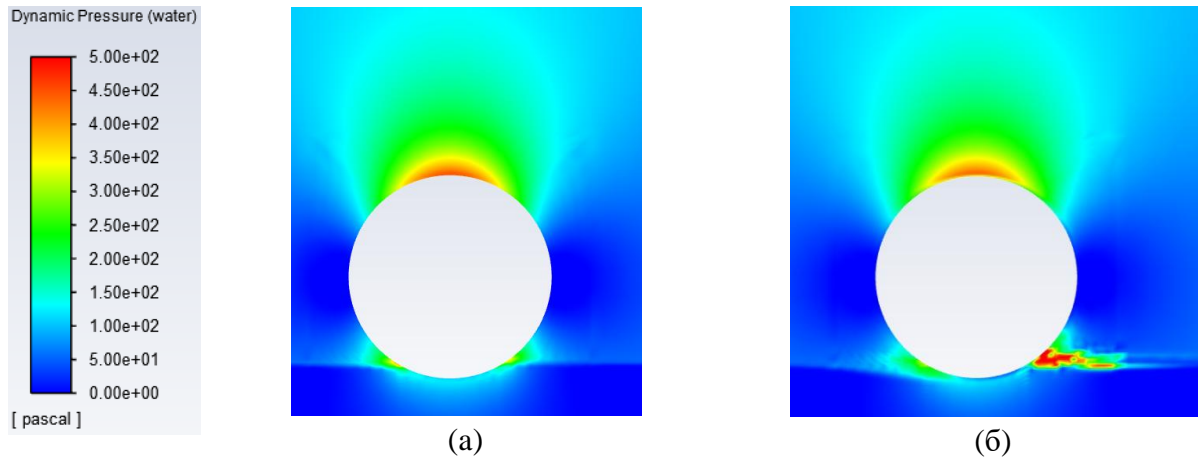


Рисунок 14 – Динамическое давление фазы воды в моменты времени: а)  $t = 0,1$  с; б)  $t = 0,2$  с

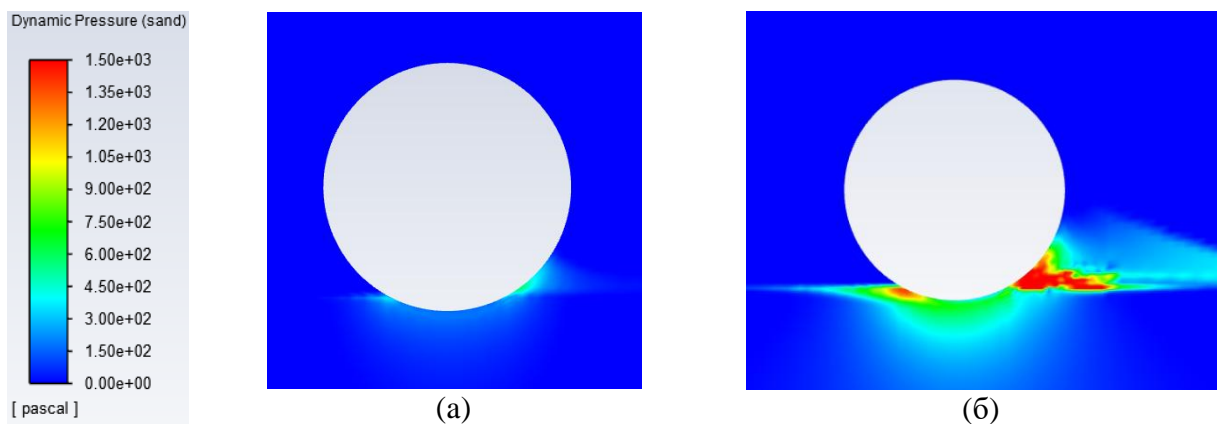


Рисунок 15 – Динамическое давление фазы песка в моменты времени: а)  $t = 0,1$  с; б)  $t = 0,2$  с

Выявлены механизмы начального этапа размыва под трубопроводом, которые соответствуют полученным в эксперименте. Рассчитан градиент давления. Получены касательные напряжения на стенке трубы и по ним вычислен параметр Шильдса, который необходим для оценки начала движения частиц песка.

