

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (СИБСТРИН)»

На правах рукописи



Гармакова Маргарита Егоровна

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

2.1.6 - Гидротехническое строительство, гидравлика и
инженерная гидрология

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Дегтярев Владимир Владимирович

Новосибирск – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПРИЧИН АВАРИЙ НА ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.....	11
1.1 Трубопроводный транспорт на территории Российской Федерации	11
1.2 Причины, приводящие к нарушению устойчивой эксплуатации	12
подводных переходов	12
ГЛАВА 2. ДЕФОРМАЦИЯ РУСЛА БЛИЗИ ТРУБОПРОВОДА НА РАЗМЫВАЕМОМ ДОННОМ ГРУНТЕ.....	24
2.1 Существующие методы прогнозирования переформирования русла	24
2.2 Исследование полей скоростей и напряжений в окрестности цилиндра, имитирующего подводный трубопровод, при поперечном его обтекании	32
2.3 Исследования размыва дна на участке расположения цилиндра на песчаном дне лотка	39
2.4 Численное моделирование размыва на участке трубопроводов	44
ГЛАВА 3. ДИНАМИКА РАЗМЫВА ДНА В ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	51
3.1 Экспериментальная установка.....	51
3.2 Эксперимент № 1. Цилиндр заглублен в песок на $1/2D$	52
3.3 Эксперимент № 2. Цилиндр на поверхности песка.....	58
3.4 Эксперимент № 3. На поверхности песка лежат два цилиндра	61
ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ ДНА В ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА В ПК ANSYS	65
4.1 Математические модели.....	66
4.2 Моделирование турбулентного режима движения жидкости.....	70
4.3 Моделирование многофазных течений.....	72
4.4 Исследование полей скоростей и напряжений в окрестности цилиндра при поперечном его обтекании в ANSYS Fluent.....	75
4.4.1 Результат численного моделирования	80
4.5 Переформирования песчаного дна в зоне расположения одиночного	86

цилиндра в 2-D постановке	86
4.5.1 Постановка задачи.....	86
4.5.2 Математическая модель.....	87
4.5.3 Результаты расчетов.....	91
4.6 Переформирования песчаного дна в зоне расположения одиночного	100
цилиндра и двух цилиндров в 3-D постановке	100
4.6.1 Постановка задачи.....	100
4.6.2 Результаты расчета.....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Сравнение средних продольных и вертикальных компонентов скоростей.....	122

ВВЕДЕНИЕ

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 У., 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, А.А. Таунсенда, Л. Прандтля, D. J. Tritton, Ван Дайка. Однако, следует заметить, что полученные результаты отно-

сятся 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 задачи, 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 [37], 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 рецензи-

руемых 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПРИЧИН АВАРИЙ НА ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

1.1 Трубопроводный транспорт на территории Российской Федерации

К трубопроводному транспорту относятся: нефтепроводы, газопроводы и продуктопроводы, данный вид транспорта является одним из самых надежных и экономически выгодным способом для доставки транспортируемых продуктов от мест добычи, переработки к местам потребления на значительные расстояния.

Весь добываемый газ (100%) транспортируется по магистральным трубопроводам, нефти транспортируется 99% и более 50% продукции нефтепереработки. Если рассматривать в общем объеме грузопотока трубопроводного транспорта, то доля газа составляет 55,4%, нефти - 40,3%, нефтепродуктов - 4,3%. На территории России общая протяженность всех магистральных трубопроводов составляет приблизительно 217 тыс. км, из них на газопроводные магистрали приходится больше всего - 151 тыс. км, далее нефтепроводы - 46,7 тыс. км и на нефтепродуктопроводы около 19,3 тыс. км. Магистрали такой протяженности на своем пути пересекают большое число различных препятствий, в том числе и водных: водохранилищ, болот [37], озер, больших и малых рек и т.д. Один из способов преодоления магистральными трубопроводами водных преград – это строительства подводных переходов [37].

По данным крупной нефтяной компании ПАО «Транснефть» значится около 2000 переходов под водой, которые проходят по трубам длиной 1800 км. Наиболее значительными из них являются переходные устройства через следующие реки: Волга (2300-8200 м., 8 ниток), Енисей (800 м., 3 нитки), Кама (830-5090 м., 10 ниток), Обь (735-1230 м., 14 ниток).

На сегодняшний день компанией ПАО «Газпром» реализованы такие масштабные проекты как:

- «Турецкий поток» - новый экспортный газопровод из России в Турцию через Черное море. Протяженность морского участка составляет более 900 км;

- «Сила Сибири» - трасса газопровода включает в себя строительства подводных переходов через реки Лена, Алдан и Амур;
- Трасса «Сахалин-Хабаровск-Владивосток» помимо пролива Невельского, пересекает более 400 водных преград, относящиеся к бассейнам рек Амура и Усури.

Подводные переходы через реки и водоемы можно классифицировать по различным признакам.

В таблице 1.1 представлены три группы сложности подводных переходов, которые выделяют в зависимости от ширины и глубины водного объекта.

Таблица 1.1 – Группы сложности подводных переходов [63]

Группа сложности перехода	Условия пересечения водного объекта трассами трубопроводов
1	2
I	Ширина зеркала воды в межень на участке пересечения трассой до 30 м при средних глубинах до 1,5 м
II	Ширина зеркала воды в межень на участке пересечения от 31 до 75 м при средних глубинах более 1,5 м
III	Ширина зеркала воды в межень для створа пересечения трассой менее 75 м, но зона затопления при 20-дневном стоянии уровней воды 10%-ной вероятности превышения составляет более 500 м

В соответствии с СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы» подводные переходы через водные преграды относятся к категориям I, II и B в зависимости от условий работы, диаметра трубопровода и судоходности водной преграды [64].

1.2 Причины, приводящие к нарушению устойчивой эксплуатации подводных переходов

В течение всего срока службы к подводным трубопроводам предъявляют высокие требования для обеспечения нормальной эксплуатации данных сооружений, и связано это с тем, что с экологической точки зрения данные объекты представляют опасность, ремонтные работы ввязывают большие трудности и сопро-

вождаются большими материальными затратами, а также, они являются участками с высоким уровнем напряженно – деформированного состояния трубы [35].

В период эксплуатации на подводных переходах могут возникать по различным причинам повреждения. Причины повреждения и их источники возникновения можно разделить на основные и второстепенные.

Причины повреждения и их источники

Основные причины:

- гидрологические особенности водотока в зоне строительства
- коррозионные дефекты стенки трубы

Второстепенные:

- брак при строительно-монтажных работах
- внешние механические воздействия
- природные катаклизмы
- биологическое и бактериальное воздействия
- ошибки прогноза развития деформации русла

В результате литературного анализа [17, 50], причины, приводящие к нарушению устойчивой эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов, можно представить в виде диаграммы (рисунок 1.1).

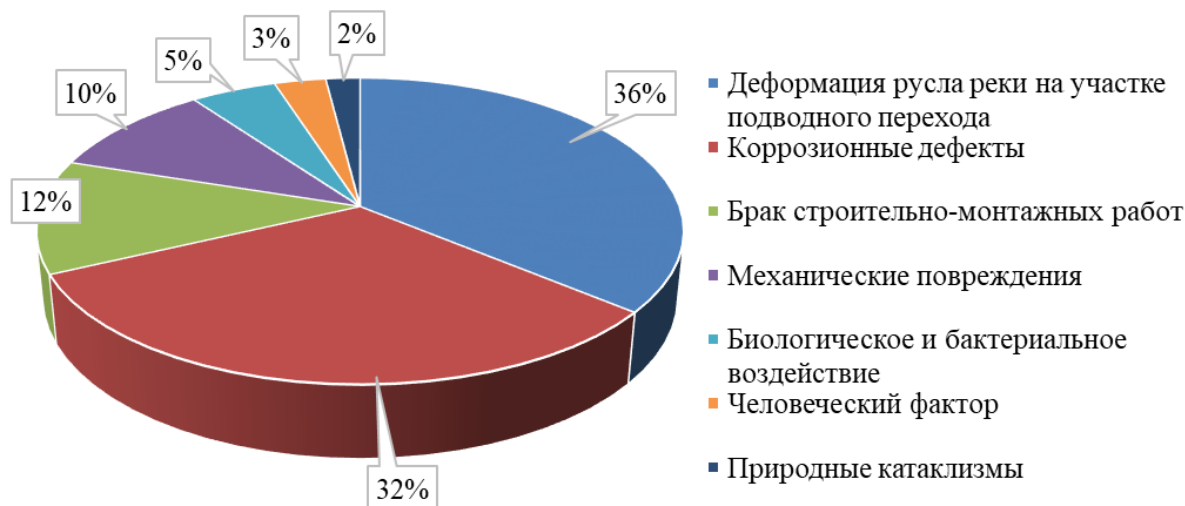


Рисунок 1.1 – Причины нарушения устойчивой эксплуатации подводных переходов трубопроводов

На сегодняшний день проблема повышения надежности эксплуатации подводных переходов через естественные и искусственные водные преграды является одной из острых, которая имеет экономическую, политическую и социальную составляющие.

На территории Российской Федерации были зафиксированы факты аварий на подводных переходах:

– Костромская область 16 ноября 2005 год. Во время проведения плановых работ по прокладке кабеля был поврежден дюкер. В результате этого повреждения канализационные стоки попали в реку Волга.

– Подмосковье 12 декабря 2006 год. В районе деревни Саурово, на участке трубопровода Электрогорск – Павловский Посад в двух местах произошел порыв канализационной трубы, в результате этого произошел разлив фекальных вод на площади 400 м². Авария произошла недалеко от очистных сооружений, поэтому в бассейн реки Клязьма загрязненные воды не попали. Были закрыты все задвижки, для того чтобы воды не попали в коллектор. В результате этого в городе Электрогорск прекратилась подача и холодного и горячего водоснабжения. Около 20 тысяч человек остались без воды. Прорыв трубопровода канализации диаметром 600 мм, который был принят в эксплуатацию около тридцати лет назад, произошел из-

за сильного напора воды, в связи с нарушениями технологических свойств. В Электрогорске работали две ветки водопровода. Прорыв произошел на линии, которая имела дефект.

– Ростовская область 12 мая 2009 год. На нефтепроводе в Чертковском районе Ростовской области произошел порыв, в результате которого вылилось 300 м³ нефти. Причина аварии - коррозия труб и неудовлетворительная организация работ по обслуживанию трубопровода.

– Пермский край 13 апреля 2009 год. В Пермском крае произошла авария на нефтепроводе Северокамск – Краснокамск. В результате этой аварии в речку Ласьва, которая впадает в реку Каму, произошла утечка нефти. Причина аварии – отверстие в трубопроводе.

– Бердск 15 октября 2013 год. Авария произошла на главной канализационной насосной станции г. Бердска, которая привела к сбросу загрязненных вод в Бердский залив. Место сброса – у левобережной дамбы мостового перехода через р. Бердь. В течение двух суток в водоем поступило 26 тыс. м³ загрязненных вод, что вызвало необходимость отключения водозабора у тепловой станции в Речкуновке.

Подводный переход, пересекающий р. Обь, со стороны левого берега требует проведения регулярных мероприятий по устранению дефектов. Дефекты возникают в результате того, что выше по течению русло реки состоит из двух рукавов: русло 1 и русло 2 (рисунок 1.2). Основной поток распределялся через русло 1, а поток со второго русла 2 при проектировании не был должным образом учтен, в результате, отметки уложенного дюкера в районе левого берега попали в зону размыва (рисунок 1.3). В связи с этим стоит отметить, что выбор створа подводного перехода имеет большое значение при дальнейшей его эксплуатации.

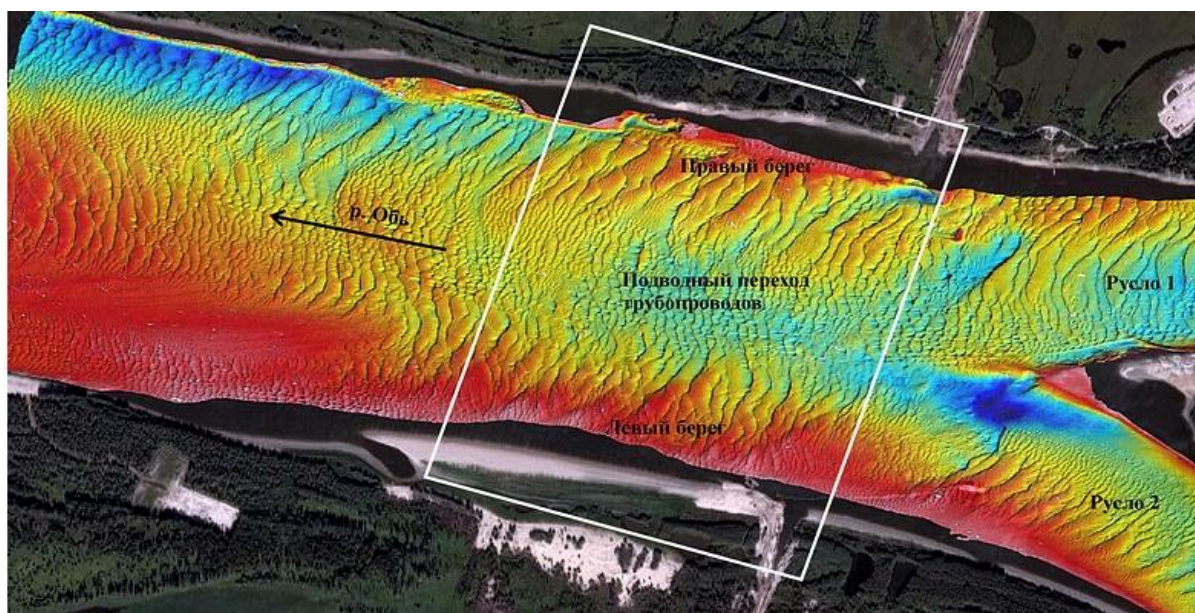


Рисунок 1.2 – Фрагмент русла реки Обь в районе расположения дюкера

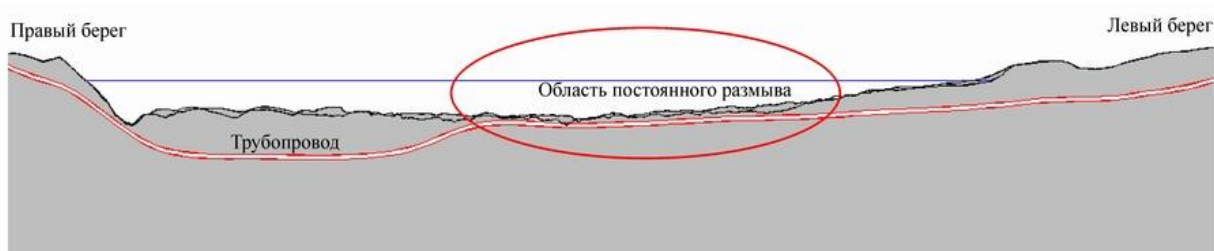


Рисунок 1.3 – Продольный профиль дюкера через реку Обь

На рисунке 1.4 в виде диаграммы отражены причины, которые требуют проведения капитального ремонта или реконструкции подводных переходов. Как видно из этой диаграммы наиболее распространенными причинами являются оголения (рисунок 1.5) и провисы подводных трубопроводов, которые возникают в результате недостаточной глубины заложения в период проведения строительномонтажных работ. Непроектное положение подводного перехода магистрального трубопровода приводит к появлению в нем дополнительных напряжений.



Рисунок 1.4 – Основные причины, которые приводят к капитальному ремонту подводных трубопроводов



Рисунок 1.5 – Оголение подводного перехода трубопровода

При обследовании двух ниток подводных переходов через реку Обь в 2004 году показало, что фактическое плановое положение осей трубопроводов дюкера 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 участке с ПК 4+93 по ПК 6+45 (152 м) лежат одна на другой (рисунок 1.6), что является грубым нарушением требований СНиП 2.05.06-85 (действующего в 2004 г.) и СП 36.13330.2012, действующих в настоящее время.

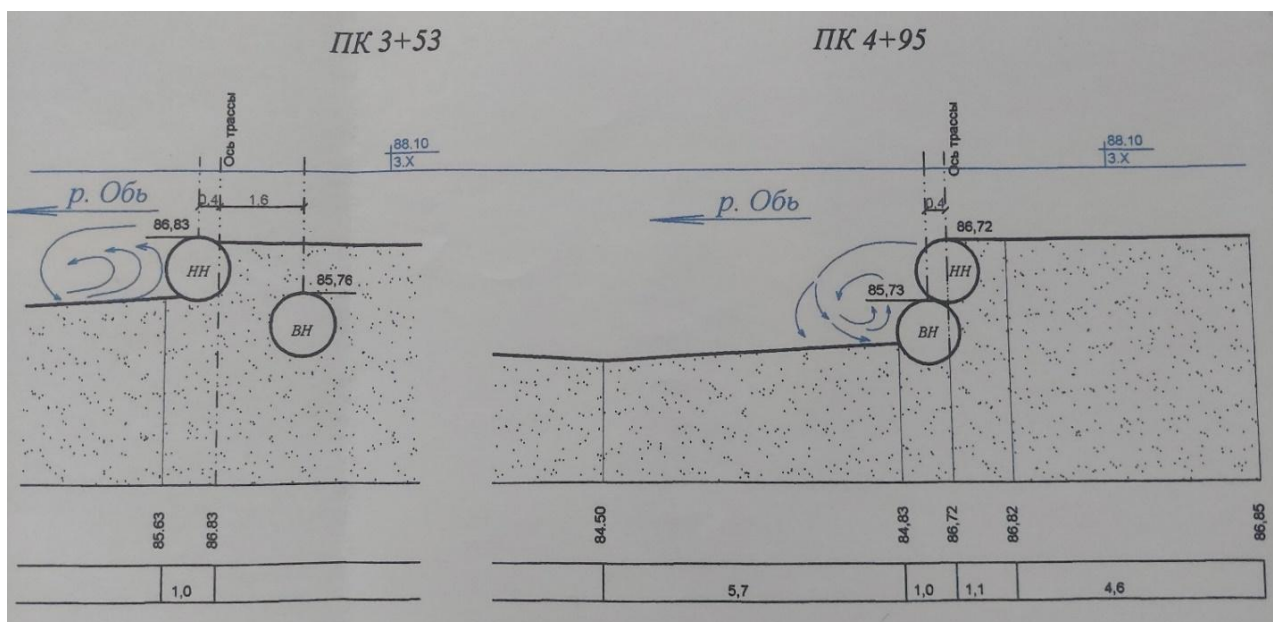


Рисунок 1.6 – Нитки трубопроводов лежащие одна на другой ПК 4+95

На отдельных участках подводного перехода обнаружены развивавшиеся воронки местного размыва грунта с оголением труб, угрозой подмыва и образования провисов. По результатам обследования 2018-2019 гг. на нитках подводных переходах были обнаружены участки с заглублением менее 1 м, такое заглубление является не достаточным.

К причинам, приводящих к образованию оголений и провисов подводных переводов, относят:

- естественное переформирование рельефа дна - вызвано происходящими в реке русловыми процессами (образование и движение побочей и осередков, меандрирование русла, изменение характеристик стока наносов, оползневые явления, подмыв и обрушение берегов, заторы льда, высокая обеспеченность расхода и продолжительность половодий и паводка).

Помимо этого следует отметить: прямые и косвенные воздействия;

К прямым воздействиям относятся: строительство новых ниток подводных переходов на участке действующих переходов, ремонтные работы по ликвидации оголений подводных переходов, гидротехнические сооружения и мероприятия в близи от подводных переходов.

К косвенным воздействиям относят: агротехнические мероприятия и земляные работы на водосбросах, гидротехнические сооружения и мероприятия, вы-

полненные на значительном расстоянии от подводных переходов, ошибки проектирования.

Количественно оценить влияние тех или иных причин не всегда представляется возможной.

По данным, которые представлены компаниями ПАО «Газпром» и ПАО «Транснефть», будет происходить рост число аварий, связанных со сроком службы подводных переходов трубопроводов. Например, если срок службы составляет более 15 – 20 лет, то удельный вес аварий будет составлять 85 %.

Распределение действующих подводных нефтепроводов по эксплуатационным срокам представлено на рисунке 1.7.

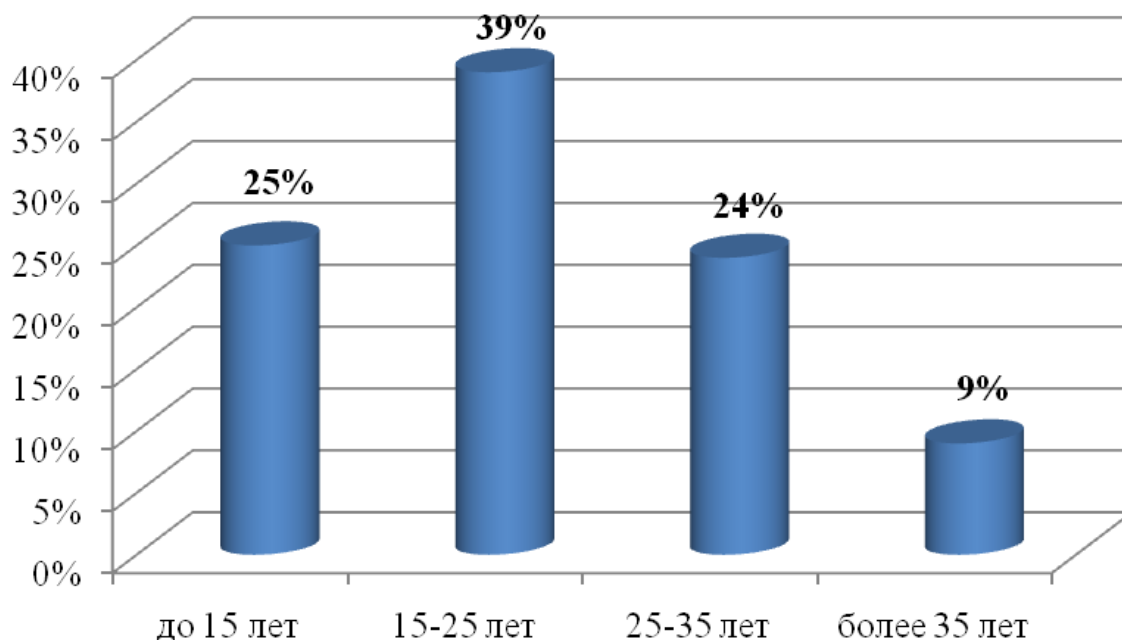


Рисунок 1.7 – Распределение нефтепроводам по срокам эксплуатации

Распределение действующих подводных газопроводов по эксплуатационным срокам представлено на рисунке 1.8.

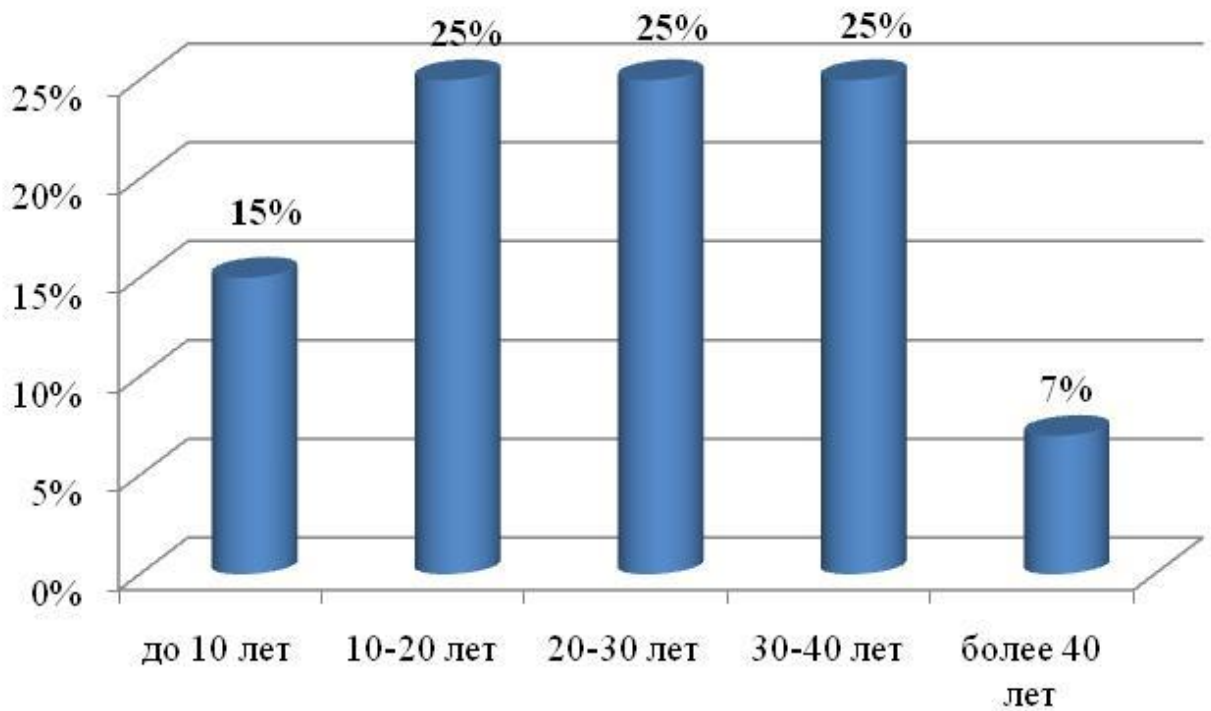


Рисунок 1.8 – Распределение газопроводов по срокам эксплуатации

На рисунке 1.9 представлена диаграмма, отражающая в процентах данные о причинах, которые привели к авариям на подводных переходах газопроводов в период эксплуатации с 1971 по 1990 гг. [51].

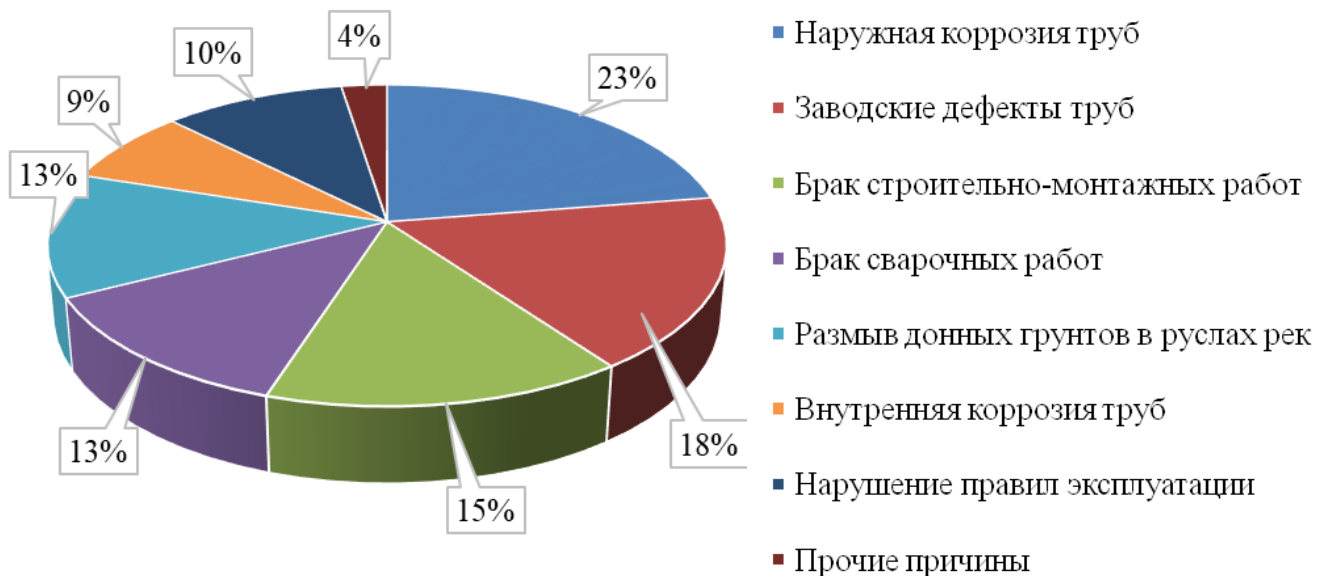


Рисунок 1.9 – Причины аварий в период эксплуатации с 1971 по 1990 гг. подводных переходов газопроводов.

При изучении вопросов состояния подводных переходов наиболее полный анализ причин, приводящих к аварийным ситуациям на трубопроводах, был выполнен Д.В. Штеренлихтом [74 – 77]. По результатам выполненного анализа, он сделал предположение, что аварии на подводных переходах через реки в большинстве случаев возникают из-за воздействия набегающего потока. В дальнейшем это предположение получило свое подтверждение с помощью проведения теоретических и экспериментальных исследований. В рамках исследований изучалось, какое влияние оказывают пульсации, возникающие от сил лобового сопротивления и подъемной силы, на коэффициенты лобового сопротивления трубопроводов с учетом различных типов поверхности трубопровода. Предположение, которое выдвинул Д.В. Штеренлихт, положило начало созданию новых методов и подходов к обследованию, ремонту и эксплуатации подводных переходов.

В зависимости от того насколько полно, на стадиях проектирования и строительства, учтены условия переформирования русла будет зависеть дальнейшая эксплуатационная надежность переходов. Классификация, которая учитывает тип руслового процесса, ширину реки, вид грунта и другие показатели была предложена П.П. Бородавкиным и О.Б. Шадриним [12]. В таблице 1.2 представлены 4 типа участка рек в зоне перехода подводного трубопровода, которые выделяют в зависимости от плановых и глубинных переформирований русла.

Таблица 1.2 – Типы участков рек

Типы рек	Глубинные и плановые переформирования	Характеристика	Примечание
1	2	3	4
Участки 1-го типа	Глубинные переформирования незначительны. При полном проявлении деформаций русла трубопроводы в большинстве случаев на таких участках не размываются	Малые реки шириной до 50 м. Развитие ленточно – грядового, осередкового и побочного типов руслового процесса, а также средние и крупные реки с устойчивыми руслами и берегами.	Опасность размыва трубопровода обычно исключается, если глубина залегания превышает 1 м, а врезка в берег 3-5 м.
Участки 2-го типа	Глубины деформации до 2 м, плановые – до 10 м.	Средние и крупные реки с ленточно – грядовым и побочным типами и руслового процесса.	

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4
Участки 3-го типа	Максимальные глубинные переформирования русла до 2 м, а плановые переформирования до 100 м.	Участки переходов через малые, средние и крупные реки с русловым процессом ограниченного, незавершенного и свободного типа меандрирования, и пойменной многорукавности.	
Участки 4-го типа	Максимальные плановые и глубинные более 2 м переформирования могут происходить в течение нескольких дней, недель или месяцев.	Участки рек с особыми формами руслового процесса: горные реки, реки с ярко выраженным неустойчивым руслом.	Строительство подводных переходов через такие участки рек не рекомендуется.

Подводные переходы трубопроводов на оголенных и размывших участках со стороны набегающего потока подвергаются силовому воздействию и дополнительным, значительным нагрузкам, возникающих в результате совместного действия потока и волн [45], и как следствие может привести к механическому разрушению трубопровода вследствие вибрации.

Разрушение трубопроводов приводит к серьезным экологическим последствиям (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Разлив нефти в результате аварии на нефтепроводе (р. Алдан)

К переформированию рельефа дна и образованию воронок размыва в зоне расположения подводных переходов трубопроводов приводит то, что расходы в реке меняются, следовательно, изменяются и гидравлические характеристики потока, такие как скорость течения, продольный уклон и глубина. Помимо скорости течения на интенсивность переформирования русла оказывает влияние свойство грунтов, слагающих ложе реки. Выявление участков подверженных размыву и их развитие во времени имеет большое значение на стадиях проектирования и эксплуатации подводных переходов трубопроводов [37]. 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.

ГЛАВА 2. ДЕФОРМАЦИЯ РУСЛА БЛИЗИ ТРУБОПРОВОДА НА РАЗМЫВАЕМОМ ДОННОМ ГРУНТЕ

Задолго до истечения срока службы эксплуатации подводных переходов трубопроводов обнаруживаются оголения труб и их провисание. Как уже отмечалось ранее, это является основной причиной возникновения аварийных ситуаций. Оголения и провисания, в свою очередь, образуются в результате того, что не учтено ряд факторов, которые оказывают влияние на размыв русла.

Наиболее важной задачей при проектировании подводных переходов трубопроводов является прогнозирование русловых деформаций. Согласно нормативной документации величина заглубления трубопроводов в ложе реки устанавливается с учетом возможных деформаций русла и исходя из положения линии максимального размыва русла [20, 63, 64].

Донный грунт в местах залегания подводного трубопровода подвержен риску размыва по причине обычного транспорта влекомых наносов, но также и по причине динамической неоднородности потока, которая возникает в результате нарушения естественного руслового режима в реке при обтекании препятствия [21]. На размытом участке дна происходит провисание трубопровода, что приводит к генерации свободных колебаний и развитию резонансных режимов со сложной эпюрой колебаний [37]. Длительное размывание трубопровода даже без возникновения колебаний также способствует быстрому нарушению футеровки, изоляции, механическим повреждениям. Эти обстоятельства могут привести к механическому разрушению трубопровода и опасной залповой утечке загрязняющих веществ в воду.

2.1 Существующие методы прогнозирования переформирования русла

Согласно нормативному документу [20] прогнозирование плановых деформаций русла выполняется на основе русловых съемок за 5-7 лет, путем совмещения поперечных сечений. Экстраполируя смещение характерных точек русла по

направлению и по числовому значению, получают положение русла на прогнозируемый срок [20]. В практике проектирования подводных переходов вышеупомянутый метод наиболее распространен, но он дает только приблизительные величины размыва русла, следовательно, использование этого метода недостаточно для обеспечения безопасных условий эксплуатации данных сооружений.

В настоящее время, имеются следующие подходы к прогнозированию деформаций русла: метод, основанный на совместном решении уравнений движения жидкости, деформаций русла и транспорта наносов; метод, основанный на совместном решении уравнений движения жидкости и баланса наносов; метод расчета, основанный на теории насыщения потока наносами [41]. Далее рассмотрим эти методы.

Метод, основанный на совместном решении уравнений движения жидкости для прогнозирования деформации русла, представлен в следующих работах [3, 19, 31, 32, 48]. В общем случае система уравнений, которая описывает движение руслового потока в рамках одномерной модели, имеет вид [42]

$$\begin{cases} \frac{\partial z_0}{\partial l} + \frac{\partial H}{\partial l} + \frac{V^2}{C^2 H} + \frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial l} = 0; \\ B \cdot \left(H \frac{\partial V}{\partial l} + V \frac{\partial H}{\partial l} \right) + HV \frac{\partial B}{\partial l} = 0; \\ B \cdot \frac{\partial q_s}{\partial l} + q_s \cdot \frac{dB}{dl} + (1 - \varepsilon)B \cdot \frac{\partial z_0}{\partial t} = 0, \end{cases} \quad (2.1)$$

где z_0 – средняя высота дна в поперечном сечении, м; $z_0 = z' - H$;

z' и H – отметка водной поверхности и средняя глубина на участке, м;

l – длина участка, м;

V – средняя скорость в пределах участка, м/с;

C – коэффициент Шези, м^{1/2}/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

B – средняя ширина русла реки, м;

q_s – удельный расход русловых наносов на погонный метр, м²/с;

ε – динамический коэффициент сплошности донного грунта.

Система уравнений (2.1) была получена при учете ряда следующих допущений [42]:

- вдоль потока меняется ширина живых сечений, но это изменение не существенно во времени;
- движение неустановившиеся;

В связи с тем, что в системе уравнений (2.1) имеется пять неизвестных функций – V , H , q_s , z_0 и C , она является не замкнутой. Чтобы ее замкнуть, необходимо дополнительно использовать формулы для коэффициента Шези и расхода наносов.

Другой ученой И.И. Леви в своей работе [48] рекомендует проводить расчеты русловых деформаций с произвольным профилем дна на основе следующей системы уравнений [42]

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial S} = -\frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial S} - \frac{Q^2}{k^2} - \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t}; \\ \gamma' \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \cdot b = -\frac{\partial P}{\partial S}; \\ Q = const, \end{cases} \quad (2.2)$$

где y – отметки водной поверхности, м;

z – отметки дна русла, м;

S – продольные координаты, м;

V – средняя скорость потока, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Q – расход воды, м³/с;

k – модуль расхода, м³/с;

t – время, с;

γ' – объемный вес наносов, Н/м³;

P – весовой расходом наносов, кг/с.

$$P = \gamma' \cdot f(V) \cdot b, \quad (2.3)$$

где b – ширина русла, м.

Уравнение (2.2) составлено при следующих допущениях: «русло достаточно большой ширины близкое к прямоугольному поперечному сечению; не учитыва-

ется размыв берега; по ширине водотока размыв дна происходит равномерно» [41].

Академиком Великановым М.А. [19] было предложено уравнение размыва для донных и взвешенных наносов [41]

$$\gamma d \frac{\partial(mU_n)}{\partial S} + m_0 \rho + \gamma \frac{\partial Z}{\partial t} = 0, \quad (2.4)$$

где m – коэффициент сплошности движения;

$m_0 \rho$ – расход взвешенных наносов, оседающих на дно или поднимающихся вверх;

U_n – скорость перемещения наносов по дну;

m_0 – относительная плотность наносов.

При решении задачи о деформации русла М.А. Великанов «рассматривает систему уравнений, которая состоит из уравнения транспорта наносов, уравнения баланса наносов и уравнения постоянства расхода воды» [41]

$$\begin{cases} P = \frac{AQ}{B} \cdot i^{4/3}; \\ \frac{\partial P}{\partial x} = b \cdot \frac{\partial z}{\partial t}; \\ Q = const, \end{cases} \quad (2.5)$$

где A и B - постоянные величины;

i – геометрический уклон дна русла;

P - объемный расход наносов, м³/с;

x - продольная координата с положительным направлением против течения, м;

b - ширина русла, м;

z - отметка дна;

t - время, с.

При решении уравнения (2.5) были приняты следующие допущения [41]:

- глубина потока мало изменяется по сравнению с изменением отметок поверхности воды и дна;

- русло имеет бесконечную ширину;
- форма поперечного сечения русла близка к прямоугольной.

Подставив уравнение транспорта наносов в уравнение баланса наносов и приняв функцию $i = f(x)$ линейной, М.А. Великанов получил уравнение, решение которого приводится к виду

$$z = \sum_{k=1}^{k=n} C_k e^{-a_k^2 t} \cdot \sin \frac{a_k x}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (2.6)$$

где C_k - коэффициент Фурье при разложении заданной функции $z(x, 0) = y(x)$ в ряде;

e - основание натурального логарифма;

a - коэффициент, равный $a = \frac{\gamma_T}{\gamma_0} - 1$;

ε - параметр, равный $\varepsilon = \frac{A \cdot Q \cdot C_1}{B \cdot b}$;

C_1 - безразмерный коэффициент Шези;

γ_T - объемный вес размываемого грунта, Н/м³;

γ_0 - объемный вес воды, Н/м³.

Еще один метод, который используется при прогнозировании деформаций в русле, опубликован в трудах [46]. Этот метод основан на совместном решении уравнений движения жидкости и баланса наносов. К недостаткам этого метода можно отнести то, что прежде чем приступить к решению этого уравнения, необходимо обладать информацией по расходам наносов. Расход наносов должен быть измерен в двух створах, в начале и конце рассматриваемого участка. Следовательно, без этой исходной информации спрогнозировать деформации русла не представляется возможным. В дальнейшем этот метод был усовершенствован И.А. Кузминым и К.И. Россинским [60]. Их усовершенствование заключается в разделении наносов на руслоформирующие и неруслоформирующие и вывели зависимость для определения их расходов. Это методика применима при решении задач по определению глубинных деформаций по ширине русла на расчетном участке, так как она не учитывает процесс боковой эрозии и составы размываемых грунтов, которые поступают на расчетный участок. Не учет этих факторов сказывается на точности расчетов [42].

Из выше проведенного обзора можно сделать вывод, что при применении всех вышеупомянутых методов расчета можно получить только среднюю величину деформаций русла, а также они недостаточно полно отражают динамику размыва, что важно при проектировании подводных переходов.

Еще один метод расчета, который основан на теории насыщения потока наносами, был разработан А.Г. Хачатряном [68] и Х.Ш. Шапиро [70]. Они получили зависимость для расчета транспортирующей способности потока с учетом того, что состав наносов не одинаковый. Зависимость имеет следующий вид [41]

$$\rho_T = \rho_{TB} + \rho_g, \quad (2.7)$$

где ρ_{TB} и ρ_g - транспортирующая способность потока в отношении взвешенных и донных наносов, кг/м³

$$\rho_{TB} = \sum_{i=4}^4 \rho_{Ti}, \quad (2.8)$$

где ρ_{Ti} - транспортирующая способность потока в отношении отдельно взятой i -ой фракции наносов, кг/м³ [41]

$$\rho_{Ti} = k_i V^{0,7} U_B^* \left(\ln \frac{W_{i+1}}{W_i} - \frac{W_{i+1} - W_i}{U_B^*} \right), \quad (2.9)$$

где k_i - коэффициент, зависящий от диаметра фракций;

V - средняя скорость потока в сечении русла, м/с;

U_B^* - максимальная гидравлическая крупность взвешенных наносов, м/с;

W_{i+1} и W_i - максимальная и минимальная гидравлическая крупность наносов в пределах i -ой фракции, м/с;

i - порядковый номер фракции наносов.

$$\rho_g = k_g V^{0,9} U_g^* \left[\ln \frac{U_g^*}{U_B^*} - \left(\frac{1}{U_B^*} - \frac{1}{U_g^*} \right) W_{min_g} \right], \quad (2.10)$$

где k_g - коэффициент, равный 4,65 для мелкопесчаных наносов;

U_g^* - максимальная гидравлическая крупность донных наносов;

W_{min_g} - минимальная гидравлическая крупность донных отложений, м/с.

В дальнейшем развивая метод, предложенный А.Г. Хачатряном и Х.Ш. Шапиро, С.С. Медведев [52] получил зависимость для расчета глубинных и плановых деформаций русла [42]

$$\Delta Z = \sum_{i=1}^n \Delta Z_i = \frac{Q\Delta t}{B} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{\tau_i} - \rho_{0_i}}{\gamma_{H_i l_{np_i}} \left(1 + \frac{z}{H} \eta_i\right)}, \quad (2.11)$$

$$\Delta B = \sum_{i=1}^n \Delta B_i = \frac{Q\Delta t}{H} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{\tau_i} - \rho_{0_i}}{\gamma_{H_i l_{np_i}} \left(1 + \frac{z}{H} \eta_i\right)}, \quad (2.12)$$

где ΔZ и ΔB - глубина и ширина размыва русла, м;

ΔZ_i и ΔB_i - глубина и ширина размыва русла i -ой фракции, м;

Δt - расчетный промежуток времени, с;

Q - расход воды расчетной обеспеченности, м³/с;

ρ_{τ_i} и ρ_{0_i} - транспортирующие способности потока в отношении i -ой фракции в выходном и входном створах, кг/м³;

B и H - ширина русла и средняя глубина потока, м;

γ_{H_i} - объемный вес наносов i -ой фракции, Н/м³;

z - высота берегового откоса, м;

η_i - относительная величина, характеризующая насыщение потока продуктами размыва берегов и дна в отношении i -ой фракции.

$$\eta_i = \frac{f \cdot (f^{-0,5} \cdot U_B^* - W_i)}{U_B^* - W_i}, \quad (2.13)$$

где f - параметр, характеризующий форму русла

$$f = \frac{H}{l_{ц}}, \quad (2.14)$$

где $l_{ц}$ - расстояние от поверхности потока до середины смрченного периметра откоса, м.

На основании выполненного обзора методов, использующихся при прогнозировании деформаций, можно сделать вывод, что все они применимы на этапах выбор створа прокладки подводных трубопроводов и не отражают развитие деформаций русла непосредственно в окрестности подводных переходов, а также образование и развитие воронок размыва, что является очень важным при безопасной эксплуатации подводных переходов.

Процессы переноса донного аллювия носят исключительно сложный характер, включающий несколько стадий и имеющий стохастическую природу. Интен-

сивность деформаций русла зависит от величины скоростей течения, их распределения по глубине, и свойств грунтов, слагающих русло реки. Наличие на дне препятствия приводит к локальному изменению структуры скоростей и, следовательно, обуславливает нарушение естественного баланса. Так, торможение потока перед препятствием может понизить транспортирующую способность и вызвать аккумуляцию аллювия у переднего фронта трубы. Формирование местных циркуляций и вихрей способно значительно осложнить процесс перераспределения твердого расхода.

Надежные и универсальные методы расчета локальных деформаций донного профиля – тем более, в условиях наличия препятствия на дне, в настоящее время, как показал анализ, отсутствуют. Тонкие процессы переноса полидисперсных взвесей могут быть описаны с помощью проведения физического и численного моделирования. В статье [38] рассмотрены новые численные методы для оценки деформаций речных русел и представлены результаты расчетов гидрофизических процессов на реках с деформируемым ложем с помощью аппарата математического моделирования.

При решении задачи о русловой деформации была использована модель, в которой наносы не делились на взвешенные и влекомые, а уравнение баланса имело следующий вид

$$(1 - p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} = 0, \quad (2.15)$$

где p - пористость донных отложений;

z_b - полный слой движущихся наносов;

q_{bx}, q_{by} - компоненты вектора расхода твердой фазы.

Проинтегрировав уравнение (2.17) получим анализ начальной тенденции изменения дна в терминах величин $b_t = \partial z_b / \partial t$.

Уравнение (2.17) параметрически описывает процессы взвешивания и подъема донного аллювия, его перенос по руслу, выпадения и аккумуляции на дне. Объем перемещенного грунта, рассчитываемый по уравнению баланса, меняется со вре-

менем, а полный дебит аллювия V_{trans} на участке в фиксированный момент был получен по формуле

$$V_{trans} = \iint (\tilde{z}_b - z_b) dx dy, \quad (2.16)$$

где \tilde{z}_b - результирующий профиль дна.

По результатам численного моделирования было отмечено, что процесс перемещения наносов состоит из размыва грунта и последующим осаждением частиц такой же массы в другом месте русла, а также, что на скорость заиления влияет фактическая величина расхода наносов [38].

2.2 Исследование полей скоростей и напряжений в окрестности цилиндра, имитирующего подводный трубопровод, при поперечном его обтекании

Исследования обтекания потоком жидкости цилиндра, имитирующего подводный трубопровод, посвящено большое количество публикаций к одним из главных следует отнести работы [65, 86, 102]. Получена богатая теоретическая и экспериментальная информация, которая имеет определяющее значение для решения ряда важных проблем, таких, например, как сопротивление движению тел в жидкости и структура гидродинамического следа за движущимся в жидкости телом.

В теоретических работах рассматривался, в основном, случай относительно малых значений чисел Рейнольдса набегающего потока. В работах [16, 106, 109] опубликованы визуальные картины движения жидкости в окрестности цилиндра, полученные в экспериментах разных авторов. При больших числах Рейнольдса количественная информация о поле скоростей имеется только на достаточно большом удалении вниз по потоку от цилиндра [65].

В лаборатории экспериментальной прикладной гидродинамики Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук были проведены экспериментальные исследование по изучению полей скоростей и напряжений в окрестности цилиндра [30]. Эксперименты проводились в прямоугольном канала, ширина которого составляет $B=0,2$ м. Глубина на-

бегающего потока h была неизменной и составляла 0,12 м. На различных расстояниях от дна канала располагался цилиндр диаметром $D=0,028$ м. На рисунке 2.1 показана схема выполненных экспериментов и неподвижная система координат (z_0 – расстояние от дна до оси цилиндра) [39].

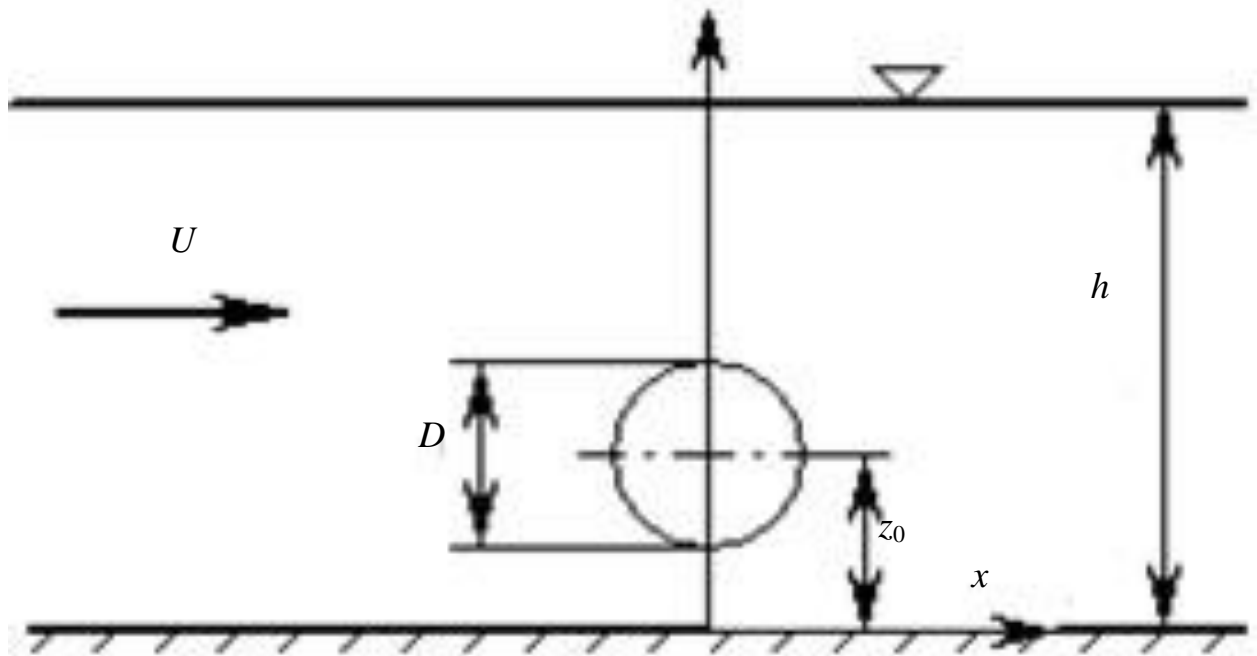


Рисунок 2.1 – Схема эксперимента [30]

Расстояние z_0 изменялось, и было рассмотрено три случая (рисунок 2.2). Первый случай, когда $z_0 = 0$ - цилиндр возвышался над дном на половину своего диаметра. Во втором случае $z_0 = 0,5D$ - цилиндр лежал на дне канала и третий случай, когда $z_0 = 1,5D$ - между дном канала и цилиндром имелся зазор, равный диаметру цилиндра [39]. Также в экспериментах был рассмотрен случай, когда цилиндр отсутствовал. Для каждой серии экспериментов средняя скорость потока задавалась четыре раза и составляла следующие значения: 0,14; 0,17; 0,21 и 0,24 м/с. Температура воды составляла 18 °С.

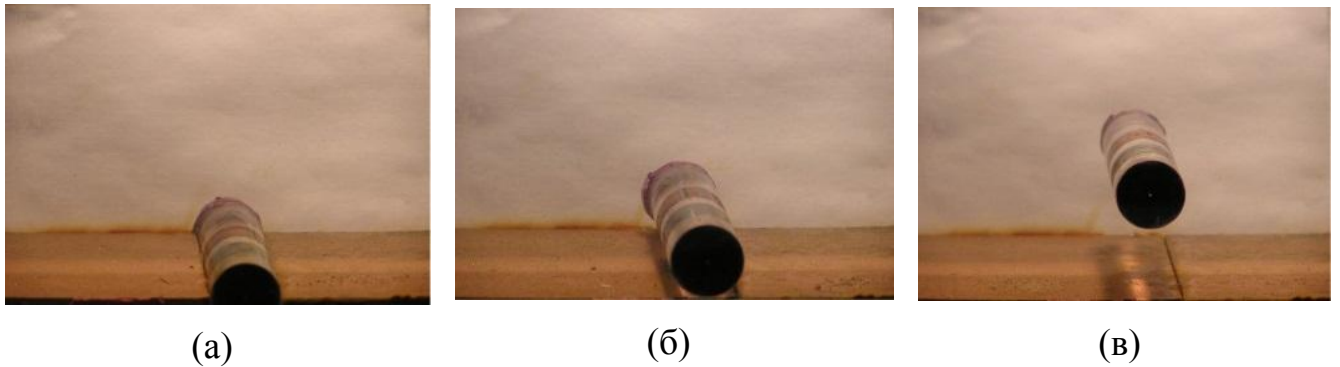


Рисунок 2.2 – Фотоснимки расположения цилиндра относительно дна [30]:
 а – цилиндр возвышается над дном канала на половину своего диаметра ($z_0 = 0$);
 б – цилиндр лежит на дне канала ($z_0 = 0,5D$);
 в – под цилиндром зазор, равный его диаметру ($z_0 = 1,5D$)

Для изучения и фиксации поля скоростей использовался PIV-метод (Particle Image Velocimetry) [66]. Схема PIV-метода приведена на рисунке 2.3.

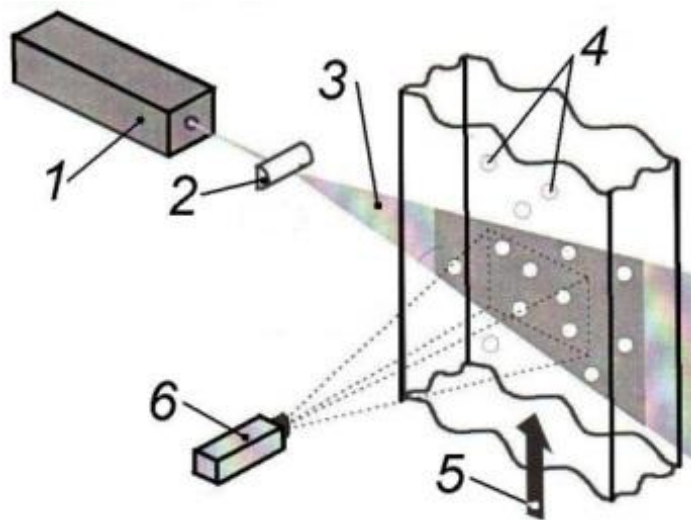


Рисунок 2.3 – Схема PIV-метода [30]: 1 – импульсный лазер; 2 – оптическая система, формирующая световой нож; 3 – световой нож; 4 – частицы-трассеры;
 5 – исследуемый поток; 6 – цифровая видеокамера

Луч лазера, с помощью оптической системы расширяется до плоскости, так называемого светового ножа (2). Световой нож выделяет узкое сечение в движущемся потоке жидкости, именно в этом сечении происходит измерение поле скорости. В поток (5) были внесены частицы алюминиевой пудры, в данном случае они называются частицы-трассеры (4), которые хорошо отражают свет. Перпен-

дикулярно световому ножу устанавливается цифровая видеокамера (6), она фиксирует яркие изображения частиц на темном фоне и производит два снимка через заданный интервал времени. Полученные изображения обрабатываются на компьютере, оснащенном специальным программным обеспечением. При обработке изображений вычисляются смещения частиц на втором кадре относительно первого кадра. По смещениям, заданным значением интервала времени, и масштабу изображений вычисляются две компоненты скорости в плоскости светового ножа [39]. Фотоснимок экспериментальной установки и PIV-аппаратуры приведен на рисунке 2.4.

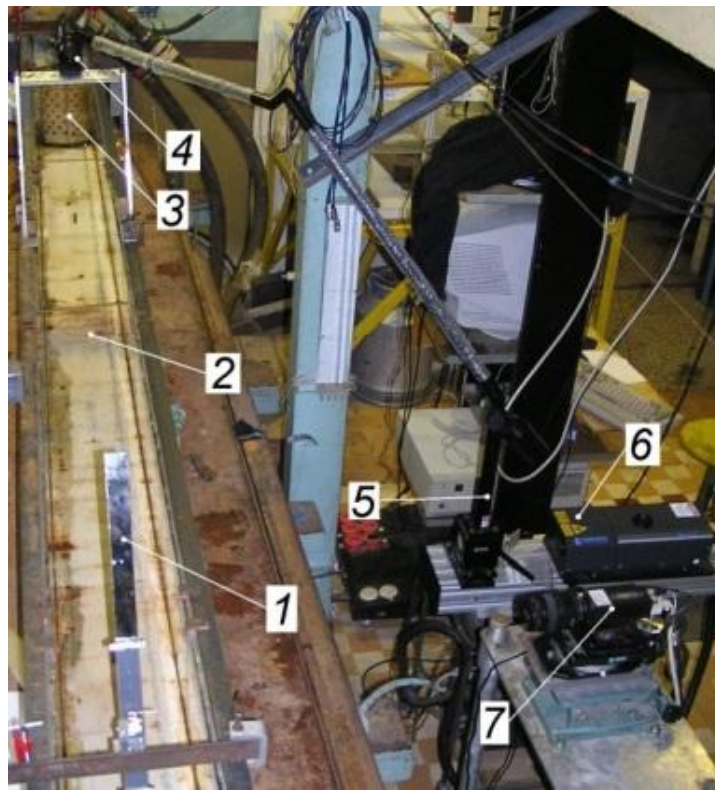


Рисунок 2.4 – Фотоснимок экспериментальной установки [30]:

- 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

В результате экспериментов были построены графики, координаты которых представлены в безразмерной форме. Для перехода к безразмерным величинам использовались характерные масштабы глубины (h) и скорости (U)

- безразмерная ширина

$$B^0 = \frac{B}{h}, \quad (2.17)$$

- безразмерный диаметр

$$D^0 = \frac{D}{h}, \quad (2.18)$$

- безразмерное расстояние от дна до оси цилиндра

$$z_0^0 = \frac{z_0}{h}, \quad (2.19)$$

- безразмерные касательные напряжения

$$\tau_w^0 = \frac{2\tau_w}{\rho U^2} = \frac{2}{Re} \left. \frac{du^0}{dz^0} \right|_{z^0=0}, \quad (2.20)$$

- безразмерная продольная компонента скорости

$$u^0 = \langle u \rangle / U, \quad (2.21)$$

где $\langle u \rangle$ - продольная компонента осредненной скорости

- безразмерная вертикальная компонента скорости

$$w^0 = \langle w \rangle / U, \quad (2.22)$$

где $\langle w \rangle$ - вертикальная компонента осредненной скорости

- безразмерные координаты

$$z^0 = \frac{z}{h}, \quad (2.23)$$

$$x^0 = \frac{x}{h}. \quad (2.24)$$

На рисунке 2.5 показаны профили продольной компоненты скорости $u^0(z^0)$ в поперечном сечении канала $x^0 = 0$ для четырех серий эксперимента при средней скорости $U = 0,17$ м/с.

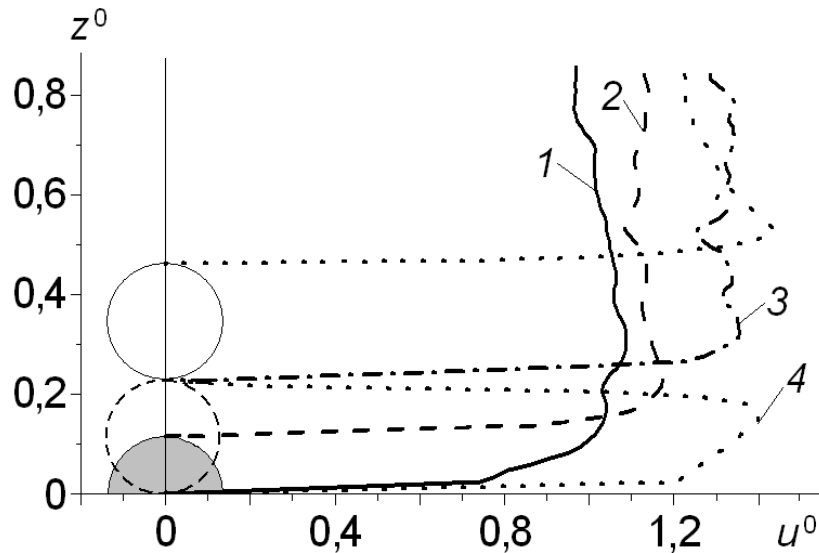


Рисунок 2.5 – Результаты экспериментов [69]. Профили продольной компоненты скорости u^0 : 1 – цилиндр отсутствует; 2 – $z_0 = 0$; 3 – $z_0 = 0,5D$; 4 – $z_0 = 1,5D$

При сравнении двух случаев, когда цилиндра нет и когда цилиндр имеется (расстояние от дна до цилиндра составляет величину его диаметра), авторы [39] сделали вывод, что наличие цилиндра сказывается на величине скорости, она увеличивается [39].

В работе [39] отмечается, что существенное влияние на процесс размыва оказывают касательные напряжения на дне канала. Величина касательных напряжений на стенке больше при наличии цилиндра, по сравнению со случаем, когда цилиндр отсутствовал.

По результатам авторами [39] выполненных экспериментов были получены профили продольной $u^0(z^0)$ и вертикальной $w^0(z^0)$ компонент осредненной скорости при различных сочетаниях заданных параметров. На рисунках 2.6 – 2.8 представлены графики изменения профилей продольной $u^0(z^0)$ и вертикальной $w^0(z^0)$ компонент осредненной скорости при средней скорости потока $U = 0,17$ м/с. На каждом отдельном рисунке приведены профили $u^0(z^0)$ и $w^0(z^0)$ в семи поперечных сечениях потока (x^0 : 0,35; 0,23; 0,175; 0; -0,175; -0,23 и -0,35). Положительные значения x^0 соответствуют поперечным сечениям, расположенным за цилиндром, отрицательные значения x^0 – поперечным сечениям перед цилиндром. Значение

$x^0 = 0$ соответствует поперечному сечению потока, проходящему через ось цилиндра.

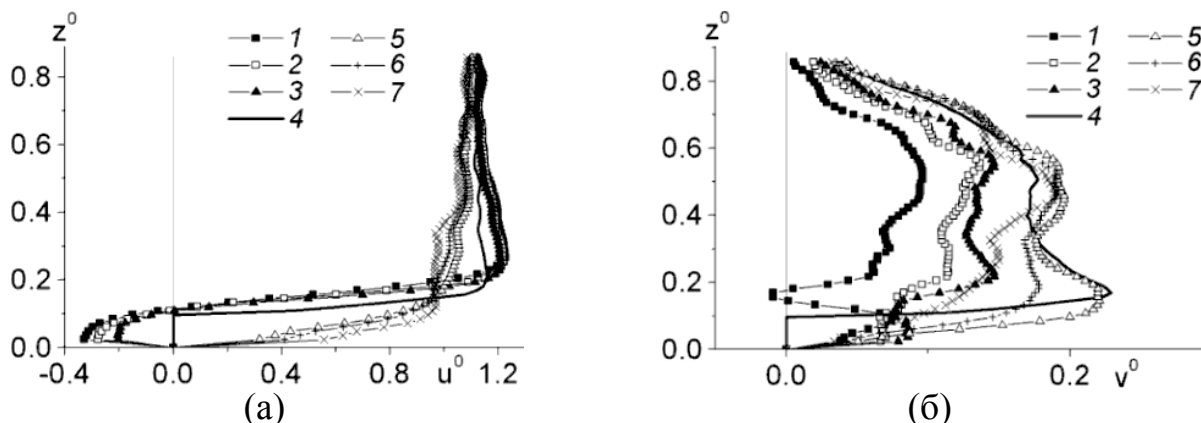


Рисунок 2.6 – Результаты экспериментов [30]. Профили продольной u^0 (а) и вертикальной w^0 (б) компонент скорости, когда цилиндр возвышается над дном канала на половину своего диаметра: 1 – $x^0 = 0,35$; 2 – $x^0 = 0,23$; 3 – $x^0 = 0,175$; 4 – $x^0 = 0$; 5 – $x^0 = 0,175$; 6 – $x^0 = -0,23$; 7 – $x^0 = -0,35$

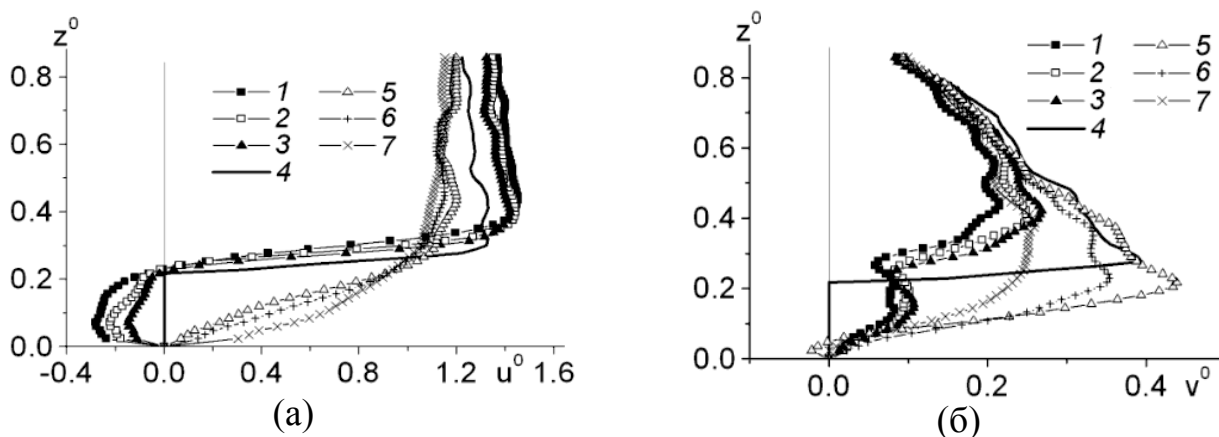


Рисунок 2.7 – Результаты экспериментов [30]. Профили продольной u^0 (а) и вертикальной w^0 (б) компонент скорости, когда цилиндр лежит на дне канала: 1 – $x^0 = 0,35$; 2 – $x^0 = 0,23$; 3 – $x^0 = 0,175$; 4 – $x^0 = 0$; 5 – $x^0 = 0,175$; 6 – $x^0 = -0,23$; 7 – $x^0 = -0,35$

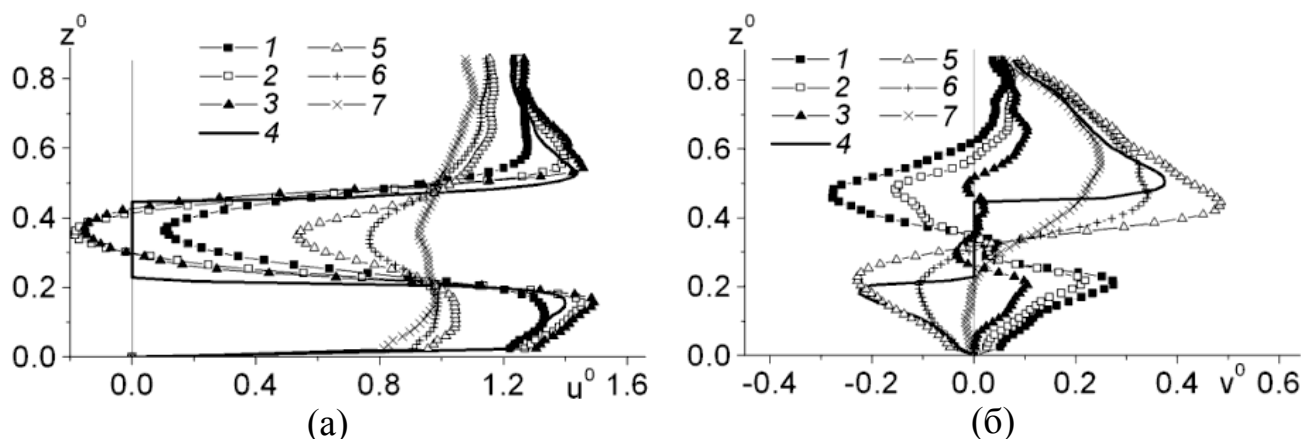


Рисунок 2.8 – Результаты экспериментов [30]. Профили продольной u^0 (а) и вертикальной w^0 (б) компонент скорости, когда под цилиндром имеется зазор, равный его диаметру: 1 – $x^0 = 0,35$; 2 – $x^0 = 0,23$; 3 – $x^0 = 0,175$; 4 – $x^0 = 0$; 5 – $x^0 = 0,175$; 6 – $x^0 = -0,23$; 7 – $x^0 = -0,35$

По результатам экспериментов, авторами [39] были сделаны следующие выводы:

- при наличии цилиндра скоростная структура существенно изменяется;
- при наличии цилиндра появляется вертикальная компонента скорости, которая в свою очередь способствует появлению на свободной поверхности волн;

Все перечисленные изменения в скоростной структуре потока необходимо учитывать при анализе процесса деформации размываемого дна. Особенно это было выявлено в экспериментах, когда между цилиндром и дном имелся зазор [39].

2.3 Исследования размыва дна на участке расположения цилиндра на песчаном дне лотка

В работах [14, 36, 39, 40, 43, 57] опубликованы результаты исследования местного размыва в створе расположения магистральных подводных трубопроводов. Эти исследования позволили, возникающие размывы возле трубопроводов, разделить на разные типы, а также выявить факторы, которые влияют на размыв донного грунта, и описать процесс переноса донных отложений.

В лабораторных условиях Ю.Д. Пережогиным [57] был проведен эксперимент по изучению местного размыва при двух режимах взаимодействия набегающего потока и песчаного основания. В качестве характеристики устойчивости песчаного основания к размыву использовались величины неразмывающей скорости. Первый режим, когда отсутствуют естественные деформации дна, обусловленный перемещением наносов, а местный размыв определяется только наличием трубопровода и второй режим - на местный размыв дна в зоне трубопровода накладывается общий размыв, обусловленный транспортом наносов [57].

Опыты проводились в прямоугольной лотке, на дно которой был уложен песок со средним диаметром частиц 0,38 мм. Для имитации трубопровода использовался отрезок пластмассовой трубы диаметром $d = 20$ мм. В проведенных опытах гидравлических параметров потока были следующие: расход $Q = 4,5 - 22,5$ м³/ч; глубина $H = 0,035 - 0,06$ м; скорость $V = 0,18 - 0,53$ м/с; число Рейнольдса $Re = 19600-98930$; $H/d=1,75-3,0$ [57]. По результатам выполненных экспериментов были получены следующие параметры воронки размыва: глубина воронки размыва (L_p), ширина воронки размыва (h_p) и отношения $\frac{h_p}{d}$, $\frac{h_p}{L_p}$.

Анализируя полученные параметры, автор сделал следующие выводы:

- 1) при увеличении средней скорости течения параметры воронки размыва возрастают независимо от того, заглубляется трубопровод или нет;
- 2) при заглублении трубопровода на половину его диаметра величина вычисленных значений существенно меньше.

Выводы, которые получил Ю.Д. Пережогин подтвердили ранее установленный Б.М. Кукушкиным [47] и И.С. Румянцевым [61] факт, что размыв дна в зоне незаглубленного трубопровода происходит при скоростях течения существенно меньших неразмывающих [57].

Пережогин Ю.Д. отмечает, что размыв дна под трубопроводом вызван фильтрацией воды. А фильтрация в свою очередь возникает из-за перепада давлений на верховой и низовой сторонах трубопровода. Фильтрация воды под трубо-

проводом вызывает взвешивание частиц грунта при некотором критическом значении градиента давления и последующее их вымывание [21].

Возникновение размыва дна с боковых сторон полузаглубленного трубопровода автор связывает с возникновением вихревой области.

В статье [18] опубликованы результаты измерений скоростей течения жидкости в придонной области потока и по глубине подстилающего потока среднезернистого песка. На основании выполненных исследований автор пришел к выводу, что основными причинами, вызывающими течения жидкости в песчаном основании (фильтрации) являются: касательное напряжение, передаваемое от потока по продольным и вертикальным порам песка; локальным перепадам давления между лобовой и тыльной сторонами частиц грунта, обтекаемых потоком придонной области. Автор указывает, что одной из причин, способствующих размыву грунта является то, что в несвязном грунте скорость невелика, а проникающие в него пульсации быстро затухают, и они приводят к изменению характера взаимодействия потока с грунтом [21].

Критические состояния начала размыва были рассмотрены в [94], где изучена роль вихрей впереди позади трубы. Автор Мао также изучил просачивание потока в грунте под трубой в аспекте появления размыва [21]. Эта работа дала некоторое понимание физики процесса размыва, но точное воздействие градиента давления на поведение жидкости и русловых наносов под трубой не было полностью выяснено.

Изучение критического состояния, определяющего начало размыва, проведено в [103, 104] с точки зрения комбинации двух параметров – числа Кейлегана-Карпентера (Keulegan-Carpenter) KC и отношения погруженной части трубы к диаметру: $\xi = \frac{e_{cyl}}{d_{cyl}}$. Рассмотрен достаточно общий случай, который имеет практическое значение при изучении устойчивости дна в местах прокладки трубопровода и кабелей на речном дне.

Эксперименты с течением проводились в открытом канале. Геометрические параметры канала следующие: ширина 2 м, глубина 0,5 м и длина 23 м. Глубина

воды поддерживалась и составляла 0,30 м. В канале была установлена секция со слоем песка. Длина секции составляла 5,8 м, а толщина 0,10 м и длиной 5,5 м, на которой располагалась труба диаметром $D = 10$ см. Труба была погружена в грунт на глубину $e = 0,64$ см. Диаметр частиц песка составлял 0,18 мм [21]. Визуализация экспериментов выполнялась PIV-методом. В качестве определяющих параметров использовались безразмерные числа:

- Параметр Шилдса (безразмерное касательное напряжение)

$$\theta = \frac{U_f^2}{g(s-1)d_{50}} \quad (2.25)$$

где U_f – скорость трения, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$ – относительная плотность наносов;

ρ_s – плотность наносов, кг/м³;

ρ_w – плотность воды, кг/м³;

$d_{50} = 0,18$ мм – диаметр частиц песка.

- Число Рейнольдса

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2.26)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости воды м²/с;

U – скорость потока, м/с;

$D = 0,1$ м – диаметр трубы.

Проведенные эксперименты отвечали условиям подвижного дна $\theta > \theta_{cr}$, где θ_{cr} – критическое значение параметра Шилдса, при котором частицы донного грунта выходят из состояния покоя и начинается их движение [108].

По результатам исследования авторы [103] выявили, что причиной размыва песка под трубой является разница давления на напорной и тыловой поверхностях [21]. На рисунке 2.9 показано изменение градиента давления $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\gamma} \right)$ под трубой во времени и при достижении его значения $(1 - n)(s - 1)$ происходит прорыв песка под трубой.