Результаты численного моделирования с использованием вышеописанных моделей показали качественное и количественное совпадение с результатами экспериментов, полученных Sumet В.М. В связи с этим данные модели были использованы для решения задачи в 3D постановке.

Далее была рассмотрена задача в 3D постановке. В рамках этой задачи было рассмотрено две схемы расположения цилиндров, имитирующих подводные трубопроводы. По первой схеме цилиндр располагался на поверхности песка, а по второй на поверхность песка укладывались два цилиндра, расстояние между осями которых составляет  $2D$  ( $D = 0,025$  м) (рисунок 16). Для построения исходной геометрической модели были учтены все размеры лотка, указанные в третьей главе. Диаметра частиц песка составлял  $0,05$  мм, скорость потока  $0,14$  м/с. В ходе численного моделирования приняты следующие допущения: дно сложено из однородного песка с постоянным диаметром частиц; материал трубы не учитывался.



Рисунок 16 – Схемы проведенных экспериментов: а) эксперимент №1 - на поверхности дна один цилиндр, б) эксперимент №2 - на поверхности дна два цилиндра

Для визуального представления о переформировании донного грунта были построены изоповерхности объемной концентрации  $\alpha = 0,01$  в разные моменты времени (Рисунок 17 и 18).

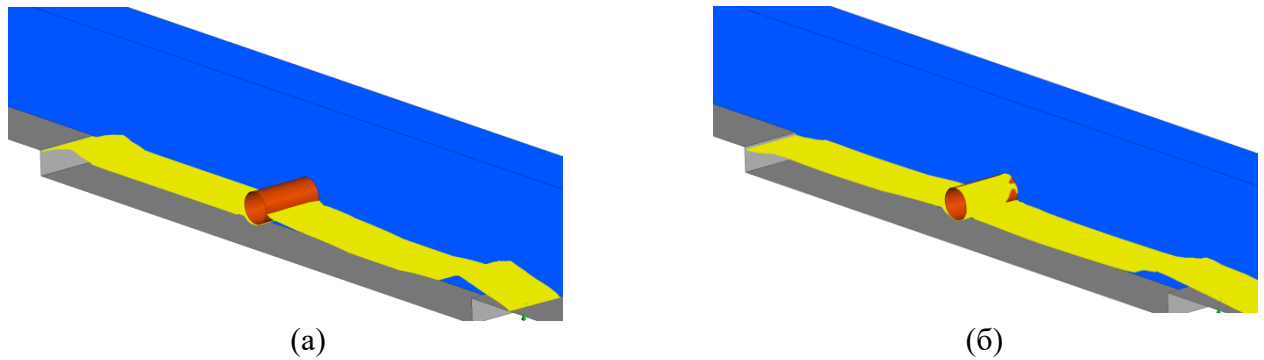


Рисунок 17 – Изоповерхность для эксперимента №1 в различные моменты времени: а)  $t = 0,3$  с; б)  $t = 10$  с