Рисунок 2.9 – Результаты экспериментов [103]. Изменение градиента давления под трубой во времени

Авторы [103] выделили две стадии процесса размыва (рисунок 2.10).

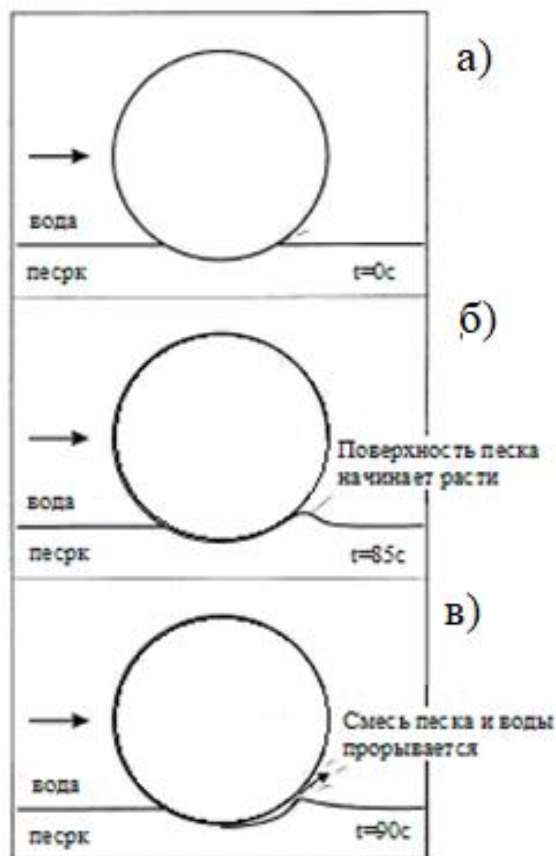


Рисунок 2.10 - Этапы процесса размыва дна под трубой [103]

На первой стадии происходит увеличение градиента давления и повышение поверхности песка за трубой (рисунок 2.10б). На второй стадии происходит прорыв смеси песка и воды под трубой [21] (рисунок 2.10в). Впоследствии, частицы

песка интенсивно выносятся потоком, и прорыв развивается. Процесс будет зависеть от пористости, внутреннего трения,

В качестве дополнительного механизма, способствующего появлению размыва, авторы указали наличие вихревых структур в непосредственной близости от трубы. Установлены критерии появления размыва, основанные на значениях параметра Шилдса, вычисляемого по величине касательных напряжений [21].

2.4 Численное моделирование размыва на участке трубопроводов

В сотрудничестве ученых В.А. Шлычкова и В.В. Дегтярева, представляющие соответственно Институт водных и экологических проблем СО РАН и Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), была предложена модель русловых деформаций в области расположения подводного трубопровода [40].

В работе [40] было выдвинуто предположение, что среднее течение незначительно меняется вдоль трубопровода, а сам подводный переход располагается перпендикулярно к потоку. С учетом этих условий для расчета параметров течения было принято решение использовать двумерную продольно-вертикальную модель. При расположении оси x по водотоку вниз, а оси z – вертикально вверх гидростатическое уравнение движения и неразрывности для описания турбулентного течения в реке будет иметь вид [72]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial w}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (2.27)$$

где u, w - горизонтальный и вертикальный компоненты вектора скорости;

ρ_w - плотность воды;

K_x, K_z - коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена;

p - отклонение давления от гидростатического;

$z = \zeta(x, t)$ - зависимость, которая определяет форму свободной поверхности.

Обозначив $z = z_b(x)$ – уравнение поверхности дна были записаны следующие краевые условия для системы (2.27).

На дне было задано условие

$$K_z \frac{\partial u}{\partial z} = c_d |u| u, \quad w = \frac{\partial z_b}{\partial x} u \quad \text{при } z = z_b \quad (2.28)$$

где c_d - коэффициент сопротивления.

Краевые условия имеют вид

$$K_z \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} = w \quad p = 0 \quad \text{при } z = \zeta \quad (2.29)$$

Учитывая все вышеизложенное, авторы работы [40] рассматривали случай течения в русле, когда под трубопроводом уже сформировался начальный размыв и точек соприкосновения висящей трубы с донным грунтом не имеется. Расчет турбулентного обмена проводился на основании двухпараметрической модели, содержащей уравнение баланса кинетической энергии турбулентности и уравнения для скорости ее диссипации.

Задача в базовой постановке решалась на ограниченном участке реки. Горизонтальный размер области интегрирования был задан так, чтобы исключить влияние боковых границ на внутренние параметры течения. В (2.27) можно пренебречь горизонтальными вариациями искомых полей и рассмотреть стационарную и одномерную по z задачу при $w = 0$, позиционируя уравнения на входном створе, так как при задании боковых краевых условий на входном створе предполагалось отсутствие значимой неоднородности течения. Полученный профиль продольной скорости и служил граничным режимом для системы (2.27). На выходе ставились условия свободного выхода возмущений.

Уравнения переноса тяжелых фракций аллювия в воде были сформулированы в рамках модели, описывающей динамику двумерного x, z -потока. Уравнение переноса концентрации было получено из общего уравнения переноса и турбулентной диффузии примеси [33]

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial wc}{\partial z} - w_g \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right), \quad (2.30)$$

где w_g - гидравлическая крупность наносов.

Совместно с (2.30) было рассмотрено уравнение для донных деформаций с учетом механизма диффузного размыва

$$(1 - \pi_b) \frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_b \frac{\partial z_b}{\partial x} + R_b, \quad (2.31)$$

где π_b - пористость;

D_b - коэффициент диффузии, учитывающий размыв подводных склонов за счет неколлинеарности векторов скорости и расходов наносов [51];

R_b - источниковое слагаемое, описывающие изменение массы аллювия за счет взмыва и осаждения частиц.

Для замыкания задачи авторы [40] вывели соотношение для расчета R_b в (2.31), чтобы это сделать уравнение (2.26) записали в терминах потоков

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{c}{\rho_s} \right) + \frac{1}{\rho_s} \left(\frac{\partial P_x}{\partial x} + \frac{\partial P_z}{\partial z} \right) = 0, \quad (2.32)$$

где P_x, P_z – потоки твердой субстанции в направлениях x и z .

$$P_x = uc - K_x \frac{\partial c}{\partial x}, \quad P_z = (w - w_g)c - K_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2.33)$$

После интегрирования (2.28) было получено следующее выражение

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \langle P_x \rangle}{\partial x} + \left(\frac{w_g c|_{z=z_b}}{\rho_s} - N_0 \right) = 0, \quad (2.34)$$

где h_s - слой наносов в столбе воды единичной площади;

N_0 - заданный поток массы на дне.

Способ расчета N_0 определяется в виде функции загрузки

$$N_0 = 0,00033 \cdot \left(\frac{\theta - \theta_{cr}}{\theta_{cr}} \right) \cdot \sqrt{(s-1)gd} \left(\frac{(s-1)gd^3}{\nu^2} \right)^{0,1}, \quad (2.35)$$

где d - размер частиц наносов (обычно используется $d = d_{50}$).

Первое слагаемое в круглой скобке (2.34) описывает процесс оседания взвеси на дно под действием силы тяжести, а второе – интенсивность взмучивания наносов за счет касательных напряжений. Компоненты массообмена с таким же физическим содержанием предусмотрены в слагаемом R_b гидравлической модели (2.31). Поэтому было принято, что

$$R_b = \frac{w_g c|_{z=z_b}}{\rho_s} - N_0, \quad (2.36)$$

Методика решения базовых уравнений модели [40] основана на методе конечных объемов построения конечно-разностных сеток с криволинейными боксами, адаптированных к положению цилиндра относительно донной поверхности. При численном решении задачи применялись неявные алгоритмы с использованием консервативных схем. Конечно-разностные аналоги численной модели получены из энергетических соотношений и обеспечивают сохранение суммарной массы жидкости в каждый момент времени, а также баланс кинетической и потенциальной энергии.

Саморегулирование системы «поток-русло» заключается в том, что под влиянием течения происходит перераспределение донных наносов, в результате чего постепенно меняется морфометрия дна. Поток адаптируется к изменившимся условиям путем перестройки поля скорости. Этот процесс, в свою очередь, влечет перемещение донных наносов по руслу и вблизи трубы, что вновь влияет на кинематическую структуру водотока и т.д. Отсюда следует, что для решения задачи размыва трубопровода необходимо совместное интегрирование системы гидродинамики (2.27) и уравнений для донных деформаций (2.30), (2.31).

С учетом полученных уравнений в работе [40] ставилась задача прогнозирования изменения рельефа дна во времени при фиксированном положении трубы, для этого был рассмотрен речной поток со средней скоростью 1 м/с и глуби-

ной 5 м. Диаметр трубы принимался равным 1 м, под трубой имелся размыв глубиной 0,5 м, который был задан в начальной геометрии донного профиля $z_b(x)$.

В ходе численных экспериментов было получено расчетные поля скорости, свободной поверхности и донного рельефа (рисунок 2.11)

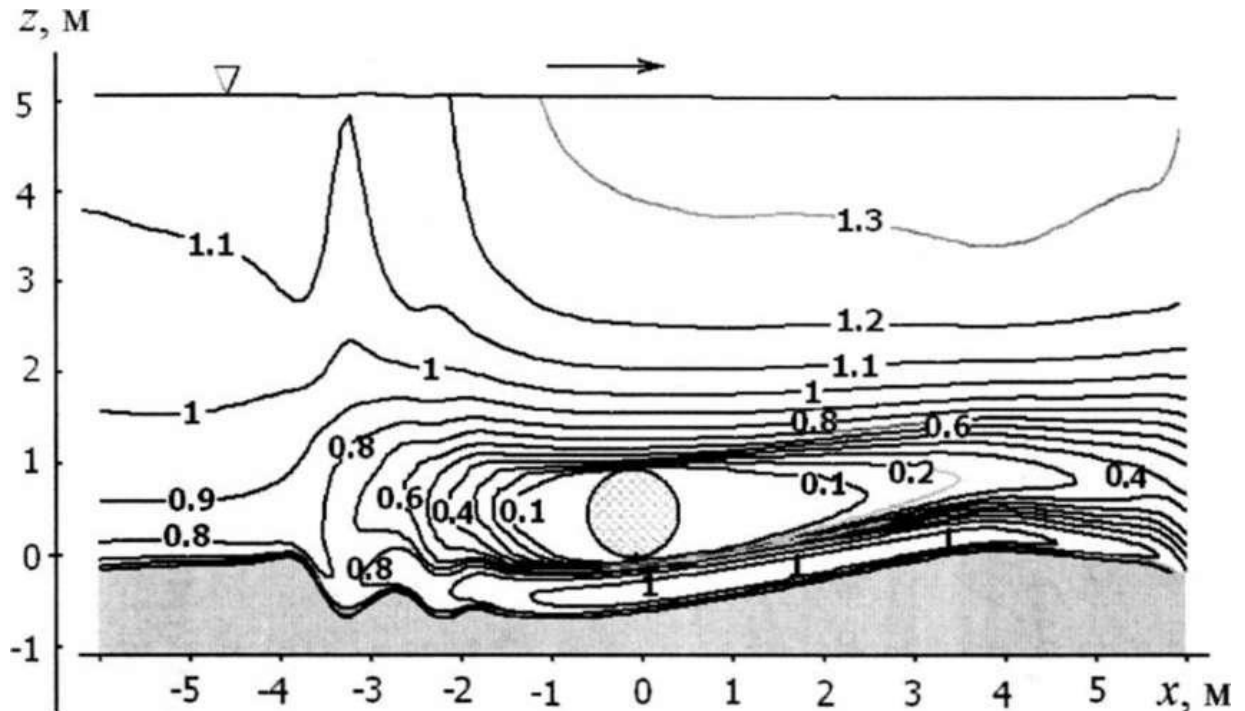


Рисунок 2.11 – Изолинии поля продольной скорости u (м/с) и расчетная геометрия рельефа, полученная в численном эксперименте к моменту $t = 120$ мин [40]

В зоне размыва под трубой авторами [40] было отмечено усиление скорости до значений, превышающих 1 м/с. Это приводит к увеличению донных касательных напряжений, захвату наносов и их выносу в тыльную часть потока, где придонная скорость снижается, что обуславливает выпадение наносов из потока и их аккумуляцию в виде песчаного бара позади трубы.

Анализ полного вертикального потока наносов P_z показал, что его форма и амплитуда меняются со временем, но качественно поток сохраняет важную особенность: вверх по течению перед трубой всегда имеется участок взмучивания ($P_z > 0$), где развивается эрозия дна. Формирование эрозии связано с ускорением течения при его подныривании под трубу. Так возникает процесс размыва, прогрессирующий в направлении против потока. Этот результат авторами [40] был интерпретирован как увеличение зоны начального размыва и диагностировать ру-

словый режим как неустойчивый. Со временем P_z приобретает флуктуирующий характер, появляются области аккумуляции наносов, так что размывы перед трубой чередуются с областями заиления, а донный рельеф динамически принимает форму, показанную на рисунке 2.11.

Численное моделирование процесса размыва под трубопроводами условно можно разделить на две категории: модели теории потенциального потока и модель турбулентного потока.

Исследование с использованием моделей потенциального потока было выполнено авторами [83]. Однако проделанная ими работа может дать только оценку возможной глубины размыва, потому что при построении их модели было сделано слишком много допущений. Позже Ли и Ченг [92] разработали относительно простую двумерную численную модель, основанной на теории потенциального потока. В модели использовался метод конечных разностей для решения уравнения Лапласа в терминах потенциала скоростей в криволинейной системе координат. Профиль размыва был получен с помощью итеративной процедуры до тех пор, пока равновесное напряжение сдвига морского дна не сравняется с критическим напряжением сдвига отложений. Преимущество этой модели в том, что для оценки глубины размыва не требуется вводить дополнительно эмпирических формул. Однако он не смог дать правильного прогноза для нижней части размыва, поскольку сама теория потенциального потока не может моделировать процесс схода вихрей и, следовательно, не может учитывать эрозию подветренного следа. Чтобы решить эту проблему, Ли и Ченг [86] расширили и подтвердили модель размыва, добавив влияние вихреобразования на напряжение сдвига пласта. Однако разработанные Ли и Ченгом модели, не могут описать развитие размыва во времени.

Авторы работы [89] смоделировали размыв вблизи трубопровода на основе модели турбулентности $k-\omega$ и уравнения переноса для концентрации наносов. Однако уравнение переноса наносов включает только перенос донных наносов и не учитывает взвешенные наносы. В дальнейшем коллектив авторов [107] расширили модель и учли влияние взвешенных наносов. Ими было отмечено, что с помо-

щью их модели можно достаточно точно описать размеры воронки размыва, но скорость эрозии была намного выше по сравнению с результатами, полученными [88]. Позже Брорс [78] развил уравнение переноса взвешенных отложений, используя метод конечных элементов Тейлора-Галеркина. Результаты моделирования процесса размыва сравнивались с профилями, измеренными Мао [94], выявлено общее согласие результатов. Ченг и Ли [91] предложили двумерную численную модель для имитации локальной глубины размыва с учетом провисания трубопровода. Поток жидкости рассчитывается путем решения уравнения Навье-Стокса с пространственной фильтрацией.

ГЛАВА 3. ДИНАМИКА РАЗМЫВА ДНА В ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

3.1 Экспериментальная установка

Физические эксперименты по изучению процесса размыва дна на участке расположения подводных трубопроводов были проведены на базе лаборатории гидравлики кафедры Гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин).

Экспериментальная установка представляет собой лоток прямоугольной формы поперечного сечения шириной 0,1 м, длиной 1,3 м и высотой 0,19 (рисунок 3.1). Глубина воды поддерживалась 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. Также в экспериментах использовался цилиндр (диаметр 0,025 м), который имитировал трубопровод. Цилиндр жестко закреплялся на боковых стенках лотка [37].

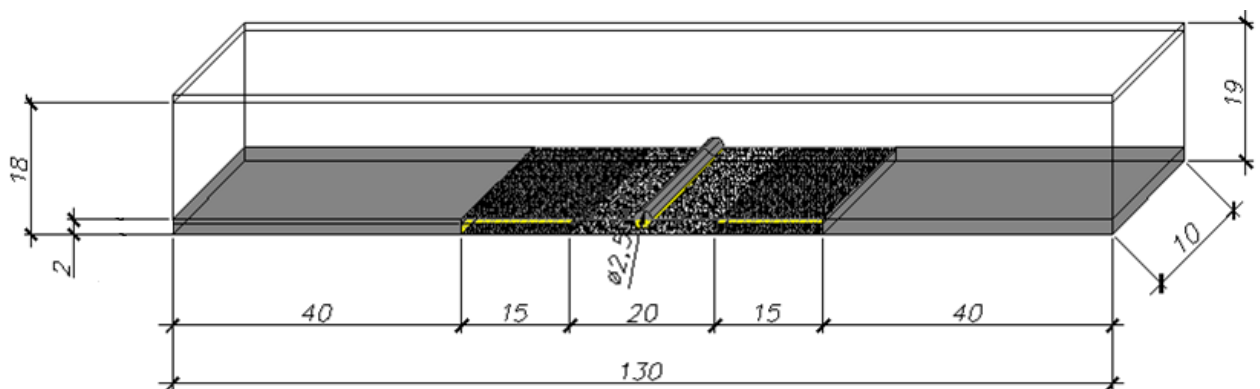


Рисунок 3.1 – Модель экспериментального лотка

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 $2D$ (рисунок 3.2).

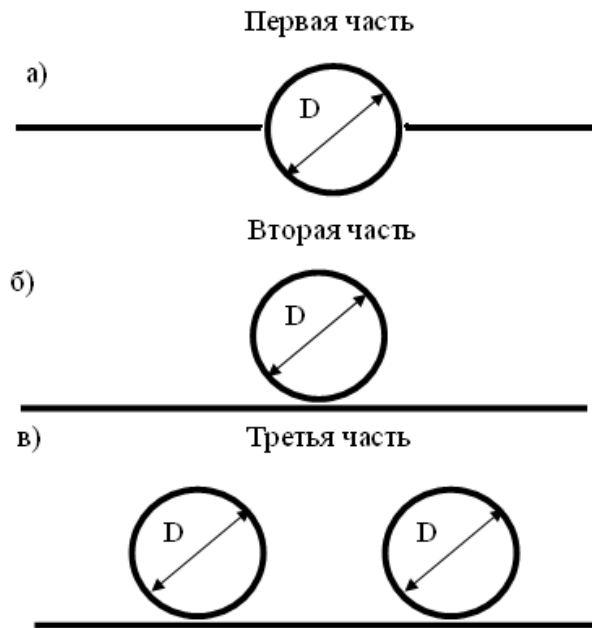


Рисунок 3.2 – Схемы проведенных экспериментов: а) заглублиение цилиндра на $1/2D$; б) цилиндр на поверхности дна; в) на поверхности лежит два цилиндра.

D – диаметр цилиндра ($D = 0,025$ м)

3.2 Эксперимент № 1. Цилиндр заглублиен в песок на $1/2D$

В случае когда, цилиндр заглублиен в песок на $1/2D$, уже через 15 минут от начала эксперимента наблюдается появление ленточных гряд перед цилиндром (рисунок 3.3).

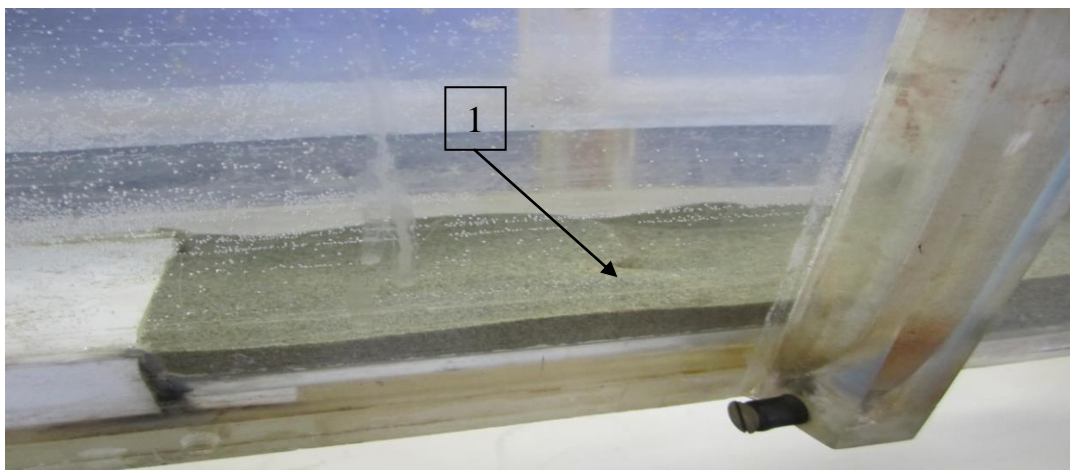


Рисунок 3.3 –Появление донных гряд перед цилиндром ($t = 15$ мин); 1 – ленточная гряда

Через 30 минут после начала эксперимента наблюдается более интенсивное образование ленточных гряд и начало размыва песка с тыльной стороны цилиндра (рисунок 3.4).

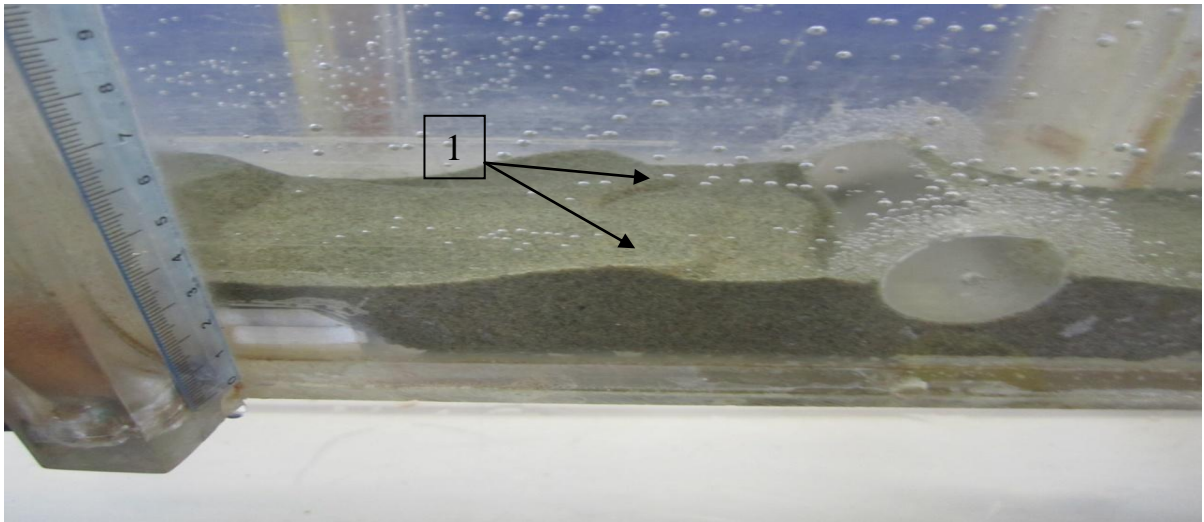


Рисунок 3.4 – Ленточные гряды (1) перед цилиндром ($t = 30$ мин)

В течении 60 минут происходит интенсивный намыв гряд, высотой 2 – 3 см и песок постепенно передвигается ближе к цилиндру (рисунок 3.5).

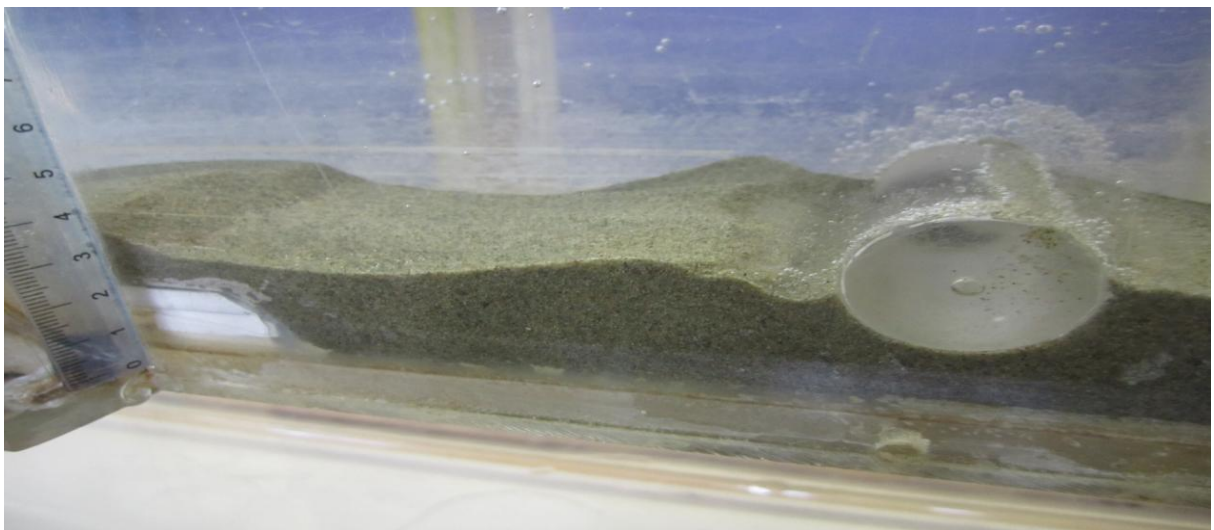


Рисунок 3.5 – Смещение песка к цилиндру ($t = 60$ мин)

Через 2 часа начинается подмыв цилиндра с напорной стороны, который со временем разрастался в стороны (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Подмыв цилиндра с напорной стороны ($t = 120$ мин)

Постепенно песок смещался к цилиндру, образуя вместо нескольких маленьких гряд (длиной 3 - 4 см), одну большую (15 см). За цилиндром также образовались небольшие гряды, длиной 3 - 4 см, которые затем увеличивались. Движение частиц наблюдается как вдоль потока, так и в вертикальном направлении (завихрения) (рисунок 3.7).

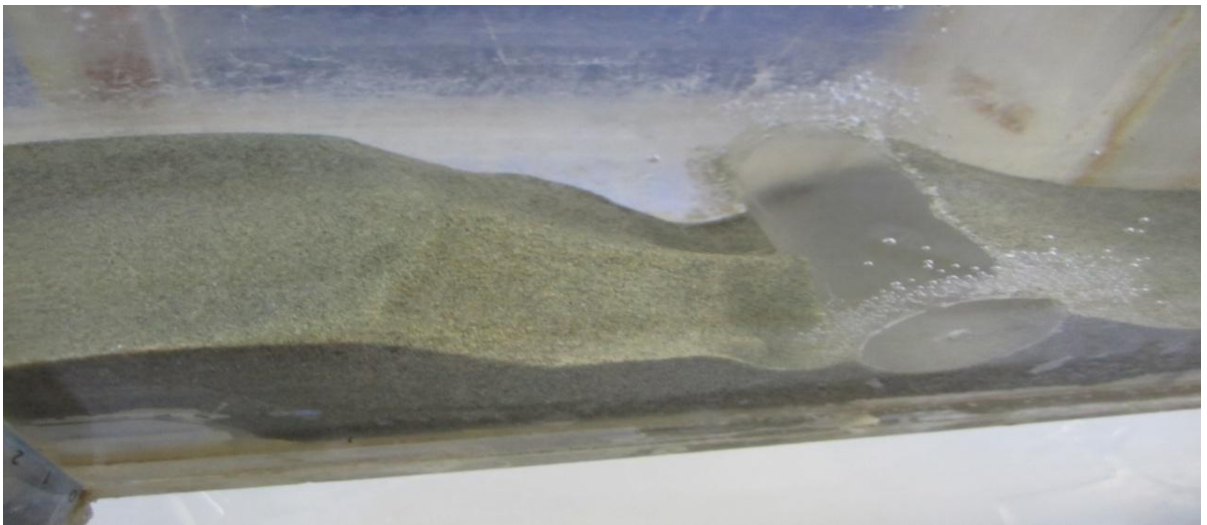


Рисунок 3.7 – Подмыв цилиндра ($t = 150$ мин)

Как только вершина гряды достигла цилиндра, процесс замедлился, песок постепенно перемещался в сторону тыловой части, засыпая образовавшийся подмыв около цилиндра (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Намыв песка над цилиндром ($t = 180$ мин)

Через 240 минут от начала эксперимента с одной стороны песок полностью засыпал цилиндр, а с другой стороны, наоборот образовался размыв (рисунок 3.9).

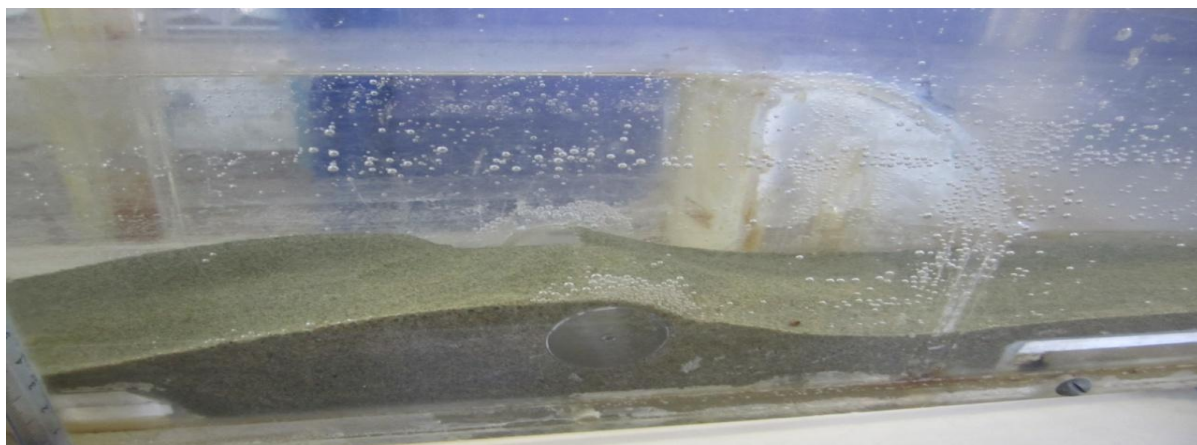


Рисунок 3.9 – Гряда засыпала цилиндр ($t = 240$ мин)

Время, потраченное на прохождение гряды через цилиндр, составляет в среднем около 5,5 часов (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Гряда полностью засыпала цилиндр ($t = 330$ мин)

После этого процесс ускоряется, начинается более интенсивный подмыв цилиндра с напорной стороны (спустя 6 часов) (рисунок 3.11).

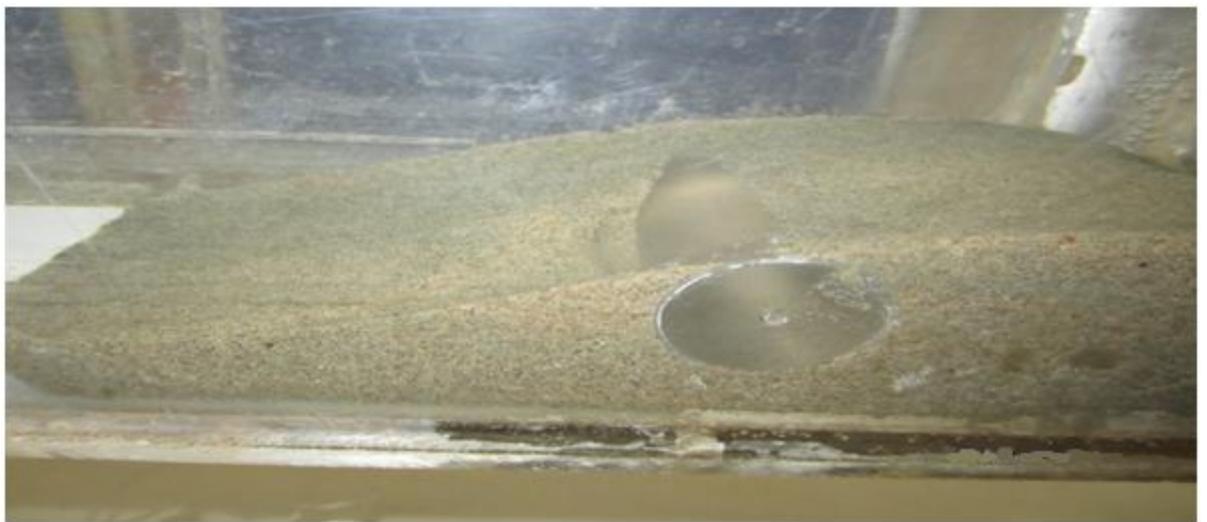


Рисунок 3.11 – Подмыв цилиндра с напорной стороны ($t = 360$ мин)

Процесс подмыва цилиндра начинается с одной стороны, постепенно углубляясь под цилиндр и расширяясь в стороны (рисунок 3.12).

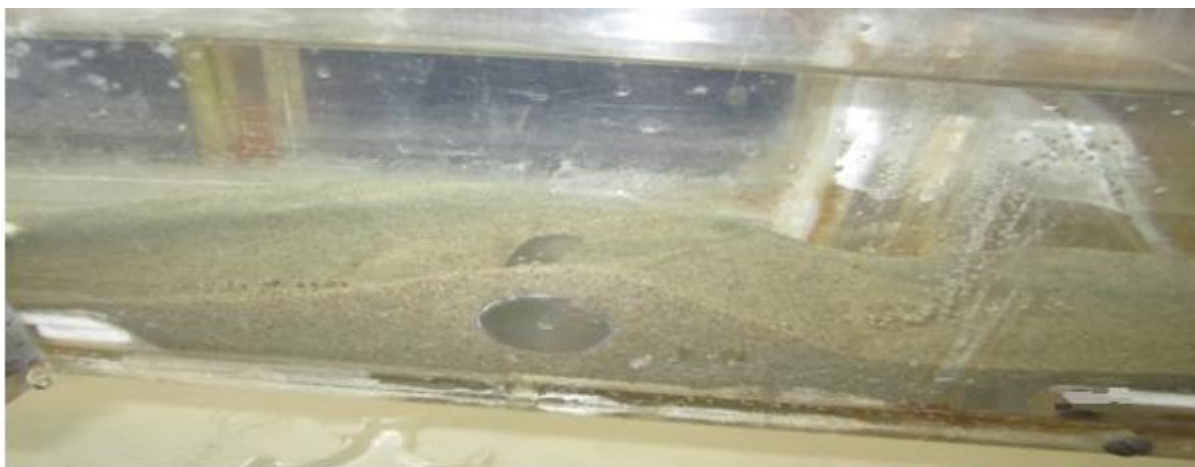


Рисунок 3.12 – Подмыв цилиндра ($t = 420$ мин)

Через 600 минут после начала эксперимента с одной стороны цилиндр оголился, с напорной стороны образовалась большая гряда высотой 7 см (рисунок 3.13).

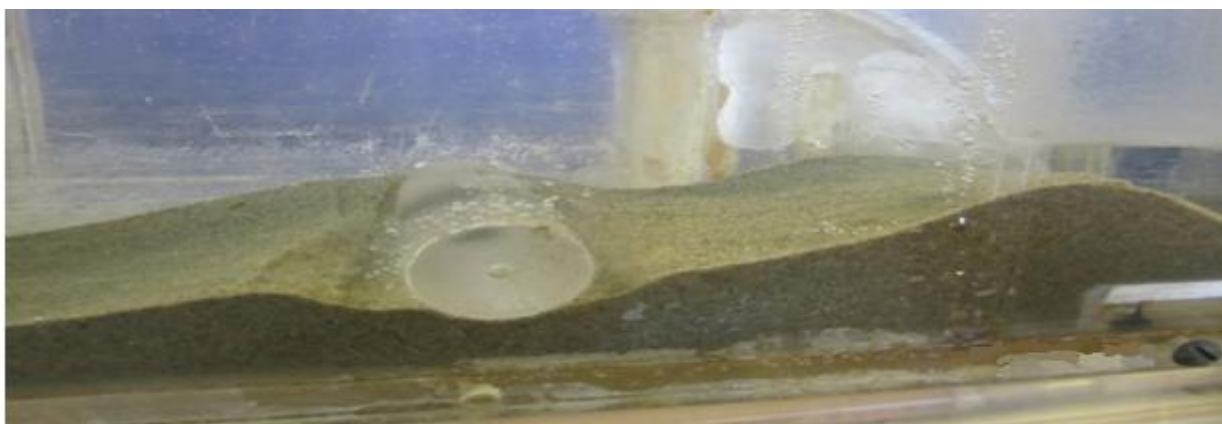


Рисунок 3.13 – Оголенный цилиндр ($t = 600$ мин)

За трубой с тыловой стороны так же образовались гряды, через 6 часов, длиной от 15 до 6 см (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Гряды с тыловой стороны ($t = 700$ мин)

Сквозная полость (3 – 4 см, т.е. более чем на величину диаметра) под цилиндром образовалась через 13 часов (рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 – Образование сквозной полости под цилиндром ($t = 780$ мин)

Характерный размер углубления близок к диаметру цилиндра, что указывает на турбулентную природу образования размыва, связанную с развитием крупных вихрей. На первую часть эксперимента ушло 13,5 часов. Условно процесс можно разделить на две части: до прохождения грядой цилиндра и после. Первая часть составила по времени 5,5 часов, вторая – 7,5 часов. Подмыв сначала наблюдался с одной стороны цилиндра и постепенно развивался, превращаясь в сквозную полость.