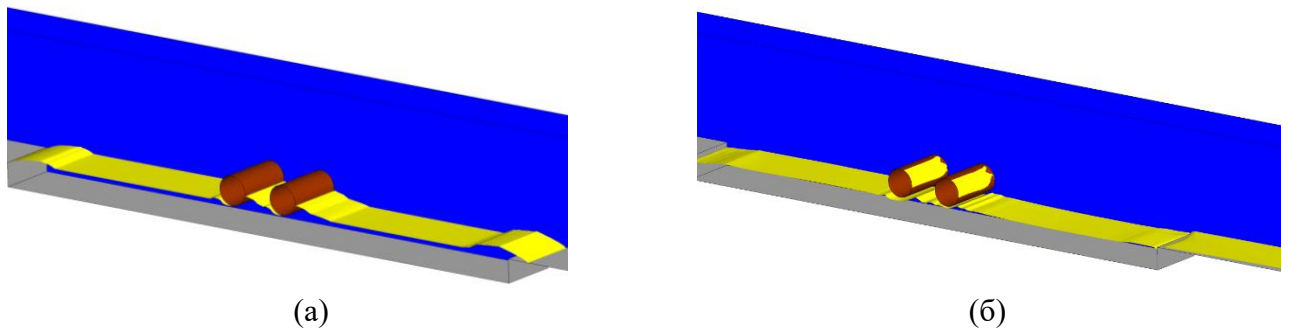


Рисунок 18 – Изоповерхность для эксперимента №2 в различные моменты времени: а)  $t = 0,3$  с; б)  $t = 10$  с

С помощью линий тока показано, образование вихрей, которые способствуют процессу размыва (рисунок 19).

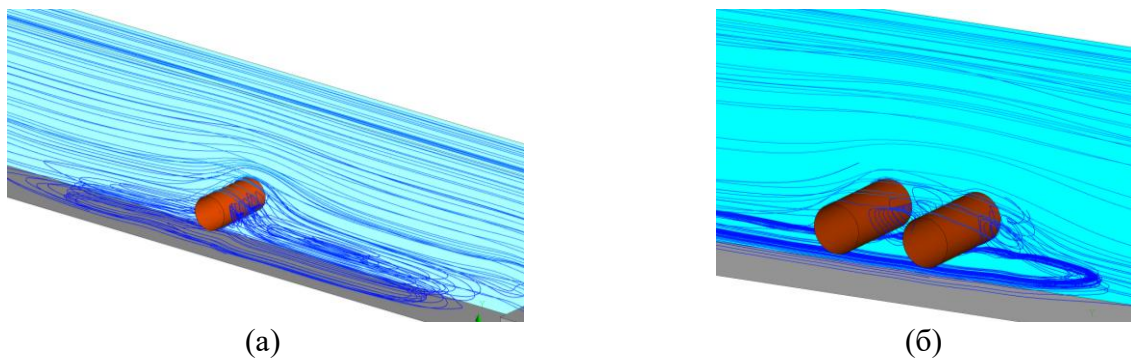


Рисунок 19 – Образование вихревой области для эксперимента №1 (а) и эксперимента №2 (б)

В ходе численного эксперимента наблюдался вынос частиц из системы. На рисунке 20 показана зависимость массы песка в расчетной области от времени. На интервале времени от  $t=0$  с до  $t=50$  с происходит резкое изменение графика, что говорит об интенсивном процессе выноса частиц. Линия №2 на графике располагается выше линии №1, поэтому можно сделать вывод о том, что при расположении двух цилиндров на поверхности дна, процесс переформирования донного грунта ускоряется.