3.3 Эксперимент № 2. Цилиндр на поверхности песка

Данный опыт проводился 3 раза. Уровень воды поддерживался постоянным благодаря системе регулирования расхода.

Размыв произошел в течении 15 минут. Для намыва песка на цилиндр понадобилось 20 минут с момента проведения опыта.

На рисунках 3.16 – 3.19 показан процесс размыва песка в области цилиндра лежащего на поверхности.

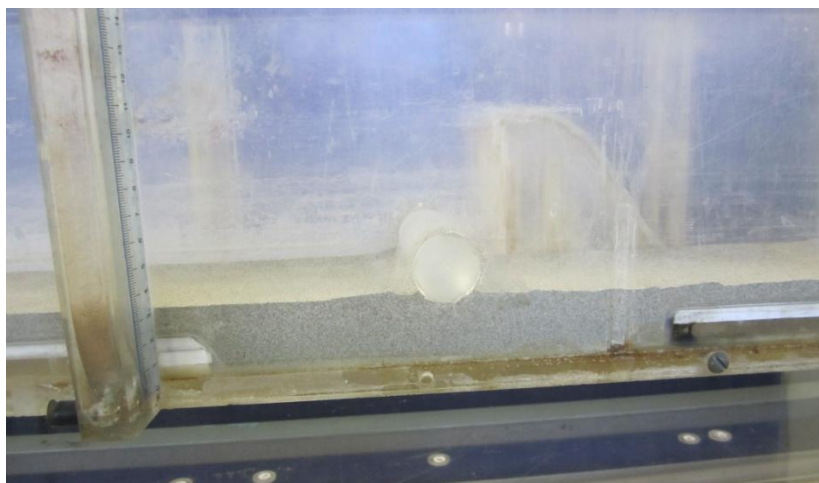


Рисунок 3.16 – Установка до проведения опыта ($t = 0$ мин)

Через 30 минут с начала проведения опыта, происходит размыв песка под цилиндром. Размыв вдоль цилиндра не симметричен.

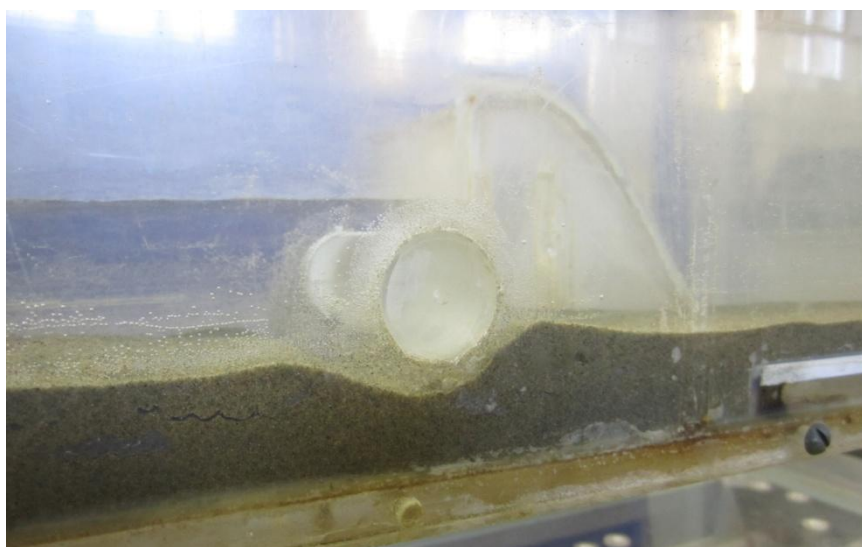


Рисунок 3.17 – Размыв под цилиндром ($t = 30$ мин)

В процессе движения частиц песка со стороны верхнего бьефа образовались две гряды (через 50 мин). Первая гряда, движущаяся в сторону цилиндра, составила семь сантиметров в длину. Вторая гряда была меньше (3 – 4 см), образовалась в результате выброса частиц в обратном направлении из-под цилиндра (рисунок 3.18).



Рисунок 3.18 – Формирование донной гряды ($t = 50$ мин)

Гряда с тыловой стороны двигалась неравномерно, причем верх по течению через три часа после начала эксперимента, вершина гряды полностью достигла цилиндра (рисунок 3.19).



Рисунок 3.19 – Гряда достигла цилиндра ($t = 180$ мин)

Из данного опыта можно сделать вывод, что размыв не симметричен, зависит от скорости потока, а процесс отличается явно трехмерной природой.

3.4 Эксперимент № 3. На поверхности песка лежат два цилиндра

В третьем эксперименте на поверхность песка было уложено два цилиндра.

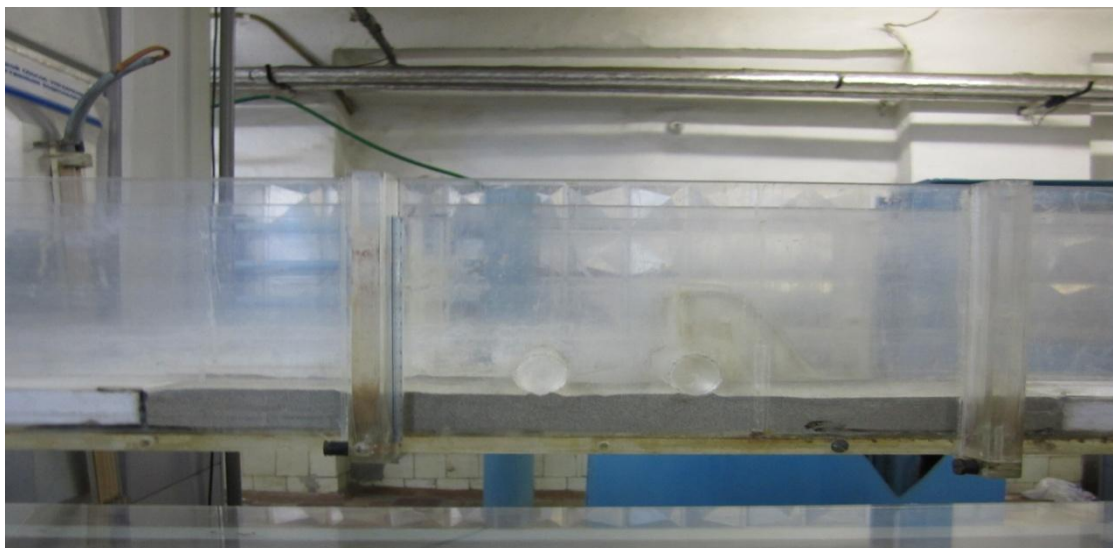


Рисунок 3.20 – Третий эксперимент в начальный момент времени ($t=0$ мин)

Уже через 5 минут после начала эксперимента наблюдается подмыв с напорной стороны цилиндра (рисунок 3.21).

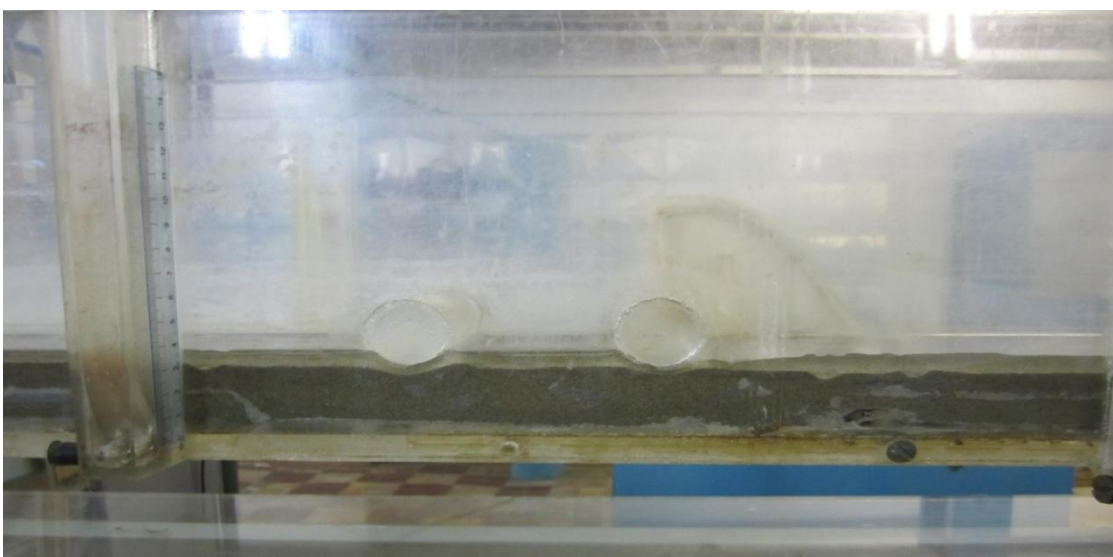


Рисунок 3.21 – Подмыв первого цилиндра ($t=5$ мин)

На десятой минуте видно, что нижняя часть первого цилиндра обнажена, а между первым и вторым цилиндрами образовалась гряда высотой $h=2,5$ см и длиной $l=3$ см, начинается подмыв второго цилиндра (рисунок 3.22). Ярко выраженная разнородная структура поверхности донного рельефа подтверждает общий тезис о

генерации отдельных размывов под цилиндром не синхронно и по всей длине цилиндра, а локально под действием местных мелкомасштабных возмущений [103].

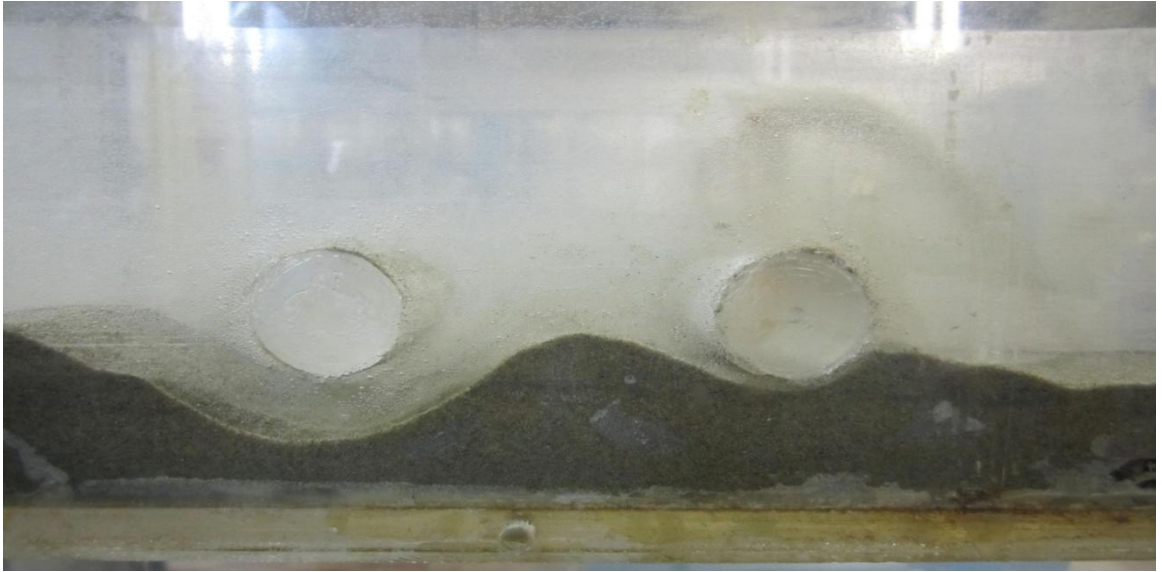


Рисунок 3.22 – Подмыв первого цилиндра, намыв гряды между первым и вторым цилиндрами ($t=10$ мин)

Гряда сместилась ко второму цилиндру (через 15 минут), он заносится с двух сторон. Здесь также наблюдается движение частиц, как вдоль потока, так и в вертикальном направлении, в результате турбулентных вихрей (рисунок 3.23).



Рисунок 3.23 – Смещение гряды ко второму цилиндру ($t=15$ мин)

Второй цилиндр обнажился (через 25 минут), с тыловой стороны образовалась гряда $h=4$ см и $l=5$ см (рисунок 3.24) [37].



Рисунок 3.24 – Размыв под вторым цилиндром и образование гряды ($t=25$ мин)
Через 35 минут после начала эксперимента видно, что дно под цилиндрами практически полностью размывто, гряда с тыловой стороны все увеличивается в размерах (рисунок 3.25).



Рисунок 3.25 – Третья часть эксперимента ($t=35$ мин)

При проведении эксперимента было рассмотрено три варианта расположения цилиндра, имитирующего подводный трубопровод. В итоге выявлено, что интенсивность переформирования подвижного дна зависит как от заглубления цилиндра, так и от их взаимного положения. По результатам экспериментов видно, что при заглублении цилиндра в грунт хотя бы на половину диаметра, процесс

подмыва значительно замедлен во времени [37] по сравнению со второй частью эксперимента, которая длилась существенно меньше – 180 мин.

В реальных условиях возникший размыв может и не развиваться, а может распространяться от места генерации вдоль трубопровода, причем будет иметь место чередование зон размыва и зон недеформированного дна. При активном развитии эрозионных процессов под трубой промежутки недеформированного дна со временем сокращаются, участки подмыва трубопровода увеличиваются и на них сосредотачивается полный вес трубы, что и приводит к аварии.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ ДНА В ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА В ПК ANSYS

В настоящее время существует достаточное количество различных программных комплексов, ориентированных на решение инженерных и научных задач, которые можно разделить на две общие группы: САЕ-системы (Computer-Aided Engineering) и САД-системы (Computer-Aided Design).

САД-системы предназначены для автоматизации процесса проектирования и основная их цель состоит в том, чтобы оптимизировать и повысить эффективность труда проектировщика, а также использовать набор инструментов и технологий для подготовки 3D-моделей и проектных чертежей. К САД-системам относятся такие продукты как Компас, AutoCAD, Revit, SolidWorks,.

САЕ-системы представляют собой программные комплексы, которые предназначены для моделирования и анализа различных физических процессов, таких как процесс разрушения конструкции, тепловое состояние отдельных конструктивных элементов, распределение воздуха в вентиляционных шахтах и т.д. Большинство САЕ-систем основано на методах численного решения дифференциальных уравнений и, в частности, на методе конечных элементов (МКЭ) и методе конечных объемов (МКО). Наиболее известные САЕ-комплексы, позволяющие решать большой круг инженерных задачи проектирования и исследования, – ANSYS, NASTRAN, LS-DYNA, CAE Fidesys Standard и т.д.

В данной главе будут представлены результаты численного моделирования в программном комплексе ANSYS.

В ПК ANSYS заложены различные модули (программные компоненты), в каждой из них реализована необходимая математическая модель, и в зависимости от исследуемых физических процессов пользователь выбирает нужный модуль. В настоящей диссертации в численном моделировании использовался модуль ANSYS Fluent.

ANSYS Fluent – это современный программный комплекс для моделирования течений жидкости и газа (CFD-анализа) в сложных геометрических областях. ANSYS Fluent основан на методе конечных объемов. Количество уравнений в математической модели зависит от физики решаемой задачи. При моделировании турбулентных течений в математическую модель добавляются уравнения для турбулентных параметров, а при моделировании многофазных течений – дополнительные уравнения для концентраций и скоростей фаз.

4.1 Математические модели

Система полных нестационарных уравнений Навье – Стокса, которая включает дифференциальные законы сохранения массы, импульсов и энергии – наиболее общая математическая модель гидромеханики.

В случае трех пространственных переменных движение несжимаемой вязкой жидкости с постоянными свойствами описывается системой уравнений [73]

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4.1)$$

Уравнение движения (Навье-Стокса)

$$\begin{aligned} F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}, \\ F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}, \\ F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где t - время;

x, y, z – пространственные переменные (декартовы координаты);

ρ - плотность;

p - давление;

ν - кинематический коэффициент вязкости;

u, v, w - компоненты скорости в направлениях x, y, z ;

F_x, F_y, F_z – единичные массовые силы.

Для того, чтобы выделить единственное решение, необходимо дополнить уравнения (4.1, 4.2) начальными данными, т.е. значениями, которые искомые (зависимые) величины u, v, w, p , имеют место в начальный момент времени, а также граничными условиями. Задание граничных условий позволяет выделить единственное решение из множества всех решений дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости. Неверно заданные граничные условия не позволяют получить корректное решение задачи. Граничные условия зависят от характера границ, а также от доступной информации. На входной границе, через которую происходит приток массы в расчетную область, как правило, задают скорость или массовый расход жидкости. На выходной границе чаще всего указывают давление. На твердой границе используется условие прилипания частиц жидкости к твердому телу

$$u|_{wall} = v|_{wall} = w|_{wall} = 0.$$

Сложность математических уравнений модели (4.1), (4.2) приводит к необходимости рассматривать различные упрощенные решения.

Частный случай уравнений (4.1), (4.2) – уравнения мелкой воды, которые описывают движение жидкости со свободной поверхностью [67]. Они выводятся путем осреднения уравнений (4.1), (4.2) по глубине слоя жидкости $h = h(t, x, y)$, т.е. вертикальному масштабу течения, в предположении, что он мал по сравнению с горизонтальными масштабами. При этих условиях из закона сохранения массы можно получить, что скорость в вертикальном направлении w также мала по сравнению с горизонтальными компонентами. Из уравнения импульса следует, что вертикальные градиенты давления определяются как гидростатические. Интегрирование по вертикальной компоненте позволяет исключить скорость w из уравнений. Без учета сил Кориолиса уравнения мелкой воды имеют вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot h)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot h)}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial h}{\partial x} - bu, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial h}{\partial y} - bv,\end{aligned}\tag{4.3}$$

где b - коэффициент вязкого сопротивления, определяемый эмпирически.

Уравнения мелкой воды можно применять для моделирования волн в атмосфере, реках, озерах, океанах, а также более мелких водоемах. В частности, они описывают такое опасное явление, как волны цунами.

Предложенная Л. Прандтлем концепция пограничного слоя позволяет существенно упростить моделирующие течение жидкости уравнения путем разделения потока на две области: тонкого вязкого пограничного слоя и невязкого течения. При малых значениях вязкости (или больших числах Рейнольдса Re) ее действие проявляется только в достаточно узком слое вблизи обтекаемого тела, который называется пограничным слоем, а вне него жидкость ведет себя как идеальная [71]. Все существенные изменения параметров течения происходят внутри пограничного слоя, за толщину которого δ принимают значение нормальной к стенке координаты, в которой скорость отличается от скорости внешнего потока на 1 %.

Уравнения пограничного слоя в изотермическом случае (без учета уравнения энергии) имеют вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \\ F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}, \\ F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} &= \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}, \\ F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= 0.\end{aligned}\tag{4.4}$$

Уравнения (4.4) гораздо проще исходных уравнений (4.1), (4.2), что существенно экономит время расчета.

Все функции, входящие в уравнения движения (4.2), необходимо представить в виде суммы осредненных ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$) и пульсационных (u', v', w') составляющих, нужно это для того чтобы избавиться от высокочастотных пульсаций (самых мелких масштабов), присущих турбулентным течениям [71]

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w'. \quad (4.5)$$

Подставив эти выражения в уравнения движения (4.2) и проведя осреднение всех входящих в уравнение величин, получим три уравнения Рейнольдса

$$\begin{aligned} F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho u' u'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho u' v'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho u' w'}) \right) \\ = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}, \\ F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{v} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho v' u'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho v' v'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho v' w'}) \right) \\ = \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}, \\ F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \bar{w} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\overline{\rho w' u'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\rho w' v'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho w' w'}) \right) \\ = \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ – оператор Лапласа.

В процессе осреднения в уравнениях (4.6) появляются дополнительные неизвестные (напряжения Рейнольдса):

$$(\overline{\rho u' u'}), (\overline{\rho u' v'}), (\overline{\rho u' w'}), (\overline{\rho v' v'}), (\overline{\rho v' w'}), (\overline{\rho w' w'}).$$

Для их определения необходимы дополнительные соотношения, которые вводятся с помощью моделей турбулентности.

4.2 Моделирование турбулентного режима движения жидкости

Подходы к моделированию ламинарного и турбулентного режимов движения отличаются и связано это прежде всего с тем, что в турбулентном режиме структура течения более сложная и, в общем случае, не поддается исключительно теоретическому описанию. Турбулентные течения характеризуются очень большим диапазоном временных и пространственных масштабов [56]. В настоящее время выделяют три основных подхода (DNS, LES и RANS), которые позволяют описать турбулентные течения. Далее будут описаны основные методы моделирования турбулентного потока.

Теоретически все течения, включая турбулентные, описываются уравнениями Навье – Стокса. Прямое численное моделирование (DNS), которое в настоящее время активно развивается [84, 88, 96, 98, 101]. В DNS необходимо разрешить все пространственные и временные масштабы, включая самые мелкие вихри. В настоящее время в научной литературе можно найти примеры использования DNS-подхода для моделирования простых течений при невысоких числах Рейнольдса. Использование DNS требует огромных затрат компьютерных ресурсов, в связи с этим получил развитие другой метод - метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES). В LES-методе большие вихри переносят массу, импульс, энергию и другие скалярные характеристики потока. Что касается малых вихрей, они не зависят от геометрии исследуемой задачи, так как они изотропны, в связи с этим их перемещение можно описать с помощью подсеточной модели. Подсеточные модели, реализованные в данной модели, моделируют область частот выше некоторого k_w^{max} , который определяется разрешающей способностью расчетной сетки

$$k_w^{max} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (4.7)$$

где λ - длина волны.

Данный метод имеет более высокую точность расчета, по сравнению с RANS-моделями турбулентности, и предъявляет значительно меньше требований

к вычислительным ресурсам, по сравнению с DNS. Но все же для использования этой модели качество построенной сетки должно быть очень высокое, а также на основе эмпирических или полуэмпирических данных требуется калибровка констант подсеточной модели под разные типы течений.

В настоящее время в основном используется моделирование турбулентности с применением осредненных уравнений Навье-Стокса. Наиболее часто прибегают к так называемому осреднению по Рейнольдсу (Reynolds-Averaged Navier Stocks –RANS), которое в большинстве случаев представляет собой обычное осреднение по времени.

RANS модели турбулентности имеют различные классы, подробное описание которых приведено в [5].

Напряжения Рейнольдса могут быть вычислены по алгебраическим формулам через параметры среднего течения, а также с использованием дифференциальных моделей. Далее рассмотрим наиболее популярные модели с указанием рекомендаций по их использованию.

Модель *Spalart – Allmaras* – это однопараметрическая модель турбулентности, в которой осредненные уравнения Навье – Стокса дополнены уравнением переноса-диффузии для турбулентной вязкости. Данная модель показывает хорошие результаты для умеренно сложных квазидвумерных внешних и внутренних течений, пограничных слоев под действием градиента давления (профилей, крыльев, фюзеляжей, корабельных корпусов, турбин). Не рекомендуется ее применять при расчете пространственных течений, свободных сдвиговых слоев, течений с сильными отрывами, так как демонстрирует плохие результаты [44].

Модели $k – \varepsilon$, $k – \omega$ являются наиболее распространенными двухпараметрическими моделями, также у них существуют различные модификации. В них решаются два дополнительных транспортных уравнения для турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) k , скорости ее диссипации в тепло ε или удельной скорости диссипации $\omega = \varepsilon/k$. По этим параметрам вычисляется турбулентная вязкость, которая затем добавляется в уравнения движения. Эти модели являются доста-

точно простыми и в то же время позволяют предсказать свойства турбулентных течений с достаточной степенью точностью.

Модель $k-\varepsilon$ – одна из первых дифференциальных моделей турбулентности. Подходит для проведения начальных и параметрических исследований, при сравнении альтернативных подходов. Недостаток $k-\varepsilon$ -модели заключается в том, что при описании пристенных течений возникает избыточное порождение кинетической энергии турбулентности, а это в свою очередь влечет за собой занижение размеров отрывных зон, что может привести к существенным погрешностям при конструировании аэродинамических объектов. Эта модель недостаточно хорошо предсказывает свойства сложных течений с сильными градиентами давления, отрывом и большой кривизной линий тока.

При движении жидкости в узком пристенном слое течение можно считать ламинарным, так как жидкость прилипает к стенкам, т.е. имеет нулевую скорость на стенках. Для описания пограничных слоев между ламинарным течением и турбулентным $k-\varepsilon$ -модель использует пристеночные функции, которые хорошо работают только для безотрывных течений. Что касается модели $k-\omega$, то она показывает существенные преимущества при моделировании пристенных течений по сравнению с $k-\varepsilon$ -моделью, так как не требуется добавления дополнительных членов в уравнения. Еще одним ее достоинством является хорошее предсказывание отрывных течений. К недостаткам модели можно отнести сильную зависимость решения от значений параметра ω во внешнем течении, поэтому рекомендуется использовать SST-модификацию модели, которая представляет собой комбинацию $k-\varepsilon$ -модели и $k-\omega$ -модели.

4.3 Моделирование многофазных течений

Многофазные течения распространены в природе и технике. В таких течениях среда находится в двух или более различных агрегатных состояниях. Понятие многофазной среды применяется не только к физическим фазам, таким как, газ, жидкость, твердое тело, но также при описании движения час-

тиц/капель/пузырей различного размера, так как они имеют неодинаковую инерционную реакцию и по-разному взаимодействуют с внешним течением.

Однофазные течения моделировать легче, чем многофазные, так как распределения фазовых компонентов в многофазном потоке неоднородно, а это в свою очередь порождает множество режимов течения. При моделировании многофазных течений увеличивается число уравнений, которые нужно решать, потому что каждая фаза может иметь свою скорость и температуру. К тому же, фазовый состав может изменяться из-за фазовых превращений (конденсации, плавления, сублимации, кипения).

В многофазных течениях выделяют первичную фазу, та которая преобладает, и вторичную фазу. Первичная фаза считается непрерывной, вторичная фаза с существенно меньшей концентрацией распределена в объеме первичной. Каждая из фаз занимает определенную часть общего объема смеси. Относительная объемная доля фазы называется объемной концентрацией. Понятно, что суммарная объемная концентрация смеси равна 1 [55].

Многофазные течения можно разделить на четыре основные группы в зависимости от количества и свойств участвующих фаз: газожидкостные, смеси газа и твердых частиц, смеси жидкости и твердых частиц, трехфазные смеси.

Для описания многофазных течений используются следующие подходы: эйлерово-лагранжев или эйлерово-эйлеров. Более подробно рассмотрим эйлерово-эйлеров подход, так как он был использован при выполнении численных экспериментов.

В эйлерово-эйлеровом подходе в каждой точке исследуемой среды могут находиться различные фазы, так как фазы в данном случае рассматриваются как взаимопроникающие континуумы. Объемные концентрации фаз подразумеваются как непрерывные функции от времени и пространственных переменных. Для каждой фазы решаются дифференциальные уравнения законов сохранения, аналогичные уравнениям для смеси в целом. Для замыкания этих уравнений используются дополнительные соотношения [58].

На эйлерово-эйлеровом подходе основаны следующие распространенные модели: модель объема жидкости (Volume of Fluid), модель смеси (Mixture) и эйлерова модель (Eulerian) [15].

Для моделирования двух или более несмешивающихся фаз (например, воды и воздуха) используется модель Volume of Fluid (VoF), потому что для таких фаз необходимо учесть границу раздела [15]. Эта модель хорошо применима при описании следующих явлений: стратифицированных течений, течения со свободной поверхностью, заполнение жидкостью сосуда, разлив жидкости по сухому руслу после разрушения плотины и другие течения с четкой границей раздела фаз. Данная модель не может быть использована в следующих случаях: 1) если длина поверхности раздела фаз мала по сравнению с размером вычислительной ячейки; 2) при описании газовых смесей, потому что газы смешиваются на молекулярном уровне.

Для всех рассматриваемых фаз в модели VoF используется общее уравнение движения, вместе с тем в ходе решения задачи объемная доля каждой фазы отслеживается по всей вычислительной области. В большинстве ячеек вычислительной области объемная концентрация фаз равна 0 или 1, так как фазы не могут перемешиваться и проникать одна в другую.

Модель Mixture – в данной модели решаются уравнения импульсов для первичной и вторичной фаз, при этом скорость вторичной фазы может отличаться от скорости первичной фазы. Различия в скоростях фаз моделируются с помощью концепции скорости скольжения (или дрефта). Эта модель применяется для описания запыленных течений с небольшой степенью загрузки, пузырьковых течений, осаждения частиц, циклонных сепараторов. Она может быть использована для однородной многофазной среды, в которой скорость дисперсной фазы совпадает со скоростью несущей среды [58].

Эйлерова модель – наиболее полная и сложная модель многофазности, которая позволяет описывать поведение нескольких фаз. Модель основана на предположениях о том, что все фазы имеют общее давление, но для каждой из них решаются свои уравнения неразрывности и импульсов. Взаимодействие фаз учи-

тывается через давление и коэффициенты межфазного обмена. В модели доступны несколько эмпирических соотношений для коэффициентов межфазного обмена. Она реализована только для вязких течений и не учитывает фазовые переходы плавления и кристаллизации. Модели турбулентности [58] $k - \varepsilon$ и $k - \omega$ можно использовать как для моделирования турбулентных пульсаций смеси в целом, а также по отдельности для каждой фазы. Стоит отметить, что модель рейнольдсовых напряжений можно использовать только для смеси в целом.

4.4 Исследование полей скоростей и напряжений в окрестности цилиндра при поперечном его обтекании в ANSYS Fluent

Для выполнения исследования полей скоростей и напряжений в окрестности цилиндра, имитирующего подводный трубопровод, в RANS постановке использовался ANSYS Fluent – программный продукт, зарекомендовавший себя одним из лучших в сфере CFD вычислений. Для моделирования турбулентного потока была выбрана $k - \omega$ SST модель турбулентности со стандартной пристеночной функцией, рекомендуемая в документации данного программного продукта как наиболее универсальная. Для моделирования перехода ламинарного течения в турбулентное в пристеночной области данная модель не требует добавления дополнительных членов в уравнения. Также, модель хорошо предсказывает отрывные течения.

Кинетическая энергия турбулентности (k) и ее удельная скорость диссипации (ω) получают из следующих уравнений переноса

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega, \quad (4.9)$$

где G_k - генерация кинетической энергии турбулентности из-за средних градиентов скорости

$$G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (4.10)$$

G_ω - генерацию удельной скорости диссипации ω

$$G_\omega = \frac{\alpha \alpha^*}{\nu_t} G_k, \quad (4.11)$$

α^* - коэффициент демпфирует турбулентную вязкость, вызывая поправку на низкое число Рейнольдса

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right), \quad (4.12)$$

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}, \quad (4.13)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (4.14)$$

$$R_k = 6, \beta_i = 0,072$$

Γ_k, Γ_ω - представляют собой эффективную диффузию k и ω соответственно и их величина может быть найдена по формулам

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad (4.15)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}, \quad (4.16)$$

σ_k, σ_ω - турбулентные числа Прандтля;

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1 - F_1)/\sigma_{k,2}}, \quad (4.17)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1 - F_1)/\sigma_{\omega,2}}, \quad (4.18)$$

μ_t - турбулентная вязкость, определяется по формуле

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1} \right]}, \quad (4.19)$$

S - величина скорости деформации;

F_1, F_2 - функции смешения

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4), \quad (4.20)$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega}^+ y^2} \right], \quad (4.21)$$

$$D_{\omega}^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (4.22)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2), \quad (4.23)$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (4.24)$$

y - расстояние до следующей поверхности;

Y_k, Y_{ω} - рассеяние k и ω из-за турбулентности

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega, \quad (4.25)$$

$$Y_{\omega} = \rho \beta \omega^2 \quad (4.26)$$

D_{ω} - кросс-диффузионный член

$$D_{\omega} = 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \quad (4.27)$$

Для описания многофазных течений (вода – воздух) использовалась модель 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

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq}, \quad (4.28)$$

где \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_{α_q} – внешний массовый источник q -ой фазы.

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (4.29)$$

Уравнение импульса (4.29) зависит от объемных долей всех фаз через свойство плотности (ρ) и вязкости (μ).

Метод решения был выбран – PISO, использовались численные схемы второго порядка точности. Задача решалась в 2D-постановке.

При построении геометрической модели, длина лотка, диаметр цилиндра и глубина воды аналогичны эксперименту, описанного в п.2.2. В численном эксперименте было рассмотрено два случая, когда цилиндр отсутствовал и когда между дном канала и цилиндром имелся зазор, равный диаметру цилиндра ($y_0 = 1,5D$). На рисунке 4.1 показана геометрическая модель и границы расчетной области для второй серии экспериментов. Ось Y проходит через центр цилиндра. Расчетная область представляет собой прямоугольный канал длиной 5 метров.

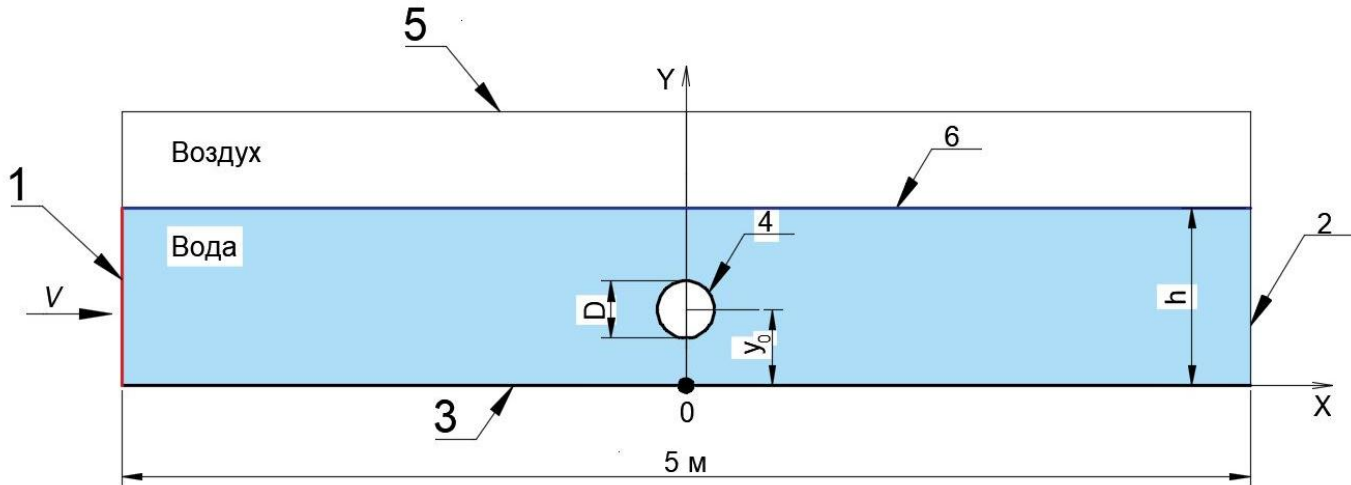


Рисунок 4.1 – Схема геометрической модели: 1 – входное отверстие (inlet);
 2 - выходное отверстие (outlet); 3 – дно лотка (bottom_wall);
 4 – стенки цилиндра (cylinder_wall); 5 – атмосфера; 6 - граница раздела двух фаз
 (вода-воздух); $D = 0,028$ м; $h = 0,12$ м - глубина; $y_0 = 1,5D$

Для двух серий экспериментов были заданы следующие граничные условия [21]:

1. На входе (inlet) в расчетную область задана скорость воды $V = 0,17$ м/с.
2. На выходе (outlet) задано статическое давление, равное 1 атм.
3. На твердых стенках (cylinder_wall и bottom_wall) задано условие прилипания, шероховатость стенок не учитывалась.

Для решения задачи в ANSYS Fluent была построена многоблочная структурированная расчетная сетка в Ansys Workbench с использованием модуля Meshing, фрагмент которой показан на рисунке 4.2.

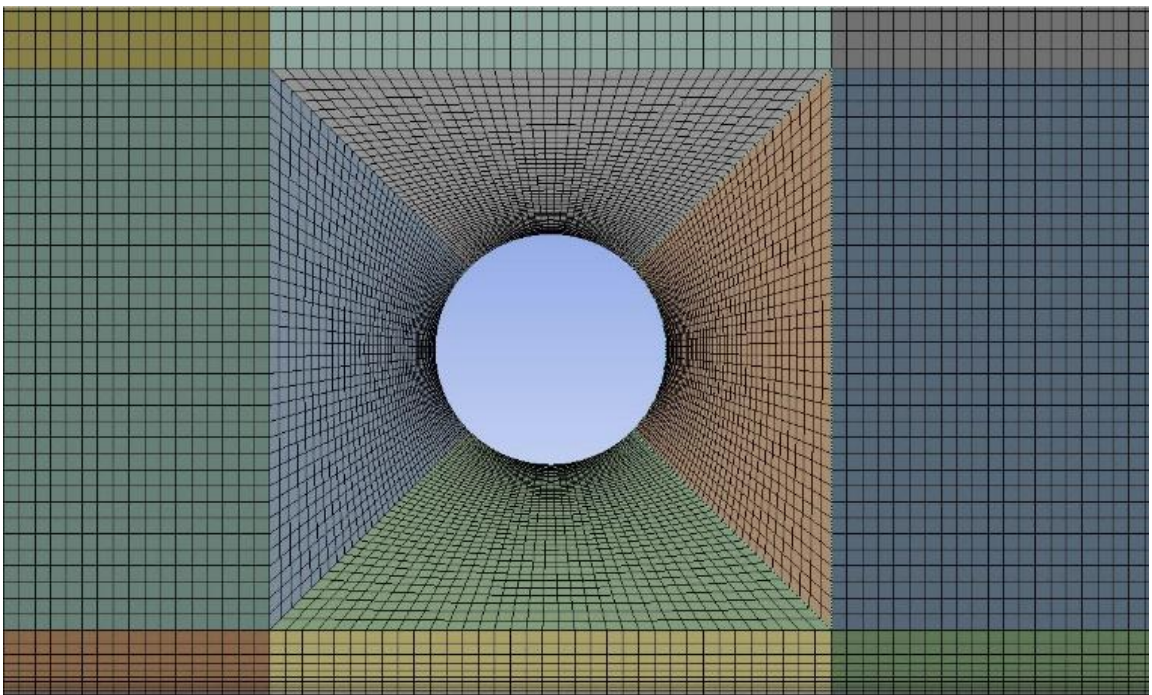


Рисунок 4.2 – Внешний вид расчетной сетки, построенной для второй серии экспериментов

Сетка имеет сгущение к твердым поверхностям. Общее число четырехугольных элементов для первой серии экспериментов составило около 600 тысяч, для второй – около 550 тысяч элементов.