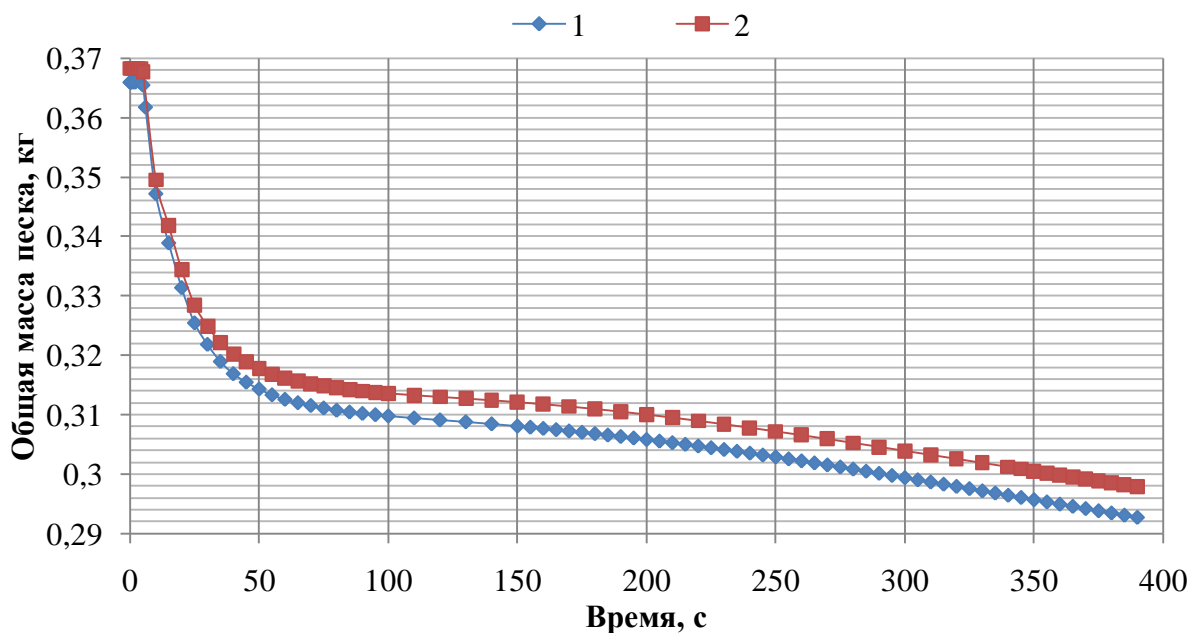


Рисунок 20 – График изменения общей массы песка от времени: 1 – эксперимент с двумя цилиндрами; 2 – эксперимент с одним цилиндром

При сравнении численного моделирования и физических экспериментов, описанных в третьей главе, получено количественное и качественное совпадение результатов. Следовательно, это говорит о том, что данная методика моделирования в программном комплексе ANSYS хорошо и с достаточной степенью точности описывает процессы физического эксперимента и может быть взята за основу моделирования реальных объектов, для прогнозирования возможности возникновения аварии при размыве дна на участках расположения подводных переходов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно выделить следующие итоги проделанной работы:

1. На основе выполненного обзора литературы поставлены цель и задачи диссертационной работы.

2. По результатам физического эксперимента установлено, что интенсивность переформирования подвижного дна зависит как от заглубления цилиндра, так и от наличия количества цилиндров на поверхности дна. Размыв имеет несимметричный характер, и процесс переформирования дна отличается явно трехмерной природой. При наличии на поверхности дна двух цилиндров, расположенных параллельно друг другу, процесс переформирования и образования ямы размыва происходит интенсивней, о чем можно судить по представленным фотографиям эксперимента.

3. При выполнении численных экспериментов по исследованию полей скоростей и напряжений в окрестности цилиндра, имитирующего подводный трубопровод, на недеформируемом дне был применен ANSYS Fluent. Задача решалась в RANS постановке. Для моделирования турбулентного потока была выбрана  $k-\omega$  SST модель турбулентности со стандартной пристеночной функцией. В качестве модели многофазности использовалась модель Volume of Fluid. Данный набор моделей показал качественное и количественное

соответствие результатов численного моделирования с физическим экспериментом других авторов.

4. Полученные результаты численного моделирования: распределение скоростей в потоке при обтекании цилиндра, изменение касательных напряжений на дне при наличии цилиндра, не противоречит исследований других авторов. Наличие цилиндра приводит к увеличению касательных напряжений в 1,87 раза.

5. Использование модели  $k-\epsilon$  Realizable и эйлеровой модели многофазности (Eulerian) в 2D постановке с учетом гранулярности фазы песка, сил сопротивления и подъемной силу для исследования начальной фазы размыва песка под цилиндром, получены распределения концентрации фаз воды и песка, векторные поля течения, а также динамические давления в окрестности трубы, что позволило выявить механизмы начального этапа размыва под трубопроводом. Полученные результаты соответствуют экспериментальным данным автора и не противоречат результатам других исследователей.