После настройки модели, были заданы вещества (материалы), участвующие в исследуемой задаче, и их физические свойства (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Физические свойства веществ

Наименование вещества	Плотность, кг/м ³	Вязкость, кг/м·с
Вода, $t = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$	998,6	0,001003
Воздух	1,225	$1,7894 \cdot 10^{-5}$

Для фазы вода были учтены силы поверхностного натяжения ($\sigma = 0,072\text{ н/м}$)

4.4.1 Результат численного моделирования

В результате расчетов были получены векторное поле течения, профили продольной u^0 и вертикальной w^0 компонент осредненной скорости.

На рисунке 4.3 представлено как распределяется векторное поле скоростей в окрестности цилиндра. За цилиндром образуется турбулентный гидродинамический след и вихревые зоны. Вихри срываются, то с нижней, то с верхней поверхности цилиндра. На верхней и нижней границах цилиндра наблюдается максимальная скорость потока, а уменьшение скорости наблюдается перед цилиндром и в турбулентном гидродинамическом следе.

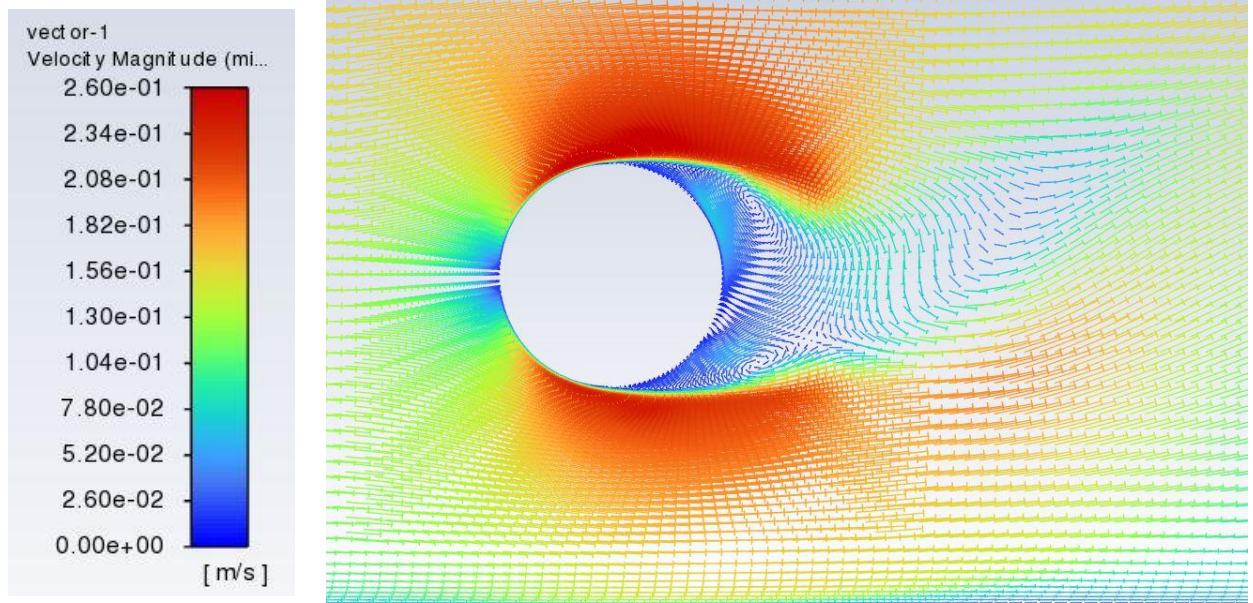


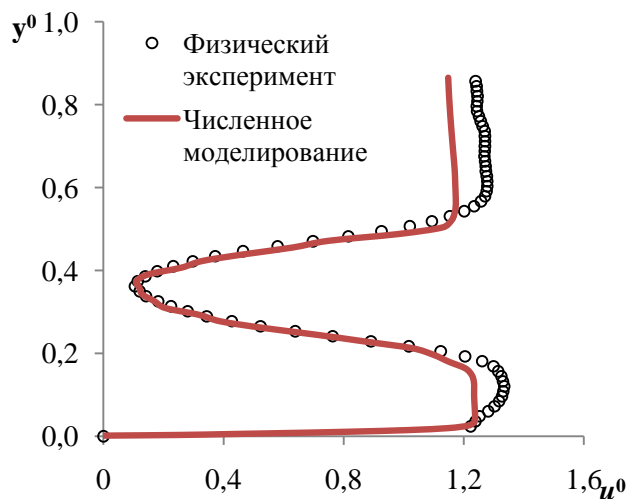
Рисунок 4.3 – Векторное поле течения

По результатам расчетов были получены мгновенные значения продольной u и вертикальной w компоненты скорости, а затем были вычислены соответствен-

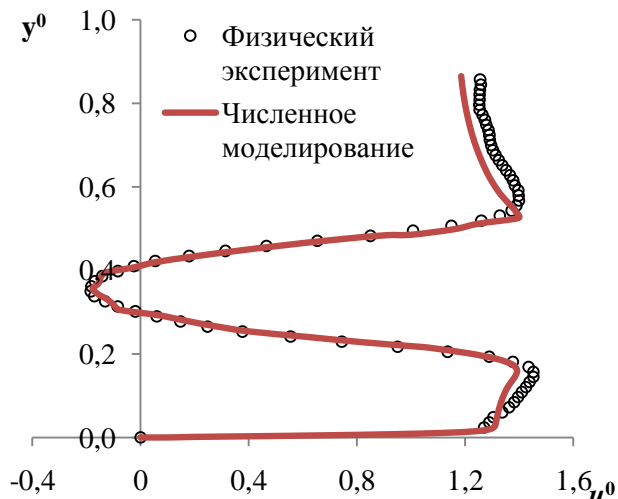
но безразмерные значения продольной $u^0 = \langle u \rangle / V$ и вертикальной $w^0 = \langle w \rangle / V$ компонент скорости.

Для построения графиков были использованы следующие безразмерные величины: $x^0 = x/h$ и $y^0 = y/h$.

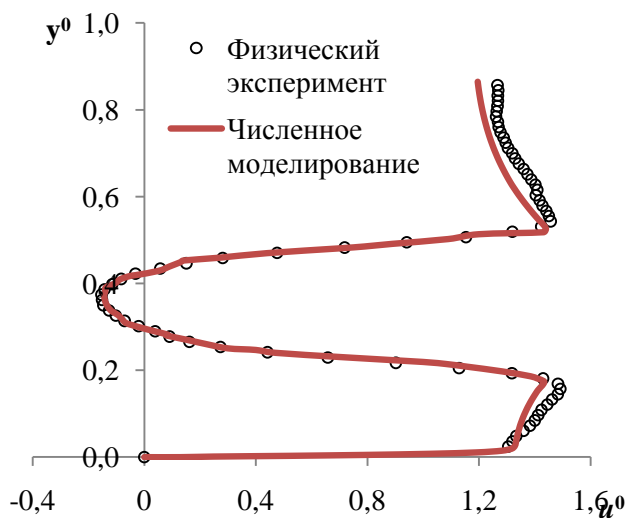
На рисунках 4.4 и 4.5 показано сопоставление экспериментальных данных графиков изменения профилей продольной u^0 и вертикальной w^0 компонент скорости при средней скорости потока $V = 0,17$ м/с, полученных Чеботниковым А.В., и результаты численного исследования $k-\omega$ SST модели турбулентности. Профили u^0 и w^0 построены в аналогичных семи поперечных сечениях потока (x^0 : 0,35; 0,23; 0,175; 0; -0,175; -0,23 и -0,35), что и в эксперименте, описанного в пункте 2.2 настоящей диссертации.



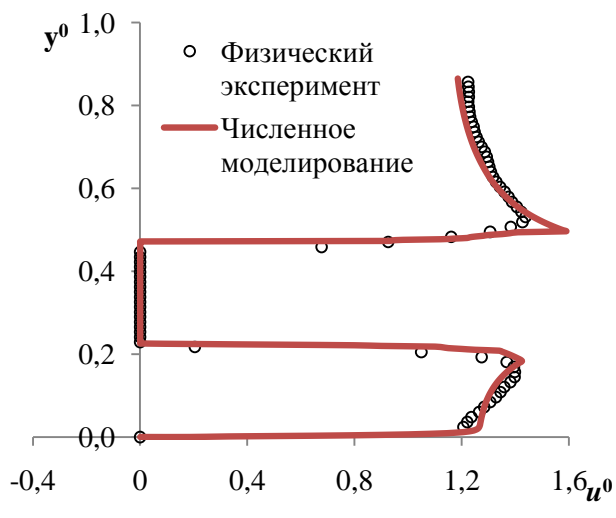
(а)



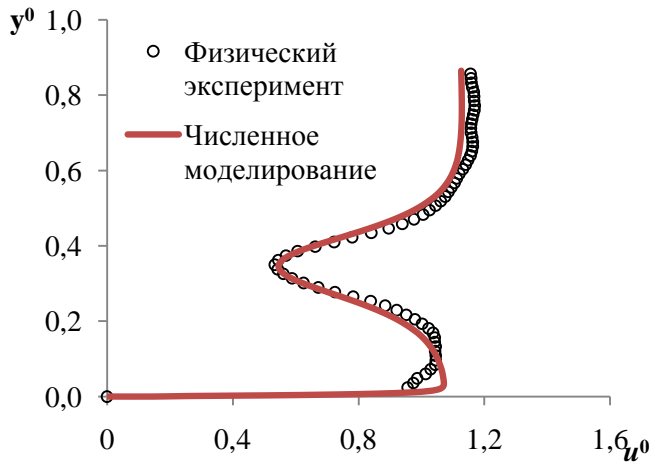
(б)



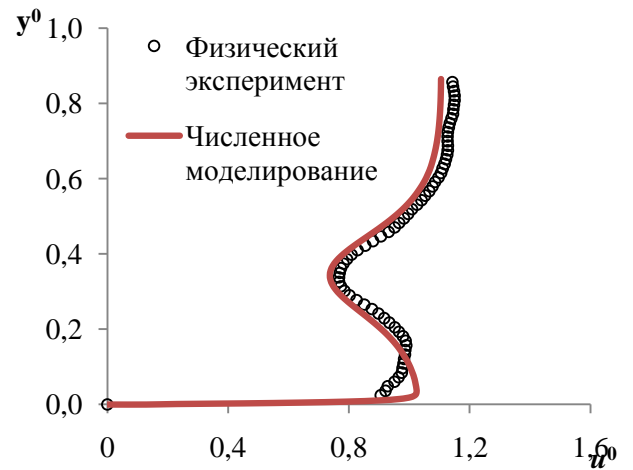
(в)



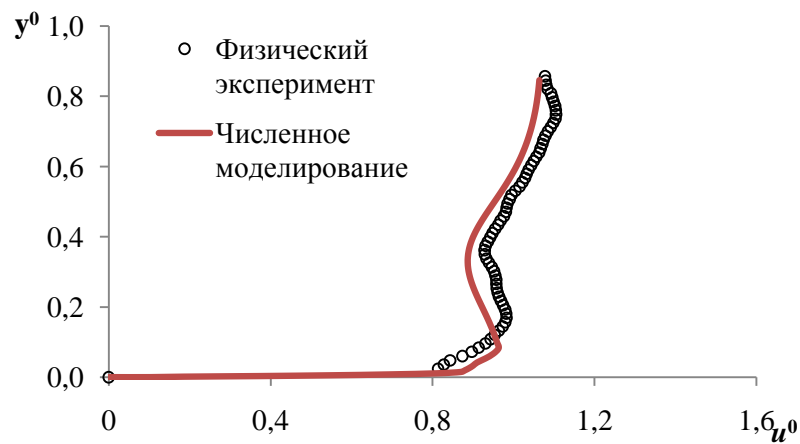
(г)



(д)

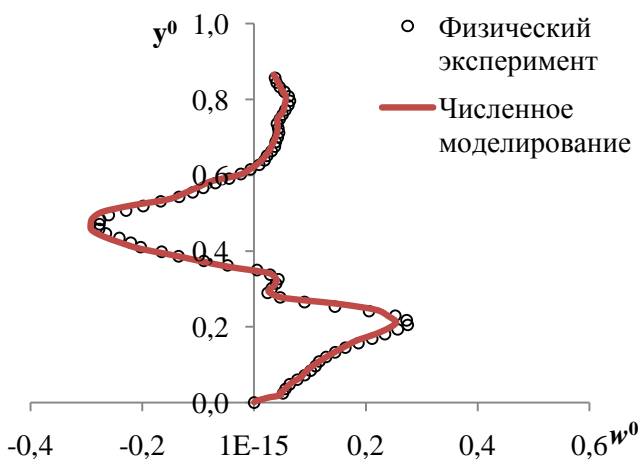


(е)

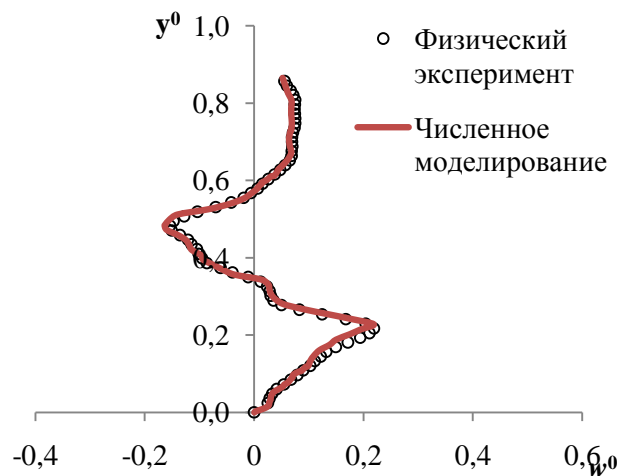


(ж)

Рисунок 4.4 – Экспериментальные [39] 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)

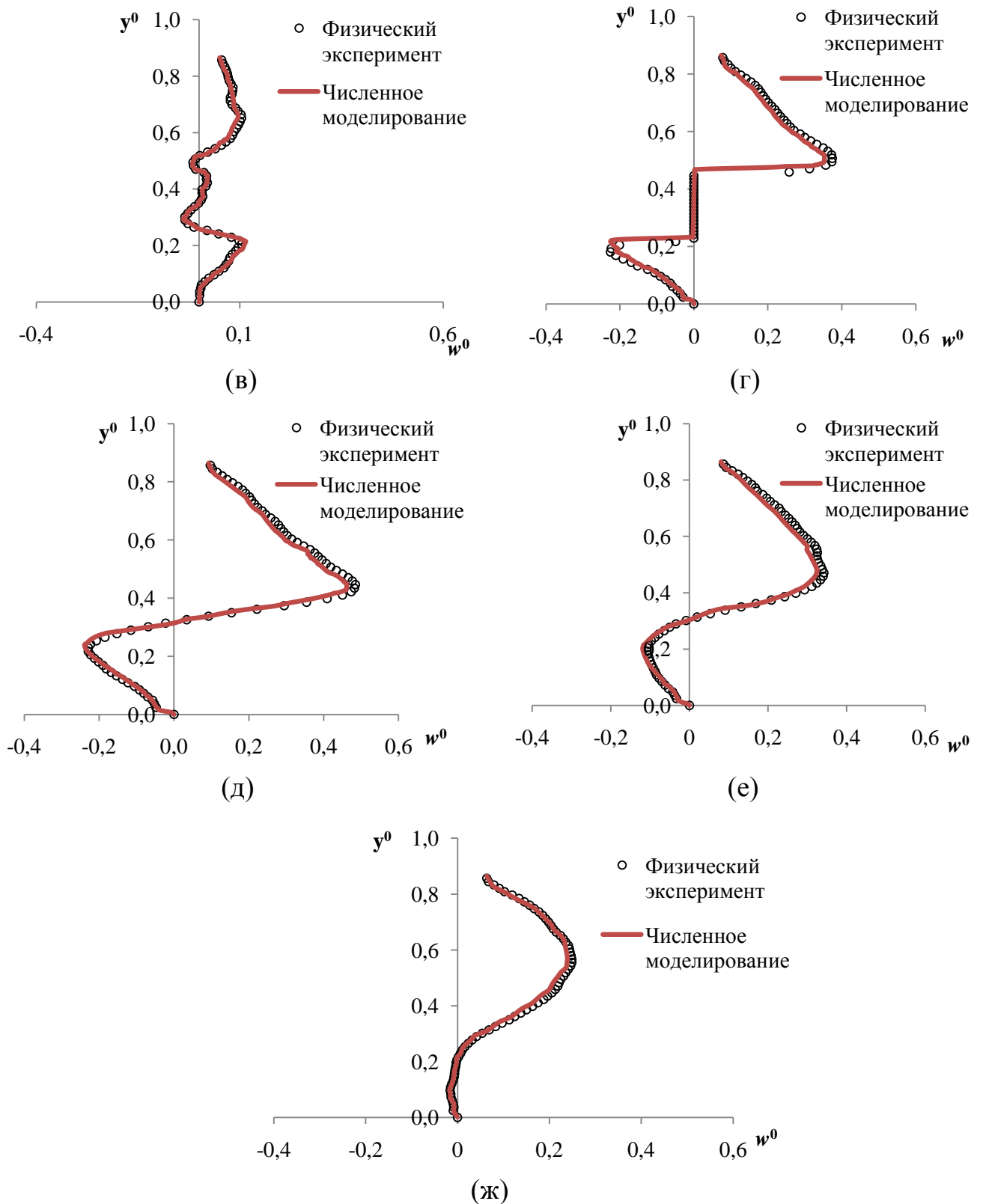


Рисунок 4.5 – Экспериментальные [39] и расчетные профили средней вертикальной w^0 компоненты скорости в сечениях: а – $x^0 = 0,35$; б – $x^0 = 0,23$; в – $x^0 = 0,175$; г – $x^0 = 0$; д – $x^0 = 0,175$; е – $x^0 = -0,23$; ж – $x^0 = -0,35$; $V = 0,17$ м/с

При сравнении профилей вертикальной и продольной компонент скорости полученных экспериментально авторами работы [39] и численным моделированием, выполненного в ПК ANSYS Fluent, было установлено очень хорошее совпадение результатов, что говорит об адекватности использованной методики моделирования. Расхождения между численными результатами моделирования и эксперимента не превышают 10% (Приложение А).

На рисунке 4.6 представлено сравнение профилей продольной компоненты скорости при наличии цилиндра с профилем скорости в случае, когда цилиндр отсутствует.

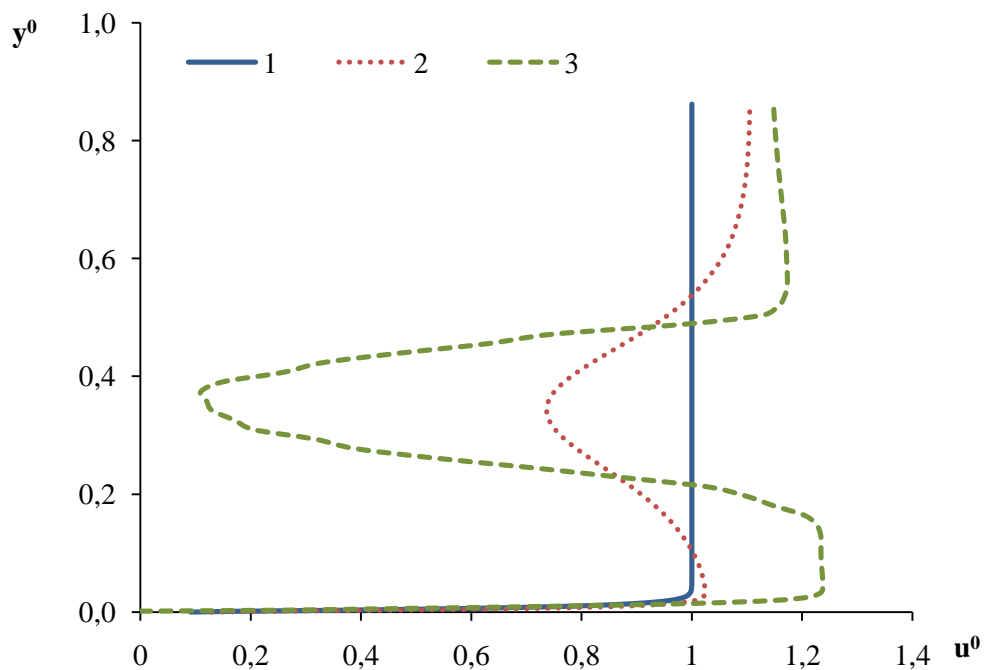


Рисунок 4.6 – Профили продольной компоненты скорости u^0 :

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 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 выводами работы [39].

Как уже отмечалось ранее, на процесс размыва оказывают влияние касательные напряжения, которые возникают на дне канала. На рисунке 4.7 представлены касательные напряжения для двух случаев выполненных численных экспериментов, которые были вычислены по формуле [69]

$$\tau_{we}^0 = \frac{2}{Re} \cdot \frac{u^0|_{y^0=\delta^0}}{\delta^0}, \quad (4.30)$$

где Re - число Рейнольдса

δ^0 - безразмерная величина, которая вычисляется по формуле $\delta^0 = \delta/h$,

$\delta = 2,4$ мм

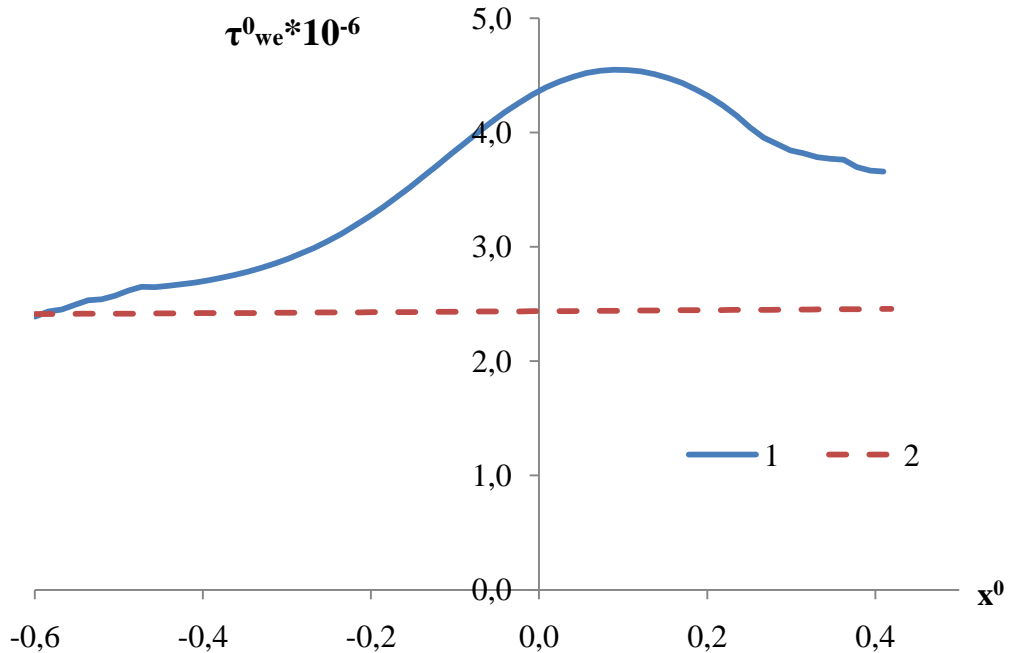


Рисунок 4.7 – Распределение касательных напряжений: 1 – цилиндр возвышается над дном на величину D ; 2 – цилиндр отсутствует

При анализе характера изменения касательных напряжений по длине можно заметить, что наличие цилиндра приводит к увеличению касательных напряжений на дне (τ_{we}^0) в 1,87 раз по сравнению со случаем, когда цилиндр отсутствует. Наибольшие значения возникают за цилиндром. Данный вывод согласуется с выводами в работе [39]. Если рассматривать касательные напряжения в размерном виде, то они будут пропорциональны средней скорости набегающего потока. Стоит отметить, что размыв дна в окрестности цилиндра будет происходить при значениях скорости набегающего потока меньших, чем при скоростях потока в случае присутствия цилиндра, следовательно, интенсивность размыва зависит от грунта слагающего дно.

4.5 Переформирования песчаного дна в зоне расположения одиночного цилиндра в 2-D постановке

4.5.1 Постановка задачи

Расчетная задача в 2-D постановке соответствует эксперименту [103], в котором исследовано возникновение размыва в окрестности подводного трубопровода (рисунок 4.8) [21].

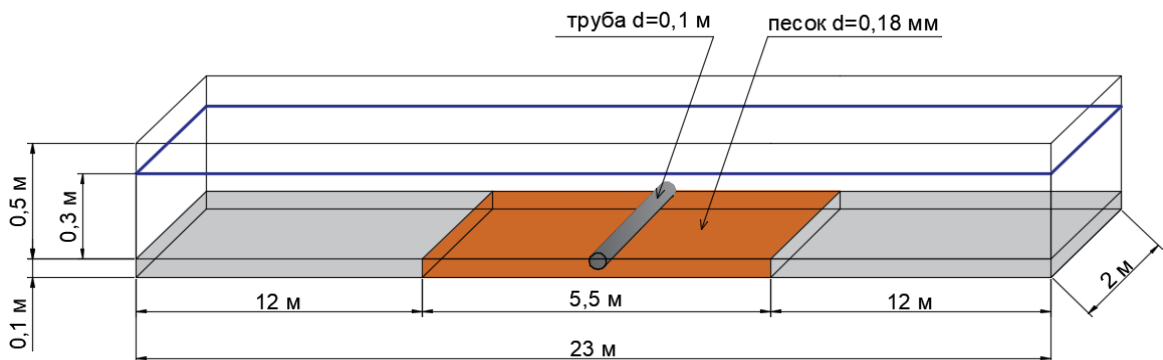


Рисунок 4.8 – Схема эксперимента [21]

Было рассмотрено два случая, первый, когда цилиндр отсутствовал (рисунок 4.9а) и второй – на поверхности песка находилась труба диаметром 0,1 м, погруженная в песок на глубину 0,64 см (рисунок 4.9б) [21].

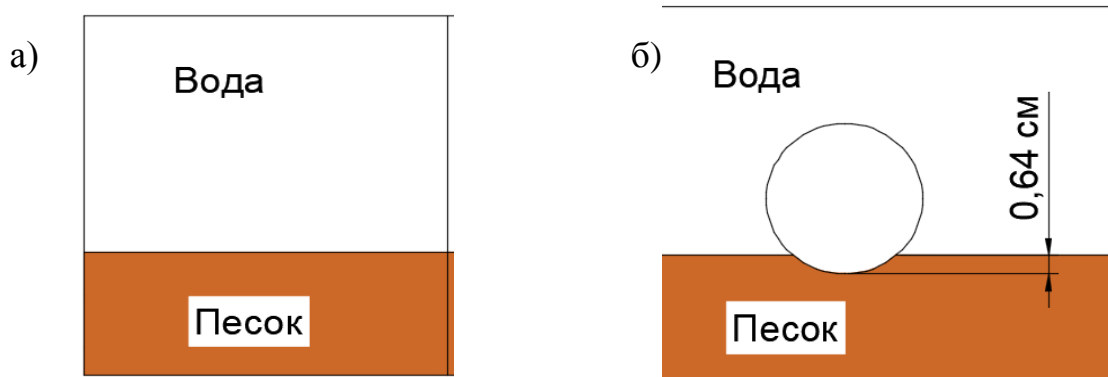


Рисунок 4.9 – Схемы проведенных расчетов [21]

Все геометрические параметры соответствовали эксперименту [103]. Геометрической областью и многоблочная структурированная расчетная сетка построены в Ansys Workbench с использованием соответственно модулей Design

Modeller и Meshing [21]. Сетка имела сгущение к стенкам лотка и трубы. Общее число четырехугольных элементов составило около 800000.

В ходе численного моделирования приняты следующие допущения: дно сложено из однородного песка с постоянным диаметром частиц; материал трубы не учитывался.

4.5.2 Математическая модель

Для описания движения смеси жидкости и твердых частиц используется эйлерова модель многофазности (Eulerian), основанная на решении уравнений неразрывности и импульсов для каждой фазы [21]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0, \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \sum_{l=1}^N K_{ls}(\vec{v}_l - \vec{v}_s) + (\vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{td,s}) \quad (4.32)$$

где \vec{v}_s - скорость фазы s ;

$\bar{\bar{\tau}}_s$ - тензор фазового напряжения – деформации.

$$\bar{\bar{\tau}}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{\bar{I}} \quad (4.33)$$

где μ_s и λ_s - сдвиговая и объемная вязкость фазы;

$\vec{F}_{lift,q}$ – подъемная сила;

$\vec{F}_{td,q}$ - турбулентная дисперсионная сила.

Динамический коэффициент первой вязкости вычислялся по формуле [21]

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (4.34)$$

где $\mu_{(s,col)}$ - вязкость, обусловленная столкновением частиц;

$\mu_{s,kin}$ - кинетическая вязкость;

$\mu_{s,fr}$ - вязкость, обусловленная трением.

Взаимодействие фаз учитывается через давление и коэффициенты межфазного обмена [37].

Для описания турбулентности использована k - ε Realizable модель [99], основанная на уравнениях переноса кинетической энергии турбулентности (k) и ее скорости диссипации (ε) [37]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b, \end{aligned} \quad (4.36)$$

где G_k – генерация турбулентной кинетической энергии из-за средних градиентов скорости

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (4.37)$$

G_b – кинетическая энергия выталкивающей силы

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (4.38)$$

где $Pr_t = 0,75$ – турбулентное число Прандтля;

g_i – компоненты вектора гравитации.

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

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (4.39)$$

Смесь состоит из первичной и вторичной фаз, физические свойства которых представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Физические свойства фаз

Фазы	Плотность, кг/м ³	Вязкость, кг/м·с
Первичная фаза - вода	992,8	0,001003
Вторичная фаза - песок	1800	-

Вторичная фаза является гранулярной. Был задан диаметр частиц песка, который равен 0,18 мм [21].

Моделирование гранулярной фазы проведено с учетом Solids Pressure, которое описано с помощью следующего соотношения [21]

$$p_{s,kinetic} = \alpha_s \rho_s \theta_s [1 + 2\alpha_s g_{0,ss} (1 + e_{ss})], \quad (4.40)$$

где α_s - объемная доля фазы песка;

ρ_s - плотность песка;

θ_s - гранулярная температура;

e_{ss} - коэффициент восстановления при столкновении частиц;

$g_{0,ss}$ - функция радиального распределения.

Вязкость, обусловленная столкновением частиц определяется по формуле [21]

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s d_s \rho_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{1/2}, \quad (4.41)$$

где d_s - диаметр частиц песка.

Кинетическая вязкость рассчитывается по формуле [21]

$$\mu_{s,kin} = \frac{d_s \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss}\right]. \quad (4.42)$$

Вязкость, обусловленная трением рассчитывается по формуле

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_{friction} \sin \varphi}{2\sqrt{I_{2D}}}, \quad (4.43)$$

где $p_{friction}$ - давление, возникающие из-за сил трения;

φ - угол внутреннего трения, $\varphi = 43^\circ$;

I_{2D} - является вторым инвариантом тензора девиаторных напряжений.

Давление, возникающие из-за сил трения ($p_{friction}$) рассчитывается по формуле [85]

$$p_{friction} = Fr \frac{(\alpha_s - \alpha_{s,min})^n}{(\alpha_{s,max} - \alpha_s)^p}. \quad (4.44)$$

Объемная вязкость (λ_s) вычисляется по формуле

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_{ss}}{\pi}\right)^{1/2}. \quad (4.45)$$

Коэффициент сопротивления (K_{ls}) определяется по модели Syamlal-Obrien [105]. Эта модель основана на измерениях конечных скоростей частиц в псевдоожиженных слоях с корреляциями, которые являются функцией объемной доли и относительного числа Рейнольдса [21]

$$K_{sl} = \frac{3\alpha_s\alpha_l\rho_l}{4v_{r,s}^2d_s} C_D \left(\frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) |\vec{v}_s - \vec{v}_l|, \quad (4.46)$$

где α_s – объемная доля фазы песка (гранулярной фазы);
 α_l – объемная доля жидкой фазы;
 ρ_l – плотность жидкой фазы;
 d_s – диаметр песка (гранулярной фазы);
 $v_{r,s}$ – предельная скорость твердой фазы;
 \vec{v}_s и \vec{v}_l – скорости твердой и жидкой фаз, соответственно;
 C_D – функция сопротивления

$$C_D = \left(0,63 + \frac{4,8}{\sqrt{Re_s/v_{r,s}}} \right)^2, \quad (4.47)$$

$$Re_s = \frac{\rho_l d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{\mu_l}. \quad (4.48)$$

Действующая на частицу подъемная сила обусловлена градиентами скорости первичной фазы и вычисляется по предложенной в [80] формуле

$$\vec{F}_{lift} = -C_l p_q \alpha_p (\vec{v}_q - \vec{v}_p) \times (\nabla \times \vec{v}_q), \quad (4.49)$$

где C_l – коэффициент подъемной силы;
 ρ_q – плотность первичной фазы;
 α_p – объемная доля вторичной фазы;
 \vec{v}_q – скорость первичной фазы;
 \vec{v}_p – скорость вторичной фазы.

Коэффициент подъемной силы (C_l) был рассчитан в предположении сферичности твердых частиц по модели [95], которая учитывает аэродинамический подъем, возникающий в результате взаимодействия частиц дисперсной фазы и сдвига скорости первичной фазы, а также подъемную силу, возникающую в ре-

зультате взаимодействия между частицами и вихрями. Коэффициент подъемной силы зависит как от числа Рейнольдса частицы (Re_p), так и от числа Рейнольдса завихренности (Re_ω) [21]

$$Re_p = \frac{\rho_q |\vec{v}_q - \vec{v}_p| d_p}{\mu_q} \quad (4.50)$$

$$Re_\omega = \frac{\rho_q |\nabla \times \vec{v}_q| d_p^2}{\mu_q} \quad (4.51)$$

В зависимости от отношения $\varphi = Re_p Re_\omega$, коэффициент подъемной силы определяется как

$$C_l = \begin{cases} 0,0767 & \varphi \leq 6000 \\ -\left(0,12 - 0,2e^{\frac{\varphi}{3,6}} \times 10^{-5}\right) e^{\frac{\varphi}{3}} \times 10^{-5} & 6000 < \varphi < 5 \times 10^7 \\ -0,6353 & \varphi \geq 5 \times 10^7 \end{cases}$$

В формуле (4.31) присутствует турбулентная дисперсионная сила, которая рассчитывается по формуле [100]

$$\vec{F}_{td,q} = -\vec{F}_{td,p} = C_{TD} K_{sl} \frac{D_{t,pq}}{\sigma_{pq}} \left(\frac{\nabla \alpha_p}{\alpha_p} - \frac{\nabla \alpha_q}{\alpha_q} \right) \quad (4.52)$$

где $\sigma_{pq} = 0,75$; $\nabla \alpha_p$ - градиент объемной доли дисперсной фазы; C_{TD} - константа, в расчетах она равна 1.

Все выше перечисленные модели и формулы, заложены в программный комплекс ANSYS Fluent.

На входе в расчетную область задана скорость воды: $V = 0,5$ м/с, на выходе задано статическое давление, равное 1 атм, на твердых стенках задано условие прилипания [21].

4.5.3 Результаты расчетов

В результате выполненных расчетов были получены распределения концентрации фаз воды и песка, векторного поля течения, а также динамического давления в окрестности цилиндра. На рисунке 4.10 представлено распределение векторного поля скоростей в окрестности цилиндра. Наибольшие скорости потока, превосходящие скорость в ядре потока, наблюдаются в окрестности верхней части цилиндра, а также в местах контакта цилиндра с песком, где происходит про-

сачивание воды. Фильтрационный поток выносит частицы песка из-под цилиндра и тем самым способствует развитию воронок размыва под ним. За цилиндром формируется вихрь (рисунок 4.10в), который также способствует размыву песка [21].

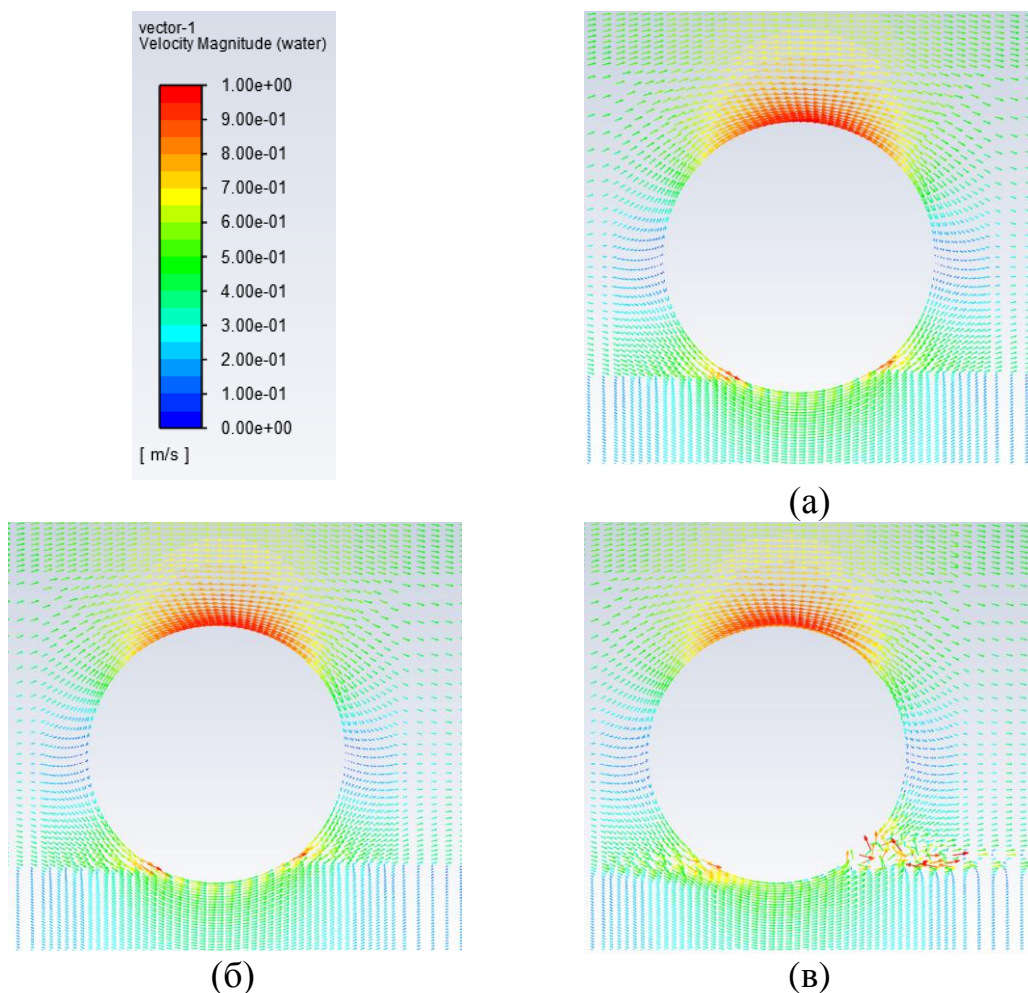


Рисунок 4.10 – Векторное поле течения в моменты времени $t = 0,004$ с (а); $t = 0,1$ с (б) и $t = 0,2$ с (в) [21].

Полученные численные результаты качественно верно передают начальный этап процесса размыва, описанный в [103]. В работе [103] отмечалось постепенное увеличение скорости потока под цилиндром с последующим прорывом песчаной области, аналогично наблюдается и в численном эксперименте.

На рисунках 4.11 и 4.12 показано распределение динамического давления воды и песка в окрестности цилиндра с течением времени. Максимальные значения динамического давления наблюдаются в тех зонах, где скорости движения

воды (рисунок 4.11б) и песка (рисунок 4.12б) возрастают. На верхней и нижней гранях цилиндра давления различаются. На верхней грани цилиндра давление достигает максимального значения, это обусловлено тем, что скорости потока воды там наибольшие (рисунок 4.11а, б), а на нижней – минимальное значение. Когда поток начинает просачиваться под цилиндром, и выносить частицы из-под него, соответственно скорости движения частиц увеличиваются, что влечет за собой увеличение динамического давления за цилиндром (рисунок 4.11б, 4.12б) [21].

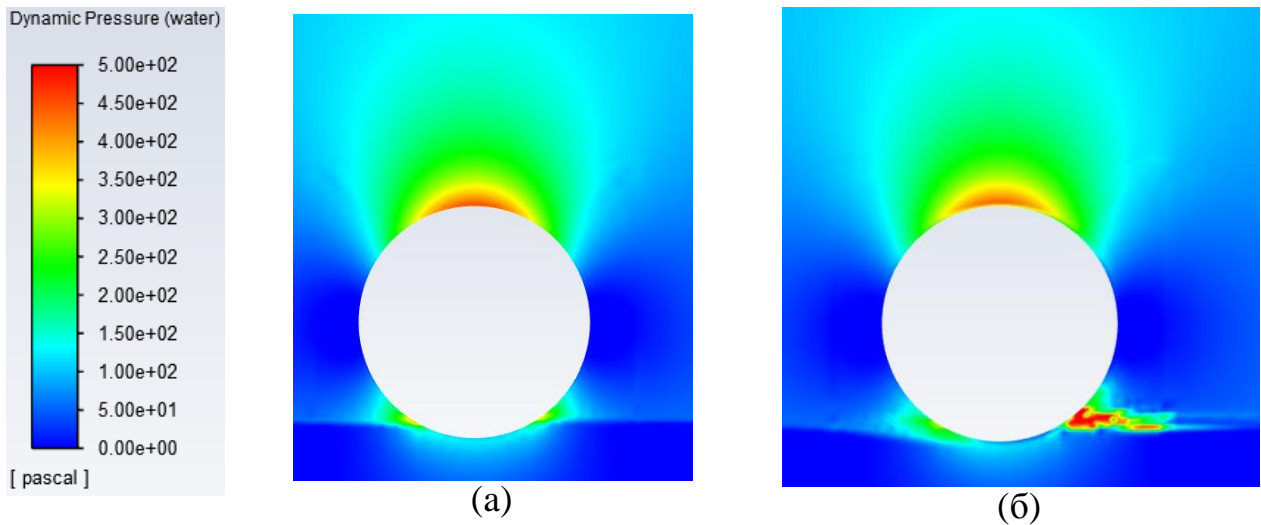


Рисунок 4.11 – Динамическое давление фазы воды в моменты времени $t = 0,1$ с (а) и $t = 0,2$ с (б) [21].

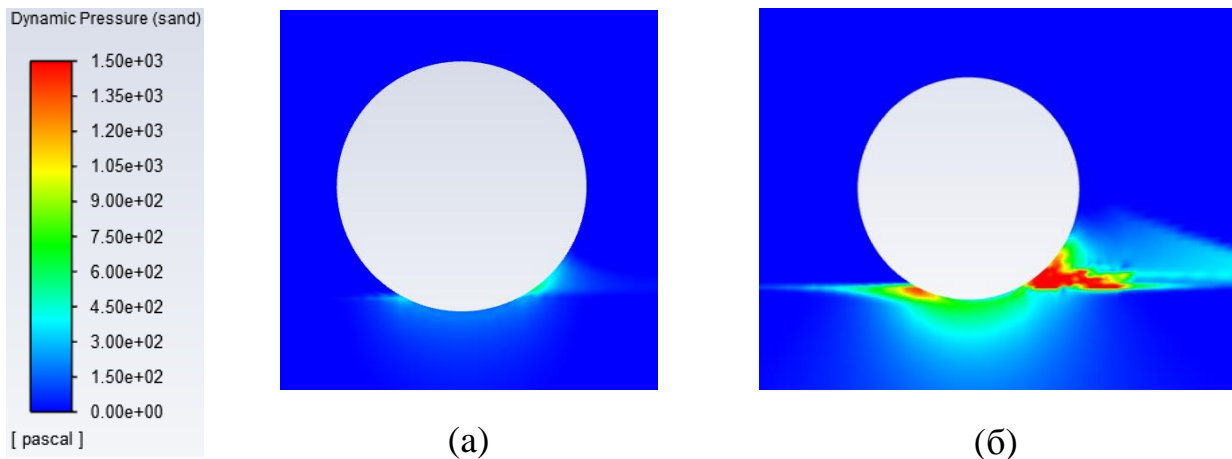


Рисунок 4.12 – Динамическое давление фазы песка в моменты времени $t = 0,1$ с (а) и $t = 0,2$ с (б) [21].

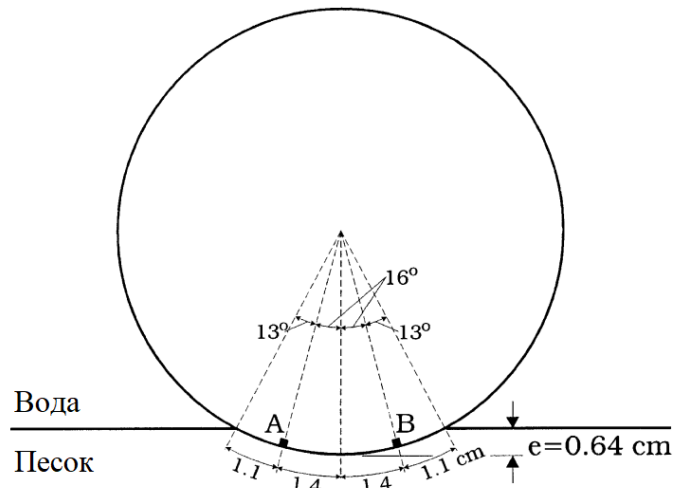


Рисунок 4.13 – Схема для измерения давления в точках А и В

В точках А и В (рисунок 4.13) было измерено полное давление. На рисунке 4.14 представлено изменение полного давления в этих двух точках с течением времени.

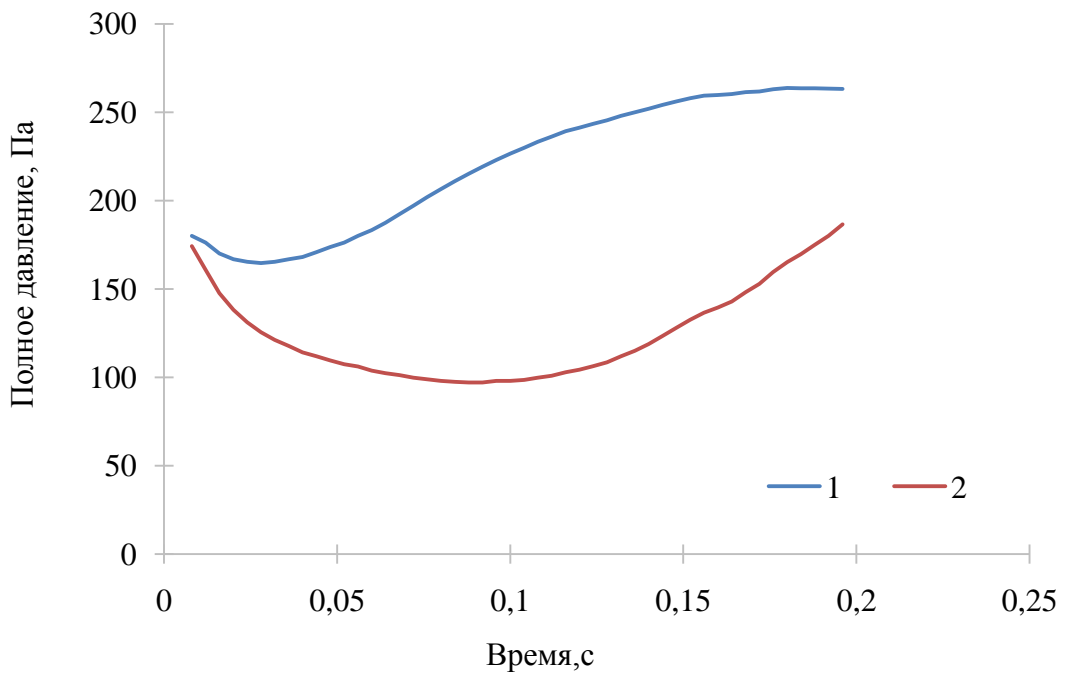


Рисунок 4.14 – Изменение полного давления: 1 - в точке А; 2 – в точке В

Анализируя графики на рисунке 4.14 характер изменения величины полного давления можно разделить на несколько стадий. В начале эксперименте происходит резкий скачек увеличения полного давления в точках А и В. В дальнейшем давление начинает уменьшаться. В точке А уменьшение происходит не продолжительное время, дальше давление начинает опять возрастать и достигает макси-

мального значения на 0,184 секунде, затем опять происходит уменьшение давления. Давление же в точке В после первого пика уменьшается продолжительное время, минимум был зафиксирован на 0,092 секунде сначала вычислений, а затем происходит постоянный рост величины давления. Можно сделать вывод, что процесс переформирования дна происходит в результате перепада давления, что согласуется с выводами, отмеченных в работе [103].

Был рассчитан градиент давления $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\gamma} \right)$ и построен график изменения градиента давления во времени, который представлен на рисунке 4.15.

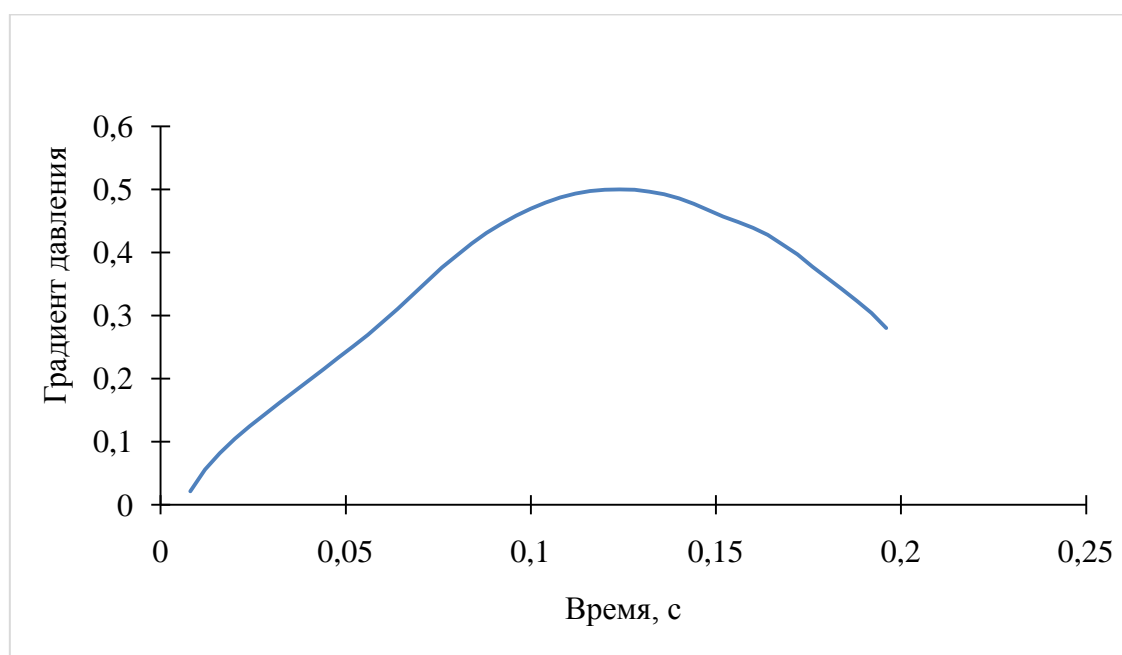


Рисунок 4.15 - Изменение градиента давления под цилиндром во времени

Сначала происходит резкое падение, а затем рост градиента давления до максимального значения 0,5. Далее градиент давления уменьшается. Характер изменения градиента давления согласуется с выводами, сделанными в работе [103].

В пяти поперечных сечениях, которые указаны на рисунке 4.16, были измерены продольные и вертикальные компоненты скорости.

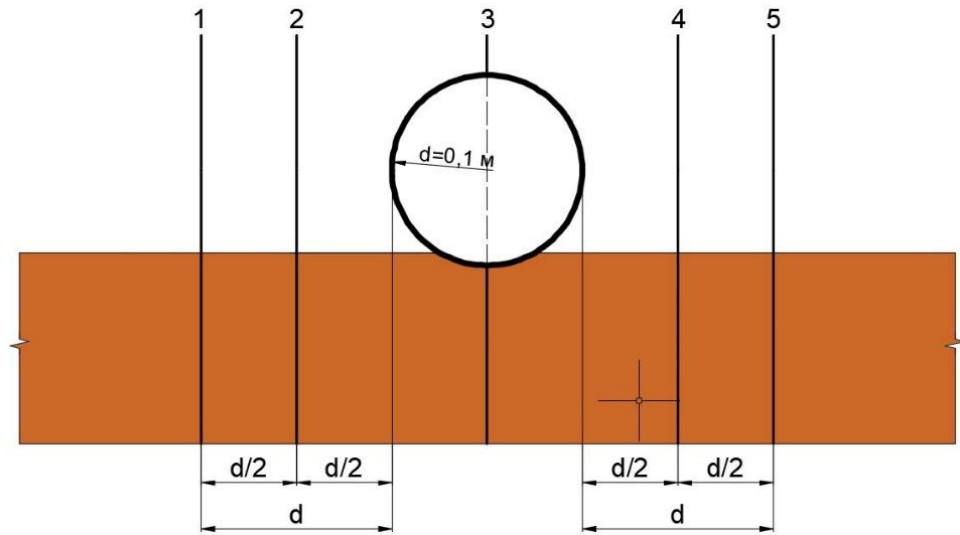
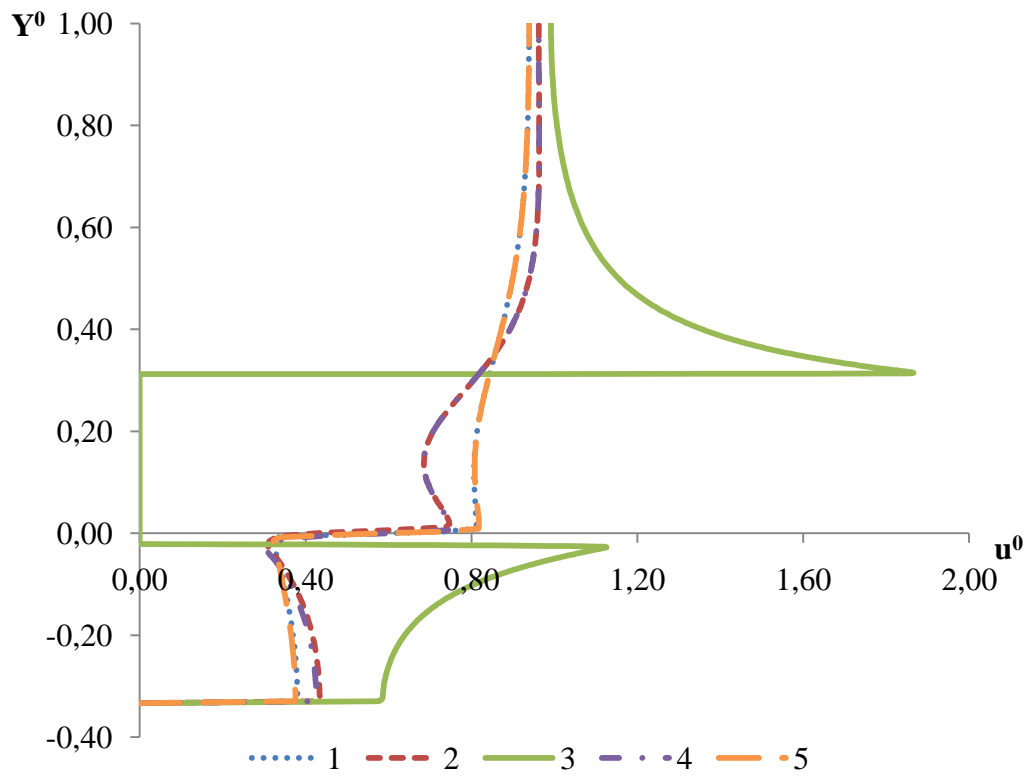


Рисунок 4.16 – Схема расположения поперечных сечений

(a)



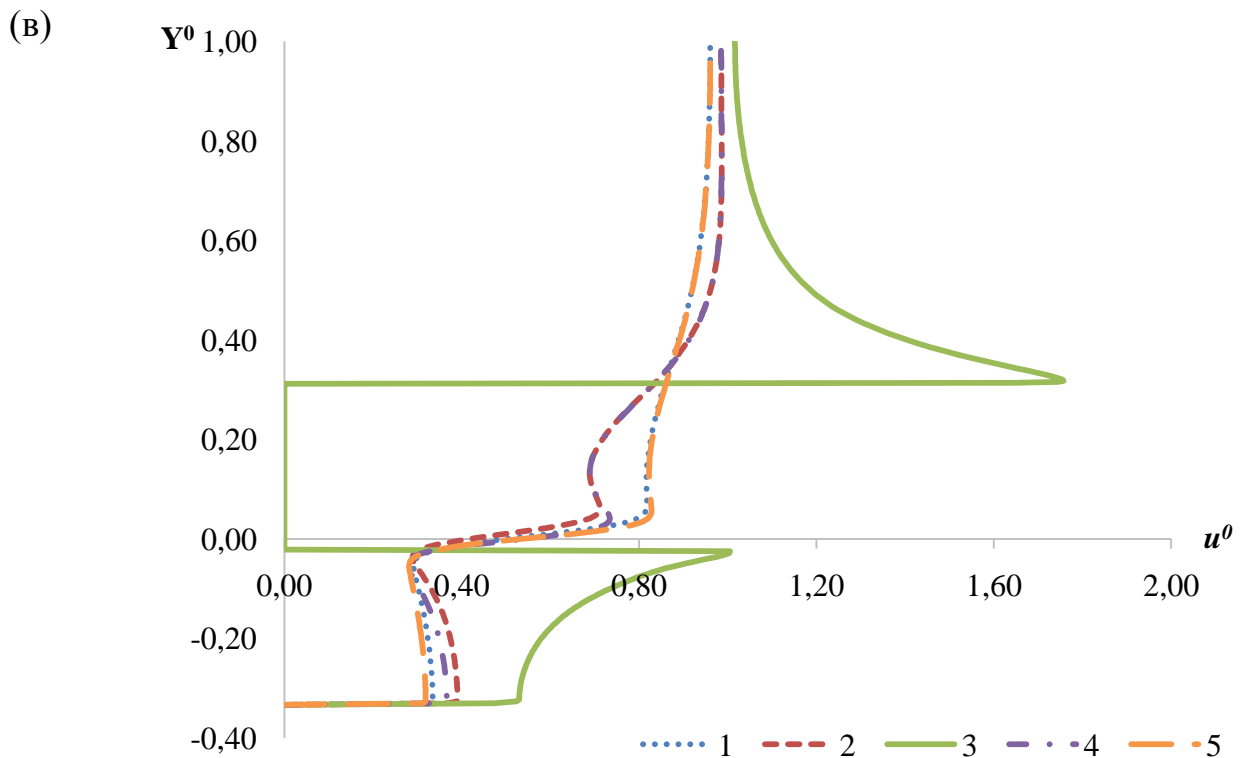
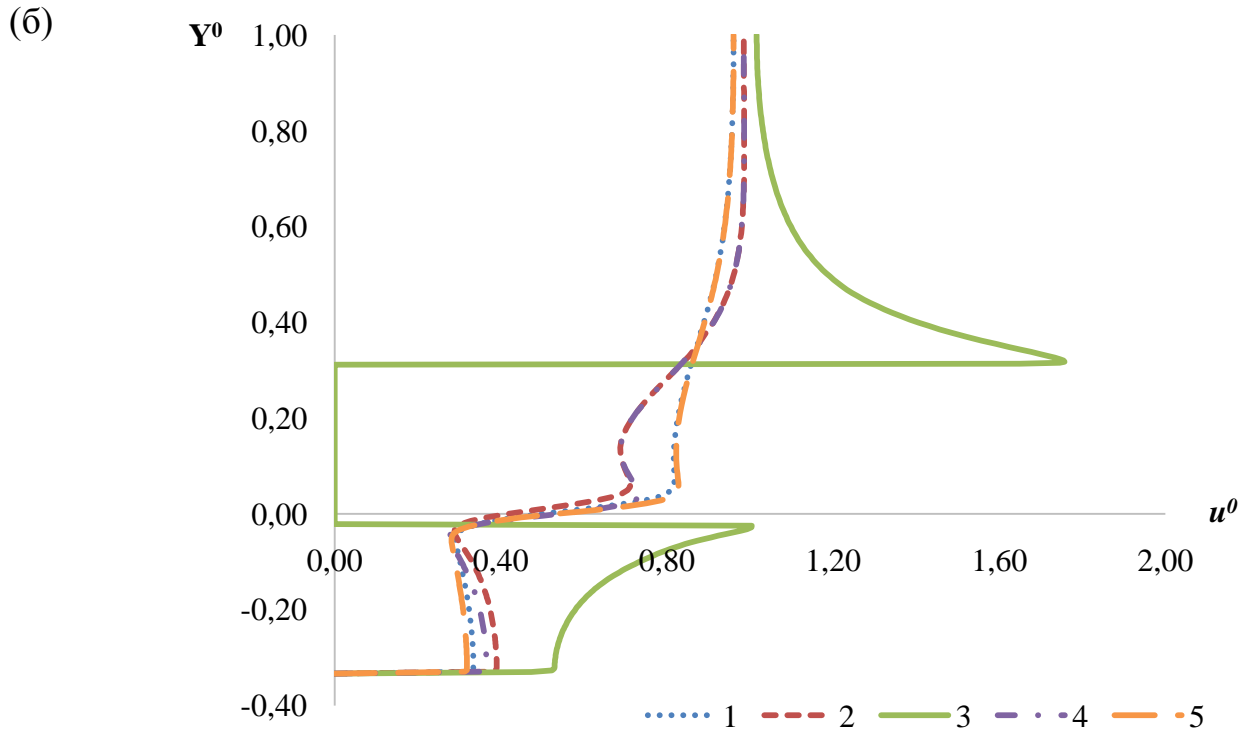
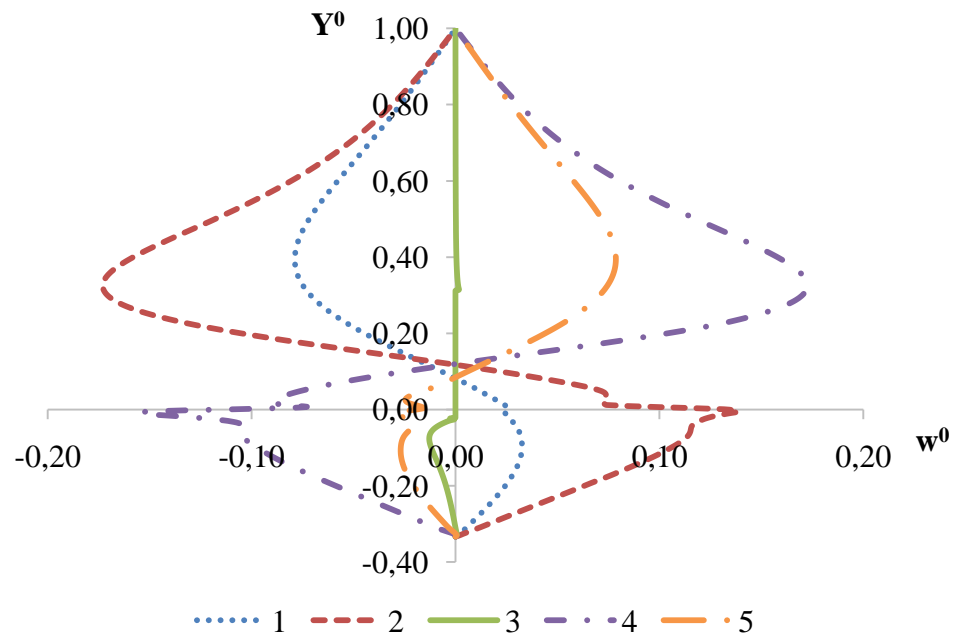


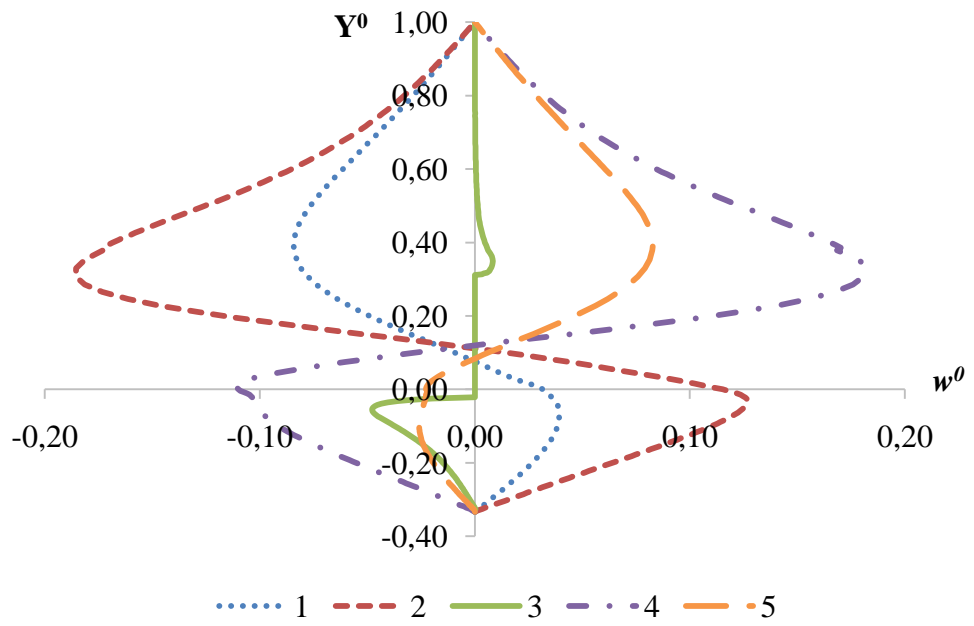
Рисунок 4.17 – Изменение профиля продольной u^0 компоненты скорости на момент времени: а – $t = 0,01$ с; б – $t = 0,1$ с; в – $t = 0,2$ с.

Как видно из рисунка 4.17 профили 1 и 4, а также профили 2 и 5 имеют одинаковые скорости. С течением времени наибольшие изменения скорости происходит в песчаном грунте.

(a)



(b)



(В)

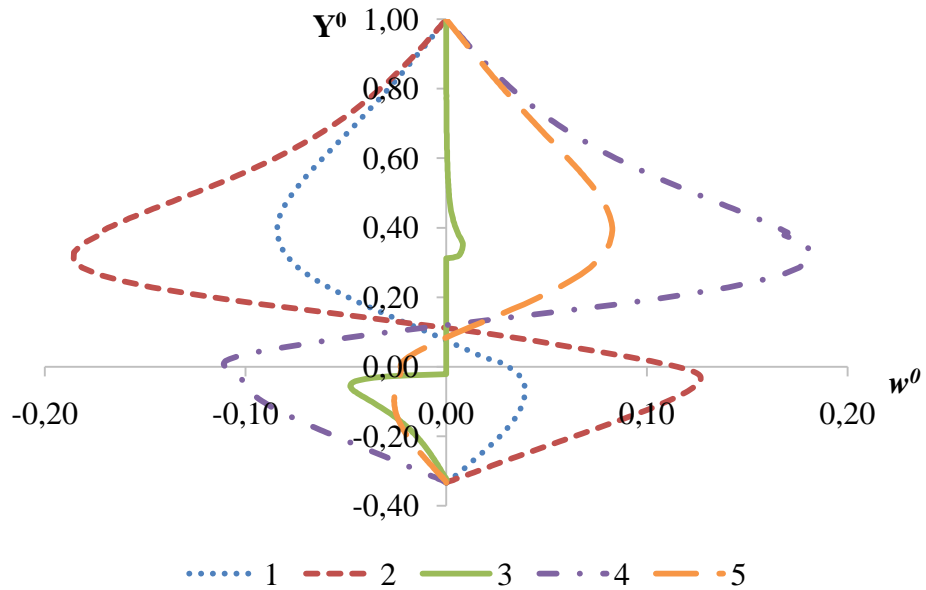


Рисунок 4.18 – Изменение профиля вертикальной w^0 компонент скорости на момент времени: а – $t = 0,01$ с; б – $t = 0,1$ с; в – $t = 0,2$ с.

Профиль скорости в третьем створе имеет тенденцию к увеличению (рисунок 4.18).

Был рассчитан параметр Шильдса. Параметр Шильдса (параметр вовлечения) для однородного материала с размером d и действующим на него придонным касательным напряжением τ , определяется как [21]

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_1 - \rho_0)gd}, \quad (4.53)$$

где τ – касательное напряжение;

ρ_1 – плотность твердых частиц, $\rho_1 = 1800 \text{ кг/м}^3$;

ρ_0 – плотность воды, $\rho_0 = 998,2 \text{ кг/м}^3$;

d – диаметр частиц, $d = 0,18 \text{ мм}$.

В таблице 4.3 представлены результаты расчета параметра Шильдса для двух серий расчетов экспериментов: без трубы (расчет 1) и с трубой (расчет 2).

Таблица 4.3 – Значения расчетного параметра Шильдса

Расчет	Time, с	Касательное напряжение, Па	Параметр Шильдса
На нижней стенке лотка			
1	0,01	0,043	0,03
1	0,1	0,059	0,04
1	0,2	0,106	0,075
На нижней стенке лотка			
2	0,01	0,074	0,052
2	0,1	0,078	0,055
2	0,2	0,09	0,064
На стенке трубы			
2	0,01	2,783	1,966
2	0,1	1,338	0,945
2	0,2	1,422	1,00

Если вычисленное значение параметр Шильдса превышает критическое значение ($\theta_{cr} = 0,05$) [97], то это говорит о том, что частицы приходят в движение. В расчете 1, когда цилиндр отсутствовал, в момент времени $t = 0,2$ с параметр Шильдса больше критического значения, а в расчете 2 параметр Шильдса превышает критическое значение при $t = 0,01$ с. Следовательно, процесс переформирования дна при наличии цилиндра наступает раньше, чем в случае отсутствия его, что согласуется с выводами [103]. Вследствие того, что вода просачивается под цилиндром и с напорного фронта частицы выносятся потоком, на стенке цилиндра, в месте ее соприкосновения с песчаным дном, касательные напряжения достаточно высокие, что приводит к тому, что параметр Шильдса превышает критическое значение, и начинается движение частиц песка.

4.6 Переформирования песчаного дна в зоне расположения одиночного цилиндра и двух цилиндров в 3-D постановке

4.6.1 Постановка задачи

Для построения исходной 3D-модели в интерфейсе модуля Design Modeler, была выбрана реальная установка лотка, описанная в п.3.1 (рисунок 3.1). Учтены все ее геометрические размеры и условия проведения экспериментов.

Рассматривались две схемы расположения цилиндров, имитирующих подводные трубопроводы. По первой схеме цилиндр располагался на поверхности песка, а по второй на поверхность песка укладывались два цилиндра, с расстоянием между осями, равном $2D$ (рисунок 4.19).

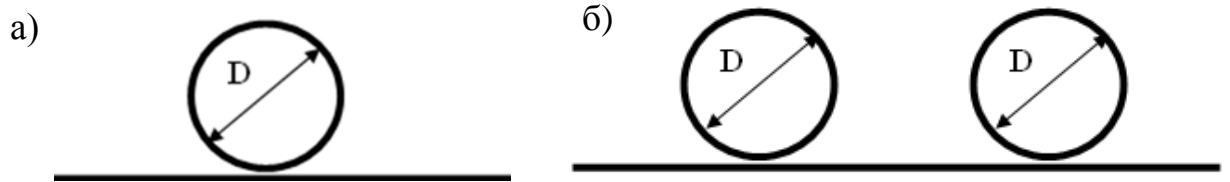


Рисунок 4.19 – Схемы проведенных экспериментов: а) эксперимент №1 - на поверхности дна один цилиндр, б) эксперимент №2 - на поверхности дна два цилиндра [37]

Построенная геометрическая модель показана на рисунке 4.20 и рисунке 4.21 с обозначением границ расчетной области.