6. В результате численного моделирования в 3D постановке: построены изоповерхности  $\alpha = 0,01$  с объемной концентрацией песка, с помощью которых оценена глубина ямы размыва под цилиндром, установлена общая масса песка, которая выносится потоком из расчетной области. Анализ выноса частиц песка из расчетной области показал, что за одинаковый интервал времени (300 секунд), при расположении на песчаном дне двух цилиндров из расчетной области потоком было вынесено в 1,1 раза больше песка, чем за тот же промежуток времени в случае расположении одного цилиндра. В связи с этим можно сделать вывод, что при наличии двух цилиндров процесс переформирования донного грунта происходит быстрее, что также согласуется с физическим моделированием.

**Рекомендации и перспективы** дальнейшей разработки темы заключаются:

- в проведении дополнительных исследований переформирования дна в зоне расположения двух и более ниток с рассмотрением различных расстояний между ними, с дальнейшей выработкой рекомендаций;
- в проведении дополнительном численном моделировании переформирования дна в зоне расположения подводных трубопроводов с различным гранулометрическим составом донных отложений;
- в распространении разработанной методики на реальные объекты подводных трубопроводов.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Дегтярев В.В., Гармакова М.Е., Федорова Н.Н., Шумкова М.Н., Яненко А.П., Гринь Г.А. Моделирование динамики речного потока и русловые переформирования на участках расположения подводных трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 7 (727). С. 86-97.

2. Дегтярев В.В., Гармакова М.Е., Шумкова М.Н., Шлычков В.А. Численное моделирование деформаций речных русел при гидротехническом строительстве // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 5 (737). С. 105-177.

3. Гармакова М.Е. Верификация математической модели переформирования песчаного дна на участке расположения подводного трубопровода // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 2 (758). С. 67-79.

**Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.:**

4. Garmakova, M.E., Degtyarev, V.V., Fedorova, N.N., Shlychkov, V.A. Physical and numerical modeling of hydrophysical processes on the site of underwater pipelines // AIP Conference Proceedings, 2018, 1939, 020037.

5. Degtyarev, V.V., Garmakova, M.E., Shumkova, M.N., Chebotnikov, A.V. Modeling the process of river bed bottom erosion in the area of the underwater pipelines location // Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1404, 012013.

6. Garmakova, M., Fedorova, N., Degtyarev, V. Verification of numerical model of river bed bottom erosion in vicinity of underwater pipelines // AIP Conference Proceedings, 2023, 2504, 030079.

**Публикации в материалах конференций и других печатных изданиях:**

7. Гармакова М.Е., Дегтярев В.В., Мельникова Ю.Г., Федорова Н.Н. Физическое и численное моделирование гидрофизических процессов, приводящих к разрушению подводных трубопроводов // Тезисы XV Всероссийского семинара «Динамика многофазных сред» с участием иностранных ученых. 2017. С. 29-31.

8. Гармакова М.Е., Дегтярев В.В., Федорова Н.Н. Физическое и численное моделирование переформирования русла рек с песчаным ложем на участке расположения подводных трубопроводов // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2018. Т. 21. № 2 (68). С. 140-148.

9. Гармакова М.Е., Дегтярев В.В., Федорова Н.Н. Оценка переформирования речного русла на участке расположения подводных трубопроводов // Интеллектуальный потенциал Сибири. 2018. С. 164-168.

10. Гармакова М.Е., Дегтярев В.В. Моделирование процесса размыва донного грунта в зоне расположения подводных трубопроводов // Динамика многофазных сред. 2019. С. 40-41.

11. Гармакова М.Е. Деформация русла при антропогенной нагрузке на водоток в местах пересечения его подводными трубопроводами // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. 2021. С. 74.

12. Гармакова М.Е., Федорова Н.Н., Дегтярев В.В. Верификация математической модели размыва песчаного дна в окрестности трубопровода // Динамика многофазных сред (ДМС-2021). 2021. С. 23.

13. Гармакова М.Е. Численное моделирование локального размыва песчаного дна в области расположения подводного трубопровода // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. 2022. С. 100.