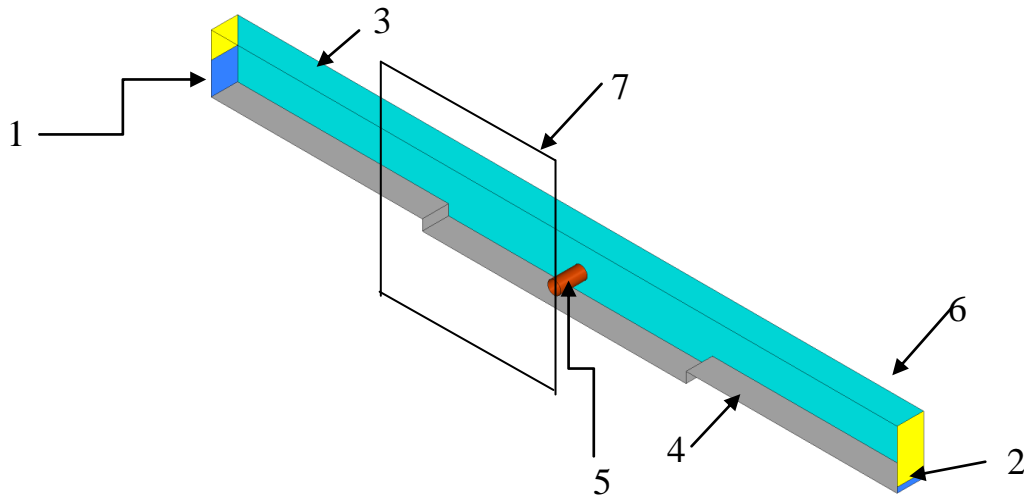


Рисунок 4.20 – Геометрическая модель лотка для эксперимента №1. Границы расчетной области: 1- входное отверстие; 2 - выходное отверстие; 3-верхняя граница; 4-дно лотка; 5-стенки трубы, 6 – задняя стенка лотка. 7 – фрагмент области

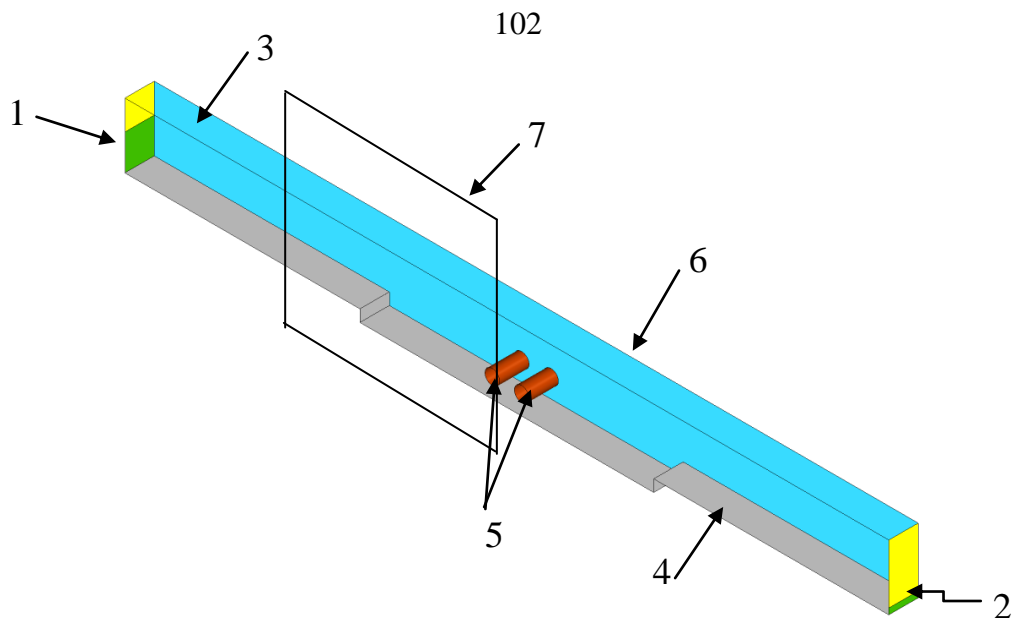


Рисунок 4.21 – Геометрическая модель лотка для эксперимента №2. Границы расчетной области: 1- входное отверстие; 2 - выходное отверстие; 3-верхняя граница; 4-дно лотка; 5-стенки трубы, 6 – задняя стенка лотка. 7 – фрагмент области

Для двух серий экспериментов были заданы следующие граничные условия:

1. На входе в расчетную область задана скорость воды $V = 0,14$ м/с.
2. На выходе задано статическое давление, равное 1 атм.
3. На твердых стенках (дно лотка, задняя стенка и стенки цилиндра) задано условие прилипания, шероховатость стенок не учитывалась.

Для решения задачи была построена многоблочная структурированная гексаэдральная сетка, с использованием модуля Meshing, фрагмент которой показан на рисунке 4.22. Сетка имеет сгущение к стенкам канала (bottom wall и wall back) и стенкам трубы (truba wall). Общее число гекса-элементов составило около 900000.

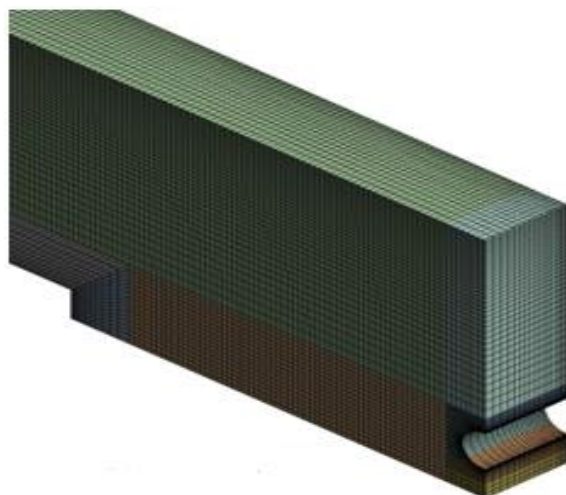


Рисунок 4.22 – Фрагмент расчетной сетки в области 7 на рисунке 4.16 и 4.17

Численное моделирование выполнено в RANS постановке, дополненных стандартной k-ε моделью турбулентности и уравнениями эйлеровой модели многофазности среды с учетом гранулярности фазы частиц. В данной задаче используются модели, аналогичные п. 4.5.2.

В ходе численного моделирования приняты следующие допущения: дно сложено из однородного песка с постоянным диаметром частиц; материал трубы не учитывался.

4.6.2 Результаты расчета

Для визуального представления об этапах развития процесса переформирования донного грунта были построены изоповерхности $\alpha = 0,01$ объемной концентрации песка в разные моменты времени для эксперимента №1 (рисунок 4.23 – 4.25) и эксперимента №2 (Рисунок 4.26 – 4.28) [37].

Через 0,3 секунды с начала проведения эксперимента №1, происходит размыв песка под цилиндром и образование донных гряд с напорных и толковых частей (рисунок 4.23) [37].

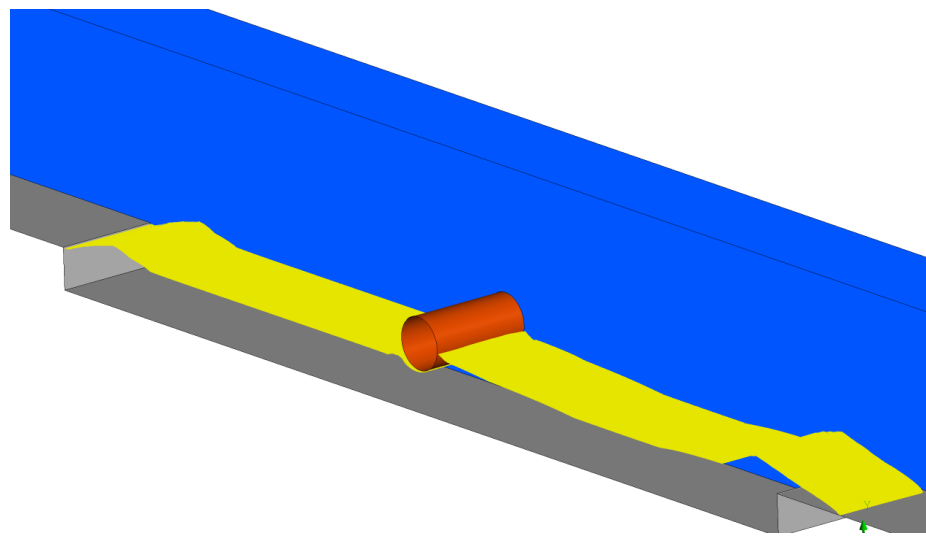


Рисунок 4.23 – Образование полости под цилиндром ($t = 0,3$ с)

Через несколько секунд гряда достигает цилиндра, и он оказывается полностью засыпан песком (рисунок 4.24). Процесс происходит очень интенсивно [37].

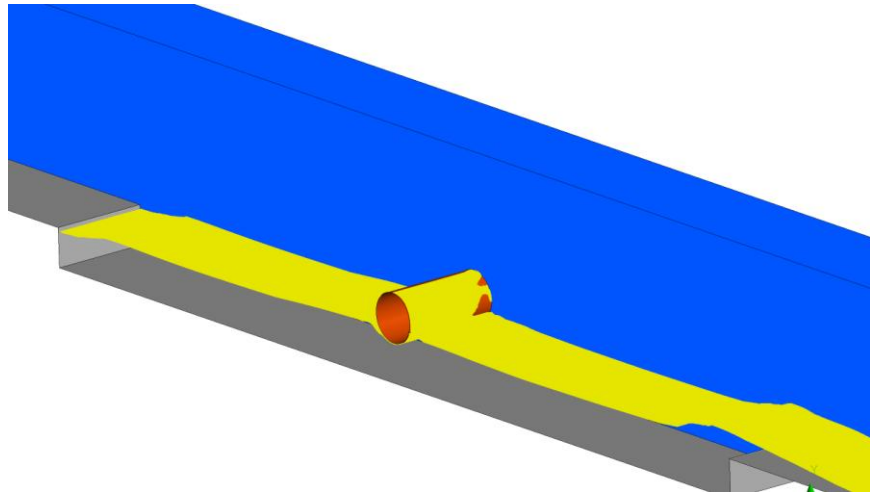


Рисунок 4.24 – Гряда достигла цилиндр ($t = 10$ с)

Далее гряда продолжает перемещаться вдоль лотка, цилиндр вновь обнажается и под ним образуется сквозная полость (рисунок 4.25).

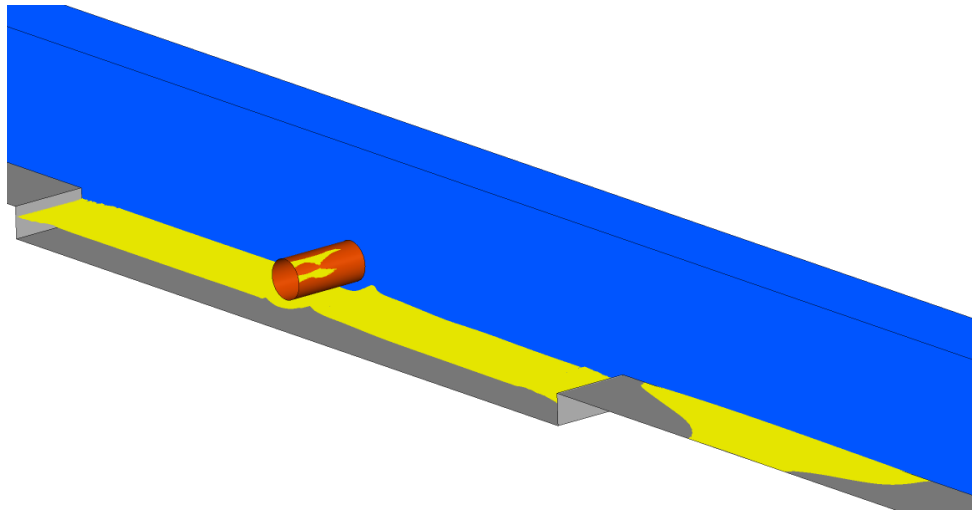


Рисунок 4.25 – Образование сквозной полости под цилиндром ($t = 60$ с)

Размыв песка под первым цилиндром в эксперименте №2 был зафиксирован уже спустя 0,3 секунды с начала проведения исследования (рисунок 4.26) [37].

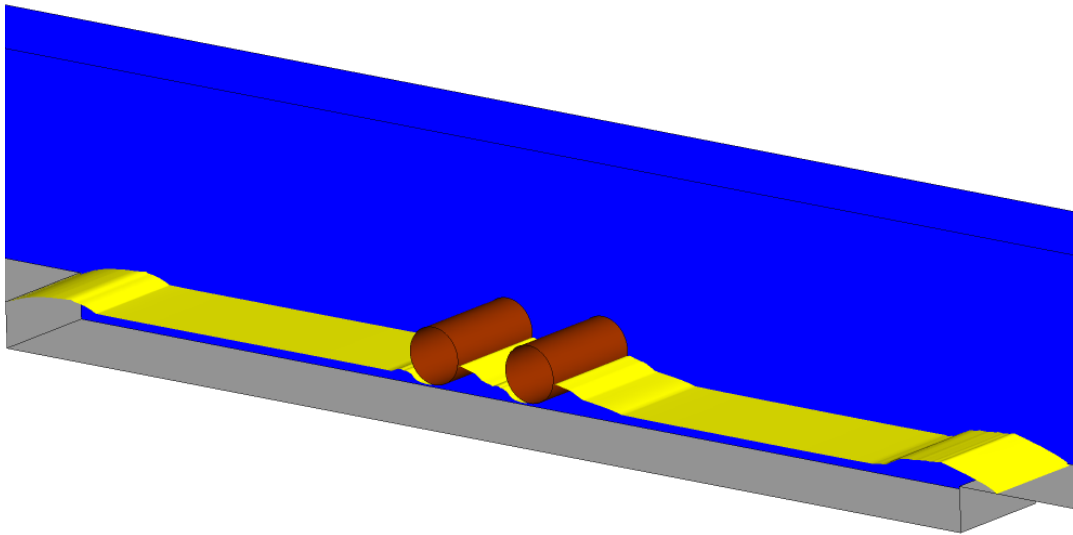


Рисунок 4.26 – Подмыв первого цилиндра ($t = 0,3$ с)

На десятой секунде видно, что увеличивается размер донной гряды с тыловой части цилиндров (рисунок 4.27). Ярко выраженная разнородная структура поверхности донного рельефа подтверждает общий тезис о генерации отдельных размывов под цилиндром не синхронно и по всей длине цилиндра, а локально под действием местных мелкомасштабных возмущений [37].

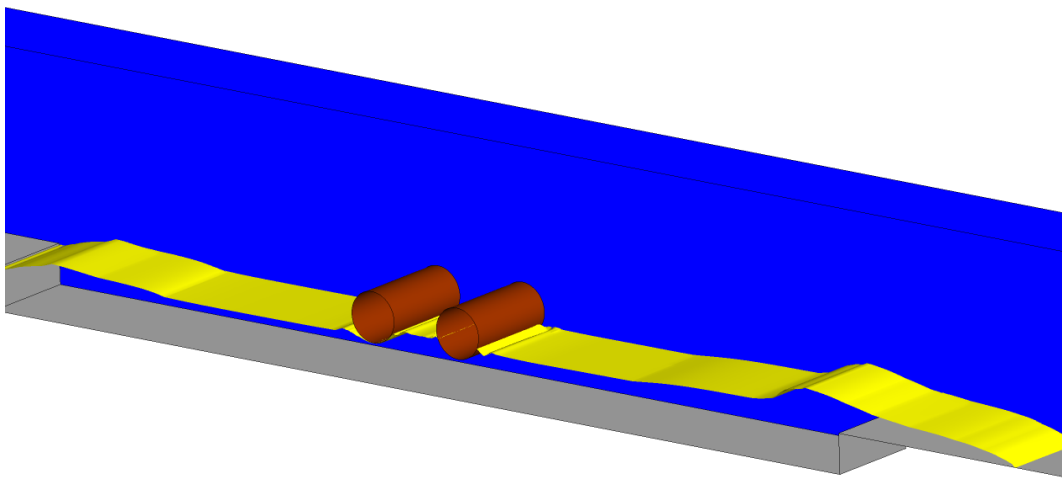


Рисунок 4.27 – Увеличивается размер донной гряды с тыловой части цилиндров ($t = 10$ с)

Через 60 секунд с начала проведения эксперимента №2 второй цилиндр обнажился, а под первым увеличивается глубина ямы размыва (рисунок 4.28)

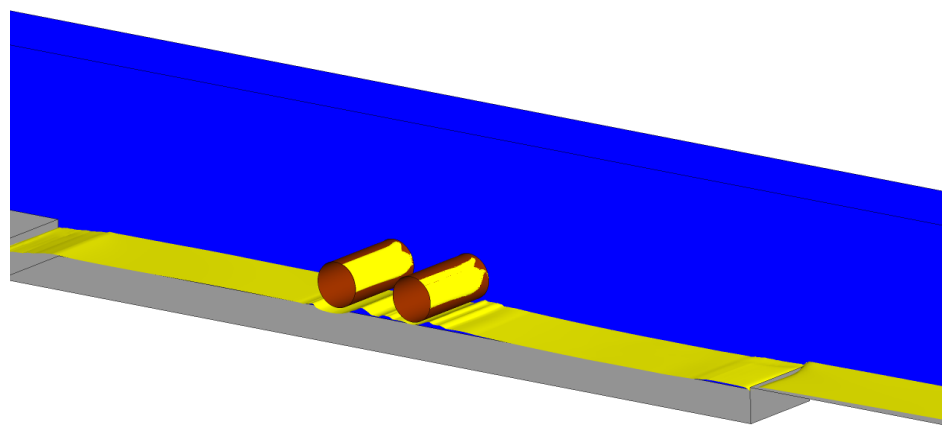
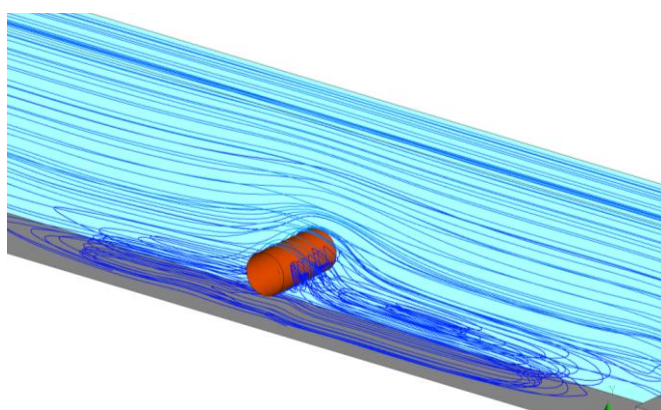
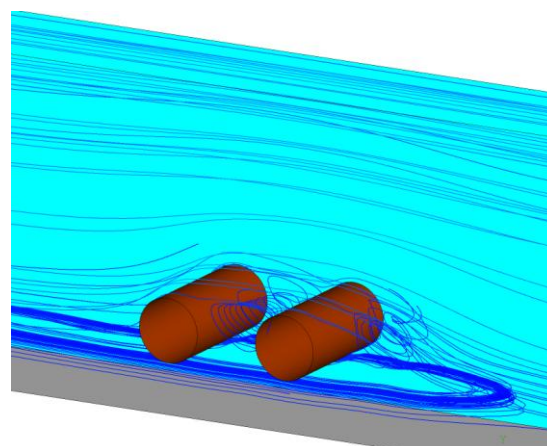


Рисунок 4.28 – Увеличивается размер донной гряды с тыловой части цилиндров ($t = 60$ с)

Следующая серия рисунков показывает образование вихрей, показанных с помощью линий тока. Вихри, которые формируются перед трубой (рисунок 4.29а) и между двумя трубопроводами (рисунок 4.29б), могут поспособствовать процессу размыва [37].



(а)



(б)

Рисунок 4.29 – Образование вихревой области для эксперимента №1 (а) и эксперимента №2 (б)

Для того, чтобы оценить изменение координат изоповерхности $\alpha = 0,01$ объемной концентрацией песка по длине лотка в случае одного цилиндра на поверхности песка (Рисунок 30а) и двух цилиндров (Рисунок 30б).

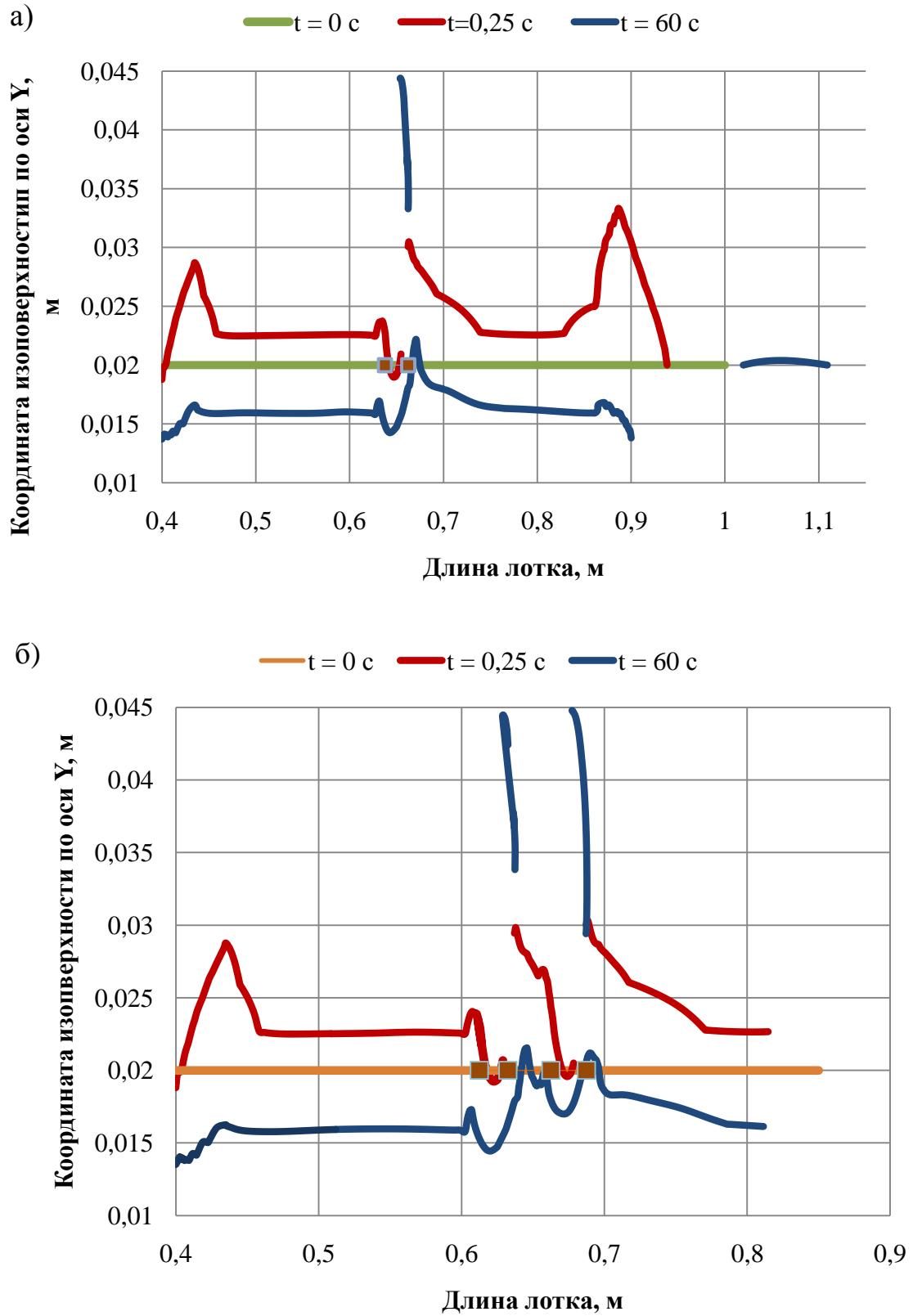


Рисунок 4.30 – Изменение вертикальной координаты изоповерхности $\alpha = 0,01$ во времени по длине лотка: а) для эксперимента №1, б) для эксперимента №2

В случае одного цилиндра (Рисунок 4.30а) через 0,25 секунды с начала проведения эксперимента наблюдается процесс выноса частиц песка из-под цилиндра и образованием донных гряд высотой $8,7 \cdot 10^{-3}$ м с напорной стороны и $1,33 \cdot 10^{-2}$ м с тыловой. При $t = 60$ с максимальная глубина ямы размыва составляет $5,68 \cdot 10^{-3}$ м.

При расположении двух цилиндров (Рисунок 4.30б) на момент времени $t = 0,25$ с наблюдается образование гряды перед первым цилиндром с высотой $8,7 \cdot 10^{-3}$ м (рисунок 4.30б). При $t = 60$ с глубина ямы размыва под первым цилиндром составляет $5,46 \cdot 10^{-3}$ м, а под вторым $3 \cdot 10^{-3}$ м.

В ходе численного эксперимента наблюдался вынос частиц из расчетной области. На рисунке 4.31 показано изменение массы песка в расчетной области во времени. На интервале времени от $t=0$ с до $t=50$ секунд 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 [37].

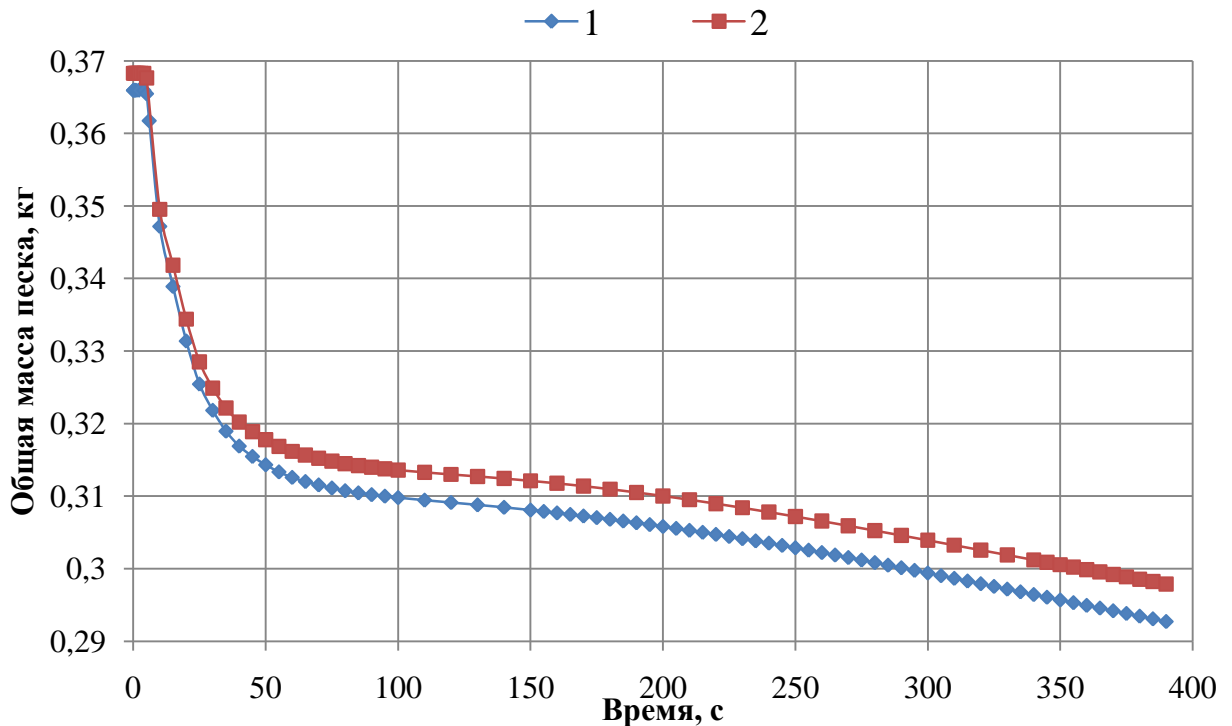


Рисунок 4.31 – График изменения общей массы песка от времени. 1 – эксперимент с двумя цилиндрами; 2- эксперимент с одним цилиндром

При сравнении численного моделирования и физических экспериментов, описанных в п.3.1, 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 $k-\varepsilon$ 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 расположения 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 распространение разработанной методики на реальные объекты подводных трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Власов Б.Н., Сергеев О.Н., Старцев Ю.П. Опыт экологического сопровождения проектирования и строительства магистральных газопроводов // Вузовская наука – региону. Вологда. 2005. С. 6-9.
2. Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Сергеев О.Н., Турыкин Л.А. Безопасность строительства и эксплуатации трубопроводного транспорта на участках переходов через реки // Вузовская наука – региону. Вологда. 2005. С. 9-12.
3. Алтунин С.Т. Регулирование русел рек. М.: Сельхозгиз, 1962, 27 с.
4. Барышников Н.Б. Антропогенное воздействие на русловые процессы. Л.: Изд-во ЛГМИ, 1990. 140 с.
5. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2001. 108 с.
6. Беркович К.М. Переформирования русла на подводных переходах магистральных трубопроводов через реки и мониторинг русловых процессов // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. Вып.15. 2005.
7. Беркович К.М., Зорина Е.Ф., Литвин Л.Ф., Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое состояние и кризисные изменения эрозионно-русловых систем России под влиянием антропогенных нагрузок // География. Университеты России. Том. 1. М.: Изд-во МГУ, 1993. С. 216-223.
8. Беркович К.М., Кирик О.М., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Чернов А.В. Опасные проявления русловых процессов (на примере рек России) // Вестник МГУ. Серия 5. География. 1996. №3. С. 35-41.
9. Беркович К.М., Сергеев О.Н. Влияние прокладки магистральных трубопроводов на русловые процессы и экологическое состояние малых рек // Труды академии проблем водохозяйственных наук. Вып.11. Русловедение и восстановление водных объектов. М.: Географический факультет МГУ. 2006.
10. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение. М.: ГЕОС. 2000.

11. Боровков, В. С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях / В. С. Боровков. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. 287 с
12. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов, М., «Недра», 1977. С. 407
13. Бриллиантов А.Н., Глотко А.В., Жуков Г.Д., Каргаполова И.Н. Размывы трубопроводов в верхних бьефах гидроузлов. Гидротехника. 2010. № 2 (19). С.41-43.
14. Букреев В.И., Зыков В.В., Дегтярев В.В. Силовое воздействие волны прорыва на трубопровод // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. № 1 (589). С. 57-61.
15. Валов А.О., Дегтярев В.В., Федорова Н.Н. Численное моделирование волны прорыва в каналах с помощью ПК ANSYS // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2018. Т. 21. № 3 (69). С. 47-56.
16. Ван Дайк, М. Альбом течений жидкости и газа // Москва : Мир. 1986. 113 с.
17. Васильев Н.П., Кукушкин Б.М. Предупреждение и защита подводных переходов от размыва и повреждений. // Проектирование и строительство трубопроводов и газонефтепромысловых сооружений. 1970. № 12. С. 67.
18. Васильченко Г.В. Исследование связи между турбулентными характеристиками потока в придонной области и подстилающем его несвязном грунте // В кн.: Динамика и термика рек. М.5. 1973. С. 118-126
19. Великанов М.А. Русловой процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 395 с.
20. ВСН 163-83. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов) [Текст]/ – Л.: Гидрометеиздат, 1985, 143 с.
21. **Гармакова М.Е.** Верификация математической модели перестроения песчаного дна на участке расположения подводного трубопровода // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 2 (758). С. 67-79.

22. **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.

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

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

25. 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.

26. **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.

27. **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.

28. **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.

29. **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.

30. Гидродинамика природных и техногенных катастроф : монография / В.И. Букреев, В.В. Дегтярев, А.В. Чеботников, В.А. Шлычков, А.П. Яненко; под

ред. д-ра техн. наук В.В. Дегтярева; Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2018. – 240 с.

31. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков, JL: Гидрометеиздат, 1962, 374 с.

32. Гришанин К.В. Динамика русловых процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1979, 312 с

33. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. – М.: Транспорт, 1990.

34. Гришанин К.В. Устойчивость русел рек и каналов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 144 с.

35. Груздев А.А., Талалушкин Л.А., Самойленко С.А. Повышение надежности и экологической безопасности подводных переходов магистральных нефтепроводов в ОАО «Верхневолжскнефтепровод» // ТГН. – 1999. – № 9. – С.14 – 15.

36. Дегтярев В.В. Ершова Е.Е. К вопросу о постановке граничных условий при численном моделировании открытых потоков в недеформируемом русле // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 2-3 (650-651). С. 54-59.

37. 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.

38. 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.

39. Дегтярев В.В., Чеботников А.В. Поле скорости обтекания при обтекании цилиндра, расположенного вблизи дна потока со свободной поверхностью // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 10 (634). С. 92-98.

40. Дегтярев В.В., Шлычков В.А. Лабораторное и теоретическое исследование динамики размыва речного дна вблизи подводного перехода // Гидротехническое строительство. 2013. №8. С. 21-27.

41. Дейс В. А. Прогнозирование русловых процессов на участке подводных переходов трубопроводов и методы их защиты от размыва. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ВНИИГиМ. 2003.

42. Долгов И.А. Методы гидротехнической защиты подводных переходов трубопроводов от размыва. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: ВНИИГиМ. 2001.

43. Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 191 с.

44. Иерархия моделей турбулентности [Электронный ресурс]. – Режим доступ: https://bstudy.net/876634/tehnika/ierarhiya_modeley_turbulentnosti - Заглавие с экрана. – (дата обращения: 03.03.2022).

45. Кантаржи И.Г., Гогин А.Г. Устойчивость подводного трубопровода при воздействии течения и волн // Гидротехническое строительство. 2021. №4. С. 28-34.

46. Коллектив авторов (под редакц. Близняка Е.В. и Российского К.И. Основы методики расчета русловых процессов, вызываемых на реках искусственным изменением их режима. В кн.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 6.-М.: АН СССР. 1956. С. 118-127.

47. Кукушкин Б.М. Исследование влияния гидроморфологических факторов на размыв подводных трубопроводов в условиях равнинных рек и пути совершенствования методов изысканий, проектирование и контроля на переходах // Строительство магистральных трубопроводов и газонефтепромысловых сооружений. 1967. 113 с.

48. Леви И.И. Динамика русловых потоков. М-Л.: Госэнергоиздат, 1957, 252 с.

49. Левин С.И. Предупреждение аварий и ремонт подводных трубопроводов. – М.: Гостоптехиздат, 1963. 106 с.

50. Мазур, И.И. Безопасность трубопроводных систем [Текст] / И.И. Мазур, О.М. Иванцов. – М.: Елима, 2004. – 1104 с.

51. Мальцев В.С. Ремонт подводных трубопроводов // Материалы совещания «Создания, модификация технических средств для приборного обслуживания подводных трубопроводов, рассмотрение и выбор прогрессивных технологий ремонта и реконструкции подводных переходов». 1994. С. 60-68.

52. Медведев С. С. Формирование русел каналов саморазмывов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук М.: 1989, 243 с.

53. Милитеев А.Н., Базаров Д. Р. Математическая модель для расчета двумерных (в плане) деформаций русел // Водные ресурсы. Т. 26. № 1. 1999. С. 22 – 26.

54. Мирцхулава Ц. Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости / Ц. Е. Мирцхулава. – М. : Колос, 1967. 179 с.

55. Многофазность [Электронный ресурс]. – Режим доступ: <https://bstudy.net/876641/tehnika/mnogofaznost> - Заглавие с экрана. – (дата обращения: 03.03.2022).

56. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика : в 2 ч. 1965. – Ч. 1. – 641 с. ; 1967. – Ч. 2. – 720 с.

57. Пережогин Ю.Д., Ратнер А.Г., Спектор Ю.И. Исследования местного размыва и стабилизации дна в створе подводного трубопровода // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 1998. № 1. С. 81-87.

58. Подходы к моделированию многофазных смесей [Электронный ресурс]. – Режим доступ: https://bstudy.net/876642/tehnika/podhody_modelirovaniyu_mnogofaznyh_smesey - Заглавие с экрана. – (дата обращения: 03.03.2022).

59. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1951. – 576 с.

60. Россинский К.И., Кузьмин И. А. Балансовый метод расчета деформаций дна потока. Труды Гидропроекта, сб.ХII. 1964. С. 265-271.

61. Румянцев И.С. Натурные исследования переформирования поперечного сечения подводных русловых траншей. В сб. научн. тр. МГМИ "Вопросы гидравлики". М.: 1970, вып.2. С. 10-15.
62. Сергеев О.Н. Физико-географические подходы к изучению русловых процессов на участках подводных переходов магистральных трубопроводов через реки таежной зоны. Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Ярославль. Изд-во ЯГУ. 2006.
63. СП 11-103-97 «Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства»
64. СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы»
65. Таунсенд, А. А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом / А. А. Таунсенд. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1959. – 399 с.
66. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. №3. С. 109-131.
67. Уизем, Дж. Линейные и нелинейные волны / Дж. Уизем. – Москва : Мир, 1977. – 622 с.
68. Хачатрян А.Г. Отстойники на оросительных системах. М.: Сельхозгиз, 1957, с. 9-332.
69. Чеботников А.В. Осредненные скорости жидкости в окрестности цилиндра, обтекаемого турбулентным потоком в открытом канале. Эксперимент // Прикладная механика и техническая физика. 2012. № 6 (316). С. 49-57.
70. Шапиро Х.Ш. Регулирование твердого стока при водозаборе в оросительные системы. М.: Колос, 1983. 272 с.
71. Шлихтинг, Г. М. Теория пограничного слоя / Г. М. Шлихтинг. – Москва : Наука, 1974. 712 с.
72. Шлычков В.А. Численная модель взвесенесущего потока для Новосибирского водохранилища // Вычислительные технологии. 2010. С. 111-121.
73. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.

74. Штеренлихт Д.В. Воздействие внешнего потока на параллельные трубопроводы // Строительство трубопроводов. 1969. №6.

75. Штеренлихт Д.В. Воздействие внешнего потока на трубопроводы на участках переходов // Строительство трубопроводов. 1963. №1.

76. Штеренлихт Д.В. Исследование русловых процессов деформаций в створе подводных переходов // Тезисы и аннотации второй межвузовской конференции "Движение наносов и гидравлический транспорт". 1968.

77. Штеренлихт Д.В. Некоторые вопросы взаимодействия набегающего потока и трубопроводов. // В сб. научн. трудов "Гидравлические условия работы подводных трубопроводов" МГМИ, 1969.

78. Brørs, B. Numerical modelling of flow and scour at pipelines // J. Hydraul. Engrg., ASCE, 1999, 125 (5), Pp. 511-523

79. 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.

80. Drew, D.A., Lahey, R.T. In Particulate Two-Phase Flow // Butterworth-Heinemann, 1993, pp. 509–566.

81. **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.

82. **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.

83. Hansen, E. A., Fredsøe, J., Ye, M. Two-dimensional scour below pipelines // Proc., 5th ISOPE, ASME, 1986, pp. 670-678.

84. Huser, A., Biringen, S. Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow in a Square Duct // Journal of Fluid Mechanics, 1993, 257, P. 65–95.

85. Johnson, P. C., Jackson, R. Frictional-Collisional Constitutive Relations for Granular Materials, with Application to Plane Shearing // J. Fluid Mech, 1987, 176, P. 67–93.

86. Karman, Th. von. Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt / Th. von Karman // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. – 1911. – S. 509 – 517.
87. Kjeldsen, S. P., Gjørsvik, O., Bringaker, K. G., and Jacobsen, J. Local scour near offshore pipelines // Proc., 2nd Int. Conf. on POAC, 1973, pp. 308-331.
88. Le, H., Moin, P., Kim, J. Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over a Backward-Facing Step // Journal of Fluid Mechanics, 1997, 330, P. 349–374.
89. Leeuwenstein, W., Wind, H. G. The computation of bed shear in a numerical model // Proc., 19th Int. Conf. on Coastal Engrg, ASCE, 1984, pp. 1685-1702.
90. Li, F., Cheng L. Prediction of lee-wake scouring of pipelines in currents // J., Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg, ASCE, 2001, 127 (2), pp. 106-112.
91. Li, F., Cheng, L. Modeling of local scour below a sagging pipeline // Coastal Engrg, 2003, 45 (2), pp. 189-210.
92. Li, F., Cheng, L. Numerical Model for Local Scour Under Offshore Pipelines // J. Hydraul. Engrg., ASCE, 1999, 125 (4), pp. 400-406.
93. Lun, C. K. K., Savage, S. B., Jeffrey, D. J., Chepurniy, N. Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field // J. Fluid Mech, 1984, 140. P. 223–256.
94. Mao, Y. Seabed scour under pipelines // Proc. 7th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1988, 1, P. 33 – 38.
95. Moraga, F.J., Bonetto, R.T., Lahey, R.T. Lateral forces on spheres in turbulent uniform shear flow // International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25, P. 1321–1372.
96. Na, Y., Moin, P. Direct Numerical Simulation of a Separated Turbulent Boundary Layer // Journal of Fluid Mechanics, 1998, 370, P. 175–201.
97. Nielsen, P. Coastal bottom boundary layers and sediment transport // World scientific. 1992. Vol. 4.
98. Rai, M.M., Moin, P. Direct Simulation of Turbulent Flow Using Finite Difference Schemes // Journal of Computational Physics, 1991, 96, P. 15.

99. Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J. A New k - ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation // *Computers Fluids*, 1995, 24 (3), P. 227–238.
100. Simonin, O., Violette, P. L. Modeling of Turbulent Two-Phase Jets Loaded with Discrete Particles // *Phenomena in Multiphase Flows*, 1990, P. 259–269.
101. Spalart, P. R. Direct Simulation of a Turbulent Boundary Layer up to $R = 1410$ // *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, 187, P. 61–98.
102. Strouhal, V. Über eine besondere Art der Tonerregung // *Annalen der Physik und Chemie*, 1878, V, pp. 216 – 251.
103. Sumer B.M., Truelsen C., Sichmann T., Fredsøe J. Onset of scour below pipelines and self-burial // *Coastal Engineering*. 2001. Vol. 42. P. 313-335.
104. Sumer, B. M., Fredsøe, J. Wave scour around a large vertical circular cylinder // *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. ASCE, 2001, 127, N 3, P. 125 – 134.
105. Syamlal, M., O'Brien, T. J. Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed // *AIChE Symp. Series*, 1989, 85, P. 22–31.
106. Tritton, D. J. Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers // *J. Fluid Mech*, 1959, 6, N 4, P. 547 – 567.
107. van Beek, F. A., Wind, H. G. Numerical modeling of erosion and sedimentation around pipelines // *Coastal Engrg*, 1990, 14 (2), 107-128.
108. Van Rijn L. C. Applications of sediment pickup function // *J. Hydraulic Eng*. ASCE, 1986, 112, No 9, P. 867 – 874.
109. Williamson, C. H. K. Vortex Dynamics in the Cylinder Wake // *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1996, 28, P. 477 – 539.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Сравнение средних продольных и вертикальных компонентов скоростей

Таблица А.1 – Сравнение средней продольной u^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = 0,35$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $u_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $u_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение $\Delta = \left \frac{u_{\text{эксп}}^0 - u_{\text{чис.мод.}}^0}{u_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	1,22	1,15	6,4
2	0,04	1,24	1,24	0,1
3	0,05	1,25	1,24	1,3
4	0,07	1,30	1,24	5,3
5	0,08	1,32	1,24	6,7
6	0,10	1,33	1,23	7,6
7	0,12	1,33	1,23	8,1
8	0,13	1,33	1,23	7,9
9	0,16	1,31	1,20	9,1
10	0,18	1,26	1,15	9,7
11	0,21	1,12	1,03	9,3
12	0,24	0,76	0,71	7,5
13	0,28	0,43	0,39	9,6
14	0,29	0,34	0,32	8,8
15	0,31	0,22	0,21	9,6
16	0,33	0,18	0,17	7,4
17	0,34	0,14	0,13	6,0
18	0,36	0,11	0,12	8,6
19	0,37	0,11	0,11	9,0
20	0,39	0,14	0,15	7,2
21	0,41	0,23	0,26	9,6
22	0,42	0,30	0,33	9,8
23	0,46	0,58	0,63	7,9
24	0,47	0,70	0,75	7,0
25	0,49	0,93	0,98	5,5
26	0,52	1,09	1,16	5,6
27	0,54	1,20	1,17	2,8
28	0,57	1,26	1,17	7,2
29	0,58	1,27	1,17	8,4
30	0,60	1,28	1,17	9,1
31	0,62	1,28	1,17	9,1
32	0,63	1,28	1,17	9,1
33	0,65	1,27	1,17	8,9
34	0,69	1,27	1,16	9,1
35	0,71	1,27	1,16	9,3

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5
36	0,75	1,26	1,16	9,1
37	0,77	1,25	1,16	8,2
38	0,81	1,25	1,15	8,1
39	0,83	1,24	1,15	8,1
40	0,86	1,24	1,15	7,9

Таблица А.2 – Сравнение средней продольной u^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = 0,23$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $u_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $u_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение
				$\Delta = \left \frac{u_{\text{эксп}}^0 - u_{\text{чис.мод.}}^0}{u_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	1,27	1,29	1,6
2	0,04	1,29	1,32	2,1
3	0,05	1,30	1,32	1,2
4	0,07	1,36	1,33	2,6
5	0,08	1,38	1,33	3,9
6	0,10	1,40	1,34	4,1
7	0,11	1,41	1,35	4,6
8	0,12	1,42	1,36	5,1
9	0,13	1,44	1,37	4,8
10	0,16	1,45	1,39	4,3
11	0,17	1,43	1,37	4,3
12	0,19	1,29	1,32	2,1
13	0,21	1,14	1,07	6,3
14	0,22	0,95	1,05	9,3
15	0,23	0,74	0,82	9,3
16	0,24	0,55	0,61	9,1
17	0,25	0,38	0,40	5,3
18	0,27	0,25	0,27	8,4
19	0,28	0,15	0,16	9,4
20	0,29	0,06	0,07	9,3
21	0,31	-0,08	-0,08	9,5
22	0,33	-0,13	-0,12	9,1
23	0,34	-0,17	-0,16	8,0
24	0,36	-0,18	-0,18	2,8
25	0,37	-0,17	-0,16	8,7
26	0,39	-0,14	-0,13	9,2
27	0,41	-0,02	-0,02	6,3
28	0,42	0,05	0,06	8,4
29	0,43	0,18	0,19	7,4
30	0,45	0,31	0,35	9,6

Продолжение таблицы А.2

1	2	3	4	5
31	0,46	0,47	0,52	9,7
32	0,47	0,65	0,70	6,6
33	0,48	0,85	0,90	5,6
34	0,49	1,01	1,00	0,7
35	0,51	1,15	1,25	8,0
36	0,53	1,33	1,40	5,0
37	0,54	1,37	1,39	1,3
38	0,57	1,40	1,35	3,4
39	0,58	1,40	1,33	4,7
40	0,59	1,40	1,32	5,7
41	0,60	1,38	1,31	5,6
42	0,62	1,38	1,29	6,7
43	0,63	1,37	1,29	6,2
44	0,65	1,34	1,27	5,5
45	0,69	1,30	1,24	4,7
46	0,71	1,29	1,23	4,7
47	0,75	1,28	1,22	5,1
48	0,77	1,26	1,21	4,5
49	0,81	1,25	1,20	4,6
50	0,83	1,25	1,19	5,2
51	0,86	1,26	1,19	5,8

Таблица А.3 – Сравнение средней продольной u^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = 0,175$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $u_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $u_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение $\Delta = \left \frac{u_{\text{эксп}}^0 - u_{\text{чис.мод.}}^0}{u_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	1,31	1,32	1,0
2	0,04	1,32	1,34	1,2
3	0,05	1,33	1,34	0,4
4	0,07	1,38	1,35	2,8
5	0,08	1,40	1,35	3,4
6	0,10	1,41	1,37	3,4
7	0,11	1,42	1,37	3,6
8	0,12	1,45	1,38	4,6
9	0,13	1,46	1,39	5,3
10	0,14	1,48	1,40	6,2
11	0,16	1,49	1,42	4,7
12	0,17	1,48	1,43	3,6
13	0,18	1,43	1,41	1,6
14	0,19	1,32	1,39	4,9

Продолжение таблицы А.3

1	2	3	4	5
15	0,21	1,13	1,16	2,4
16	0,22	0,90	1,00	9,8
17	0,23	0,66	0,72	8,6
18	0,24	0,44	0,47	6,0
19	0,25	0,27	0,30	8,9
20	0,27	0,16	0,15	7,8
21	0,28	0,09	0,08	7,9
22	0,29	0,04	0,04	5,6
23	0,30	-0,02	-0,02	9,4
24	0,31	-0,07	-0,07	8,9
25	0,33	-0,10	-0,09	9,0
26	0,34	-0,13	-0,12	8,0
27	0,35	-0,15	-0,14	6,6
28	0,36	-0,15	-0,14	7,0
29	0,37	-0,15	-0,14	6,6
30	0,39	-0,14	-0,14	3,1
31	0,40	-0,11	-0,11	9,4
32	0,41	-0,08	-0,09	3,9
33	0,42	-0,03	-0,03	8,7
34	0,43	0,06	0,05	9,9
35	0,45	0,15	0,14	7,7
36	0,46	0,28	0,27	4,2
37	0,47	0,48	0,44	8,2
38	0,48	0,72	0,69	4,1
39	0,49	0,94	0,89	5,7
40	0,51	1,15	1,20	3,9
41	0,52	1,32	1,43	7,8
42	0,53	1,42	1,44	1,2
43	0,54	1,46	1,43	2,0
44	0,56	1,45	1,40	4,0
45	0,57	1,44	1,38	4,1
46	0,58	1,43	1,37	3,9
47	0,59	1,42	1,36	3,9
48	0,60	1,40	1,35	4,0
49	0,62	1,41	1,33	6,1
50	0,63	1,40	1,31	6,8
51	0,65	1,37	1,30	6,0
52	0,69	1,33	1,27	5,0
53	0,71	1,30	1,25	4,0
54	0,75	1,28	1,23	3,6
55	0,77	1,27	1,22	3,6
56	0,81	1,27	1,21	4,6
57	0,83	1,27	1,20	5,2
58	0,86	1,27	1,20	5,9

Таблица А.4 – Сравнение средней продольной u^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = 0$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $u_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $u_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение $\Delta = \left \frac{u_{\text{эксп}}^0 - u_{\text{чис.мод.}}^0}{u_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	1,21	1,24	2,5
2	0,04	1,22	1,26	3,0
3	0,05	1,24	1,28	3,1
4	0,07	1,28	1,28	0,2
5	0,08	1,31	1,29	1,2
6	0,1	1,33	1,30	2,0
7	0,11	1,35	1,31	2,8
8	0,12	1,36	1,32	2,7
9	0,13	1,38	1,33	3,9
10	0,14	1,40	1,35	3,9
11	0,16	1,40	1,38	1,4
12	0,17	1,39	1,40	0,2
13	0,18	1,37	1,42	4,0
14	0,19	1,27	1,40	9,0
15	0,21	1,05	1,15	8,7
16	0,22	0,20	0,22	7,2
17	0,23	0,00	0,00	0,0
18	0,24	0,00	0,00	0,0
19	0,25	0,00	0,00	0,0
20	0,27	0,00	0,00	0,0
21	0,28	0,00	0,00	0,0
22	0,29	0,00	0,00	0,0
23	0,3	0,00	0,00	0,0
24	0,31	0,00	0,00	0,0
25	0,33	0,00	0,00	0,0
26	0,34	0,00	0,00	0,0
27	0,35	0,00	0,00	0,0
28	0,36	0,00	0,00	0,0
29	0,37	0,00	0,00	0,0
30	0,39	0,00	0,00	0,0
31	0,4	0,00	0,00	0,0
32	0,41	0,00	0,00	0,0
33	0,42	0,00	0,00	0,0
34	0,43	0,00	0,00	0,0
35	0,45	0,00	0,00	0,0
36	0,47	0,93	1,02	9,3
37	0,48	1,16	1,25	7,1
38	0,49	1,31	1,41	7,4
39	0,51	1,38	1,52	9,1

Продолжение таблицы А.4

1	2	3	4	5
40	0,52	1,43	1,49	3,9
41	0,53	1,44	1,46	1,6
42	0,54	1,42	1,44	1,0
43	0,56	1,41	1,39	1,0
44	0,57	1,39	1,38	0,6
45	0,58	1,38	1,36	1,2
46	0,59	1,36	1,35	0,9
47	0,6	1,34	1,34	0,5
48	0,62	1,33	1,31	1,7
49	0,63	1,32	1,30	1,5
50	0,65	1,30	1,28	1,8
51	0,69	1,29	1,25	2,8
52	0,71	1,26	1,24	2,0
53	0,75	1,24	1,22	2,1
54	0,77	1,23	1,21	1,7
55	0,81	1,22	1,20	2,2
56	0,83	1,23	1,19	2,8
57	0,86	1,22	1,19	3,2

Таблица А.5 – Сравнение средней продольной u^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = - 0,175$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $u_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $u_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение $\Delta = \left \frac{u_{\text{эксп}}^0 - u_{\text{чис.мод.}}^0}{u_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	0,95556	1,06	9,5
2	0,04	0,9742	1,07	9,0
3	0,05	0,9862	1,07	7,7
4	0,07	1,029	1,07	3,4
5	0,08	1,0434	1,06	1,5
6	0,1	1,0451	1,05	0,4
7	0,11	1,0454	1,04	0,3
8	0,12	1,0433	1,04	0,5
9	0,13	1,0449	1,03	1,4
10	0,14	1,0421	1,02	1,9
11	0,16	1,0422	1,00	4,5
12	0,17	1,0366	0,99	5,0
13	0,18	1,0225	0,98	4,6
14	0,19	1,0021	0,96	4,5
15	0,21	0,9795	0,91	7,2
16	0,22	0,9514	0,89	7,3
17	0,23	0,9209	0,86	7,3

Продолжение таблицы А.5

1	2	3	4	5
18	0,24	0,8848	0,83	7,0
19	0,25	0,8383	0,81	4,0
20	0,27	0,7827	0,72	8,0
21	0,28	0,7245	0,69	4,9
22	0,29	0,6716	0,66	2,2
23	0,3	0,6247	0,63	0,3
24	0,31	0,5885	0,60	1,8
25	0,33	0,561	0,56	0,2
26	0,34	0,5431	0,55	1,1
27	0,35	0,5333	0,55	2,2
28	0,36	0,5447	0,56	2,6
29	0,37	0,5689	0,58	1,3
30	0,39	0,606	0,63	3,4
31	0,4	0,6619	0,66	0,3
32	0,41	0,7223	0,70	3,9
33	0,42	0,7795	0,73	6,4
34	0,43	0,8403	0,77	9,0
35	0,45	0,896	0,86	4,5
36	0,46	0,9389	0,88	6,8
37	0,47	0,976	0,91	7,0
38	0,48	1,0052	0,94	6,7
39	0,49	1,0256	0,97	5,9
40	0,51	1,045	1,01	3,1
41	0,52	1,061	1,02	3,9
42	0,53	1,0754	1,04	3,2
43	0,54	1,0854	1,05	3,2
44	0,56	1,0956	1,08	1,6
45	0,57	1,1054	1,08	2,1
46	0,58	1,1121	1,09	1,97
47	0,59	1,12	1,10	1,8
48	0,6	1,1321	1,10	2,5
49	0,62	1,1408	1,11	2,6
50	0,63	1,1479	1,12	2,9
51	0,65	1,1604	1,12	3,6
52	0,69	1,1615	1,13	3,2
53	0,71	1,1577	1,13	2,8
54	0,75	1,1641	1,13	3,2
55	0,77	1,1692	1,13	3,6
56	0,81	1,1665	1,13	3,4
57	0,83	1,159	1,13	2,8
58	0,86	1,1557	1,13	2,6

Таблица А.6 – Сравнение средней продольной u^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = - 0,23$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $u_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $u_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение $\Delta = \left \frac{u_{\text{эксп}}^0 - u_{\text{чис.мод.}}^0}{u_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	0,91	1,00	9,9
2	0,04	0,92	1,02	10,0
3	0,05	0,93	1,02	9,1
4	0,07	0,96	1,02	5,0
5	0,08	0,98	1,01	3,8
6	0,10	0,98	1,00	2,6
7	0,11	0,98	1,00	1,7
8	0,12	0,98	0,99	0,8
9	0,13	0,99	0,98	0,7
10	0,16	0,99	0,95	3,7
11	0,17	0,99	0,94	5,1
12	0,19	0,97	0,92	4,5
13	0,21	0,95	0,89	7,3
14	0,22	0,93	0,88	5,6
15	0,23	0,92	0,87	5,8
16	0,24	0,90	0,85	6,1
17	0,25	0,88	0,83	6,1
18	0,27	0,85	0,81	5,6
19	0,28	0,83	0,79	4,9
20	0,29	0,80	0,77	4,1
21	0,31	0,77	0,76	2,3
22	0,33	0,77	0,74	3,9
23	0,34	0,77	0,74	4,1
24	0,36	0,77	0,74	4,6
25	0,37	0,78	0,75	4,7
26	0,39	0,79	0,77	2,6
27	0,41	0,83	0,79	4,5
28	0,42	0,85	0,81	5,0
29	0,43	0,88	0,84	5,2
30	0,45	0,91	0,86	5,4
31	0,46	0,93	0,88	5,5
32	0,47	0,95	0,91	5,0
33	0,48	0,97	0,93	4,3
34	0,49	0,98	0,93	5,8
35	0,51	1,00	0,97	2,9
36	0,53	1,03	0,99	4,0
37	0,54	1,04	1,00	3,9
38	0,57	1,07	1,03	3,7
39	0,58	1,08	1,04	3,5

Продолжение таблицы А.6

1	2	3	4	5
40	0,59	1,09	1,05	3,3
41	0,60	1,10	1,06	3,9
42	0,62	1,11	1,07	3,6
43	0,63	1,11	1,07	3,6
44	0,65	1,12	1,08	3,9
45	0,69	1,13	1,09	3,5
46	0,71	1,13	1,09	3,0
47	0,75	1,13	1,10	3,2
48	0,77	1,14	1,10	3,9
49	0,81	1,15	1,10	4,2
50	0,83	1,15	1,10	4,0
51	0,86	1,14	1,11	3,4

Таблица А.7 – Сравнение средней продольной u^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = - 0,35$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $u_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $u_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение $\Delta = \left \frac{u_{\text{эксп}}^0 - u_{\text{чис.мод.}}^0}{u_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	0,81	0,88	7,9
2	0,04	0,83	0,91	9,0
3	0,05	0,84	0,93	9,3
4	0,07	0,90	0,95	5,6
5	0,08	0,91	0,96	5,1
6	0,10	0,93	0,96	3,0
7	0,12	0,95	0,95	0,1
8	0,13	0,96	0,95	1,5
9	0,16	0,98	0,94	4,6
10	0,18	0,98	0,93	5,6
11	0,21	0,97	0,92	6,2
12	0,23	0,96	0,91	5,9
13	0,24	0,96	0,90	6,2
14	0,28	0,96	0,89	7,1
15	0,29	0,95	0,89	7,3
16	0,31	0,95	0,89	6,6
17	0,33	0,94	0,89	5,9
18	0,34	0,93	0,89	5,2
19	0,36	0,93	0,89	4,4
20	0,37	0,93	0,89	4,3
21	0,39	0,94	0,90	4,4
22	0,41	0,95	0,90	5,0

Продолжение таблицы А.7

1	2	3	4	5
23	0,42	0,95	0,91	4,9
24	0,46	0,98	0,93	5,3
25	0,47	0,98	0,94	4,8
26	0,49	0,99	0,95	4,2
27	0,52	1,00	0,96	3,1
28	0,54	1,01	0,97	4,1
29	0,57	1,03	0,99	3,7
30	0,58	1,03	1,00	3,3
31	0,60	1,04	1,01	3,6
32	0,62	1,05	1,01	3,5
33	0,63	1,06	1,02	3,5
34	0,65	1,07	1,03	3,8
35	0,69	1,08	1,04	3,8
36	0,71	1,09	1,04	4,6
37	0,75	1,10	1,05	5,0
38	0,77	1,10	1,06	4,5
39	0,81	1,09	1,06	3,0
40	0,83	1,08	1,06	1,7
41	0,86	1,08	1,07	1,2

Таблица А.8 – Сравнение средней продольной w^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = 0,35$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $w_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная ком- понента скорости, полу- ченная в результате чис- ленного моделирования $w_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение
				$\Delta = \left \frac{w_{\text{эксп}}^0 - w_{\text{чис.мод.}}^0}{w_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	0,05	0,05	7,9
2	0,04	0,06	0,06	5,3
3	0,05	0,06	0,07	5,2
4	0,07	0,09	0,08	9,1
5	0,08	0,10	0,09	8,8
6	0,10	0,11	0,11	3,3
7	0,12	0,13	0,12	4,6
8	0,13	0,15	0,14	2,4
9	0,16	0,19	0,18	2,1
10	0,18	0,23	0,22	8,9
11	0,21	0,27	0,25	8,3
12	0,23	0,25	0,24	5,0
13	0,24	0,21	0,23	9,3
14	0,28	0,05	0,05	8,2
15	0,29	0,02	0,03	7,2

Продолжение таблицы А.8

1	2	3	4	5
16	0,31	0,04	0,04	8,9
17	0,33	0,04	0,04	8,3
18	0,34	0,03	0,03	8,6
19	0,36	-0,05	-0,04	9,1
20	0,37	-0,09	-0,10	8,2
21	0,39	-0,13	-0,15	9,5
22	0,41	-0,20	-0,21	1,1
23	0,42	-0,22	-0,24	8,1
24	0,46	-0,28	-0,29	4,5
25	0,47	-0,28	-0,29	5,3
26	0,49	-0,26	-0,29	9,7
27	0,52	-0,20	-0,22	9,9
28	0,54	-0,13	-0,15	9,3
29	0,57	-0,09	-0,10	9,1
30	0,58	-0,07	-0,08	7,9
31	0,60	-0,02	-0,03	8,8
32	0,62	-0,01	-0,01	2,0
33	0,63	0,01	0,01	2,6
34	0,65	0,02	0,02	8,2
35	0,69	0,04	0,04	7,9
36	0,71	0,04	0,04	8,3
37	0,75	0,05	0,04	9,6
38	0,77	0,06	0,05	7,5
39	0,81	0,06	0,06	8,7
40	0,83	0,05	0,04	6,8
41	0,86	0,04	0,04	7,3

Таблица А.9 – Сравнение средней продольной w^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = 0,23$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $w_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $w_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение $\Delta = \left \frac{w_{\text{эксп}}^0 - w_{\text{чис.мод.}}^0}{w_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	0,03	0,03	8,1
2	0,04	0,03	0,03	8,4
3	0,05	0,03	0,04	7,8
4	0,07	0,05	0,05	3,8
5	0,08	0,07	0,06	8,4
6	0,10	0,08	0,07	9,8
7	0,11	0,09	0,08	9,7
8	0,12	0,10	0,09	9,1

Продолжение таблицы А.9

1	2	3	4	5
9	0,13	0,11	0,10	7,6
10	0,16	0,13	0,12	9,9
11	0,17	0,15	0,14	8,2
12	0,19	0,19	0,18	7,8
13	0,21	0,21	0,20	8,0
14	0,22	0,22	0,20	9,7
15	0,23	0,20	0,22	6,9
16	0,24	0,17	0,18	6,8
17	0,25	0,12	0,14	7,9
18	0,27	0,08	0,09	8,2
19	0,28	0,05	0,05	7,6
20	0,29	0,04	0,04	8,8
21	0,31	0,03	0,03	8,6
22	0,33	0,02	0,03	8,5
23	0,34	0,01	0,01	8,9
24	0,36	-0,04	-0,04	9,4
25	0,37	-0,06	-0,06	7,8
26	0,39	-0,09	-0,09	7,2
27	0,41	-0,10	-0,10	3,8
28	0,42	-0,10	-0,11	8,0
29	0,43	-0,11	-0,12	7,6
30	0,45	-0,12	-0,13	3,4
31	0,46	-0,14	-0,14	3,3
32	0,47	-0,15	-0,16	5,8
33	0,48	-0,15	-0,16	6,2
34	0,49	-0,15	-0,16	7,5
35	0,51	-0,13	-0,14	8,6
36	0,53	-0,07	-0,08	8,8
37	0,54	-0,04	-0,05	9,3
38	0,57	-0,01	-0,01	8,1
39	0,58	0,01	0,01	4,2
40	0,59	0,02	0,01	7,0
41	0,60	0,03	0,02	7,9
42	0,63	0,05	0,04	8,7
43	0,65	0,07	0,06	6,7
44	0,69	0,07	0,07	7,7
45	0,71	0,07	0,06	8,6
46	0,75	0,08	0,07	8,9
47	0,77	0,07	0,07	9,2
48	0,81	0,07	0,07	9,5
49	0,83	0,07	0,06	8,0
50	0,86	0,06	0,05	7,0

Таблица А.10 – Сравнение средней продольной w^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = 0,175$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $w_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $w_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение $\Delta = \left \frac{w_{\text{эксп}}^0 - w_{\text{чис.мод.}}^0}{w_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	0,0014	0,0016	9,7
2	0,04	0,0015	0,0017	9,6
3	0,05	0,0041	0,0045	8,9
4	0,07	0,01	0,01	4,3
5	0,08	0,02	0,03	8,1
6	0,1	0,04	0,04	7,5
7	0,11	0,05	0,05	9,8
8	0,12	0,06	0,06	0,3
9	0,13	0,07	0,07	2,2
10	0,14	0,07	0,07	1,5
11	0,16	0,08	0,08	8,9
12	0,17	0,08	0,09	9,4
13	0,18	0,09	0,10	9,2
14	0,19	0,10	0,11	9,6
15	0,21	0,10	0,12	8,9
16	0,22	0,10	0,11	9,7
17	0,23	0,08	0,09	9,0
18	0,24	0,05	0,05	8,7
19	0,25	0,02	0,02	2,5
20	0,27	-0,01	-0,01	0,0
21	0,28	-0,03	-0,03	8,1
22	0,29	-0,03	-0,04	7,6
23	0,3	-0,03	-0,04	6,2
24	0,31	-0,03	-0,03	7,7
25	0,33	-0,02	-0,02	5,7
26	0,34	-0,01	-0,01	8,5
27	0,35	0,00	0,00	0,0
28	0,36	0,006	0,005	10
29	0,37	0,01	0,01	9,8
30	0,39	0,01	0,01	9,6
31	0,4	0,01	0,01	9,4
32	0,41	0,02	0,02	8,6
33	0,42	0,02	0,02	9,7
34	0,43	0,02	0,02	8,6
35	0,45	0,02	0,02	6
36	0,46	0,01	0,01	8,2
37	0,47	-0,01	-0,01	8,7
38	0,48	-0,01	-0,01	9,5
39	0,49	-0,01	-0,02	8,8

Продолжение таблицы А.10

1	2	3	4	5
40	0,51	-0,01	-0,01	9,4
41	0,52	0,00	0,00	5,0
42	0,53	0,02	0,02	8,7
43	0,54	0,04	0,04	7,0
44	0,56	0,06	0,05	8,2
45	0,57	0,07	0,06	8,4
46	0,58	0,08	0,07	9,9
47	0,59	0,08	0,08	9,7
48	0,6	0,09	0,08	9,2
49	0,62	0,09	0,09	8,7
50	0,63	0,10	0,09	9,8
51	0,65	0,10	0,10	8,6
52	0,69	0,09	0,09	4,3
53	0,75	0,08	0,08	3,1
54	0,77	0,08	0,08	2,3
55	0,81	0,07	0,07	1,2
56	0,83	0,06	0,06	3,9
57	0,86	0,06	0,05	9,0

Таблица А.11 – Сравнение средней продольной w^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = 0$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $w_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная ком- понента скорости, полу- ченная в результате чис- ленного моделирования $w_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение
				$\Delta = \left \frac{w_{\text{эксп}}^0 - w_{\text{чис.мод.}}^0}{w_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	-0,03	-0,03	8,0
2	0,04	-0,04	-0,03	9,2
3	0,05	-0,05	-0,04	2,1
4	0,07	-0,06	-0,06	7,7
5	0,08	-0,08	-0,08	0,5
6	0,10	-0,09	-0,09	3,6
7	0,11	-0,11	-0,10	3,5
8	0,12	-0,13	-0,12	5,7
9	0,13	-0,15	-0,14	9,8
10	0,14	-0,17	-0,16	9,2
11	0,157	-0,19	-0,18	8,7
12	0,17	-0,21	-0,20	8,3
13	0,18	-0,23	-0,21	7,6
14	0,19	-0,22	-0,21	8,7
15	0,21	-0,20	-0,22	8,0
16	0,48	0,36	0,33	8,1

Продолжение таблицы А.11

1	2	3	4	5
17	0,49	0,37	0,35	6,0
18	0,51	0,37	0,35	6,0
19	0,52	0,37	0,35	5,5
20	0,53	0,36	0,34	6,5
21	0,54	0,35	0,33	7,6
22	0,56	0,33	0,31	7,1
23	0,57	0,32	0,30	7,2
24	0,58	0,30	0,28	5,6
25	0,59	0,29	0,27	6,4
26	0,60	0,27	0,26	4,2
27	0,62	0,26	0,25	4,2
28	0,63	0,25	0,23	7,6
29	0,65	0,23	0,22	6,4
30	0,69	0,21	0,20	8,0
31	0,71	0,19	0,18	7,8
32	0,75	0,17	0,16	9,3
33	0,77	0,15	0,14	9,6
34	0,81	0,11	0,10	7,6
35	0,83	0,09	0,09	8,7
36	0,86	0,08	0,07	5,8

Таблица А.12 – Сравнение средней продольной w^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = -0,175$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $w_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $w_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение $\Delta = \left \frac{w_{\text{эксп}}^0 - w_{\text{чис.мод.}}^0}{w_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	-0,05	-0,04	9,8
2	0,04	-0,05	-0,06	4,4
3	0,05	-0,06	-0,06	2,6
4	0,07	-0,08	-0,07	9,0
5	0,08	-0,09	-0,09	6,0
6	0,10	-0,11	-0,10	3,8
7	0,11	-0,12	-0,12	1,2
8	0,12	-0,14	-0,13	4,9
9	0,13	-0,15	-0,14	9,3
10	0,14	-0,17	-0,15	8,7
11	0,157	-0,18	-0,18	1,4
12	0,17	-0,19	-0,19	2,5
13	0,18	-0,20	-0,20	1,4
14	0,19	-0,21	-0,20	4,1

Продолжение таблицы А.12

1	2	3	4	5
1	0,21	-0,22	-0,22	1,0
2	0,22	-0,23	-0,23	1,4
3	0,23	-0,23	-0,24	3,5
4	0,24	-0,22	-0,24	6,7
5	0,25	-0,21	-0,23	9,3
6	0,27	-0,18	-0,20	9,6
7	0,28	-0,15	-0,17	9,7
8	0,29	-0,12	-0,13	9,3
9	0,30	-0,07	-0,08	8,5
10	0,31	-0,02	-0,02	7,8
11	0,33	0,03	0,03	6,9
12	0,34	0,09	0,09	8,7
13	0,35	0,15	0,16	2,1
14	0,36	0,22	0,21	6,1
15	0,37	0,29	0,27	9,0
16	0,39	0,35	0,34	4,2
17	0,40	0,41	0,38	8,2
18	0,41	0,45	0,41	9,8
19	0,42	0,47	0,44	7,6
20	0,43	0,48	0,46	4,9
21	0,45	0,48	0,46	4,7
22	0,46	0,48	0,45	5,5
23	0,47	0,47	0,44	5,1
24	0,48	0,45	0,43	4,7
25	0,49	0,43	0,41	5,9
26	0,51	0,42	0,39	7,4
27	0,52	0,41	0,38	7,0
28	0,53	0,40	0,38	5,5
29	0,54	0,39	0,37	5,5
30	0,56	0,38	0,36	5,9
31	0,57	0,36	0,35	5,4
32	0,58	0,35	0,32	7,0
33	0,59	0,33	0,31	7,3
34	0,60	0,31	0,29	8,5
35	0,62	0,30	0,28	7,9
36	0,63	0,29	0,27	8,6
37	0,65	0,28	0,26	8,7
38	0,69	0,24	0,23	4,6
39	0,71	0,22	0,21	5,0
40	0,75	0,20	0,19	6,2
41	0,77	0,18	0,17	7,8
42	0,81	0,14	0,13	9,3
43	0,83	0,12	0,11	5,6
44	0,86	0,10	0,09	4,5

Таблица А.13 – Сравнение средней продольной w^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = -0,23$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $w_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $w_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение $\Delta = \left \frac{w_{\text{эксп}}^0 - w_{\text{чис.мод.}}^0}{w_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	-0,03	-0,03	9,7
2	0,04	-0,04	-0,04	1,7
3	0,05	-0,04	-0,04	3,0
4	0,07	-0,06	-0,06	9,1
5	0,08	-0,07	-0,06	9,7
6	0,10	-0,08	-0,07	4,8
7	0,11	-0,08	-0,08	4,0
8	0,12	-0,09	-0,09	1,1
9	0,13	-0,09	-0,10	4,7
10	0,157	-0,10	-0,11	8,9
11	0,17	-0,10	-0,11	9,8
12	0,19	-0,11	-0,12	8,0
13	0,21	-0,11	-0,12	9,8
14	0,22	-0,10	-0,12	9,6
15	0,23	-0,10	-0,11	9,6
16	0,24	-0,09	-0,10	9,3
17	0,25	-0,08	-0,09	9,5
18	0,27	-0,06	-0,07	9,3
19	0,28	-0,05	-0,06	8,2
20	0,29	-0,03	-0,04	7,5
21	0,33	0,05	0,05	8,4
22	0,34	0,09	0,08	9,3
23	0,36	0,17	0,16	8,9
24	0,37	0,21	0,19	9,0
25	0,39	0,24	0,25	3,1
26	0,41	0,29	0,27	8,4
27	0,42	0,31	0,29	7,4
28	0,43	0,32	0,30	7,3
29	0,45	0,33	0,31	6,9
30	0,46	0,34	0,32	6,3
31	0,47	0,34	0,32	5,6
32	0,48	0,34	0,33	3,9
33	0,49	0,33	0,32	3,2
34	0,51	0,33	0,31	6,7
35	0,53	0,32	0,31	6,2
36	0,54	0,33	0,31	6,1
37	0,57	0,32	0,30	5,3
38	0,58	0,31	0,29	6,7
39	0,59	0,30	0,29	4,2

Продолжение таблицы А.13

1	2	3	4	5
40	0,60	0,29	0,27	7,6
41	0,62	0,28	0,26	8,1
42	0,63	0,27	0,25	9,7
43	0,65	0,26	0,24	8,7
44	0,69	0,23	0,22	8,6
45	0,71	0,22	0,20	9,2
46	0,75	0,19	0,17	9,6
47	0,77	0,17	0,15	8,8
48	0,81	0,14	0,13	7,3
49	0,83	0,11	0,11	1,2
50	0,86	0,09	0,08	8,0

Таблица А.14 – Сравнение средней продольной w^0 компоненты скорости в сечении $x^0 = -0,35$

№ п/п	Координата y^0	Экспериментальная средняя продольная компонента скорости $w_{\text{эксп}}^0$	Средняя продольная компонента скорости, полученная в результате численного моделирования $w_{\text{чис.мод.}}^0$	Расхождение
				$\Delta = \left \frac{w_{\text{эксп}}^0 - w_{\text{чис.мод.}}^0}{w_{\text{чис.мод.}}^0} \right \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
1	0,02	-0,01	-0,01	7,8
2	0,04	-0,01	-0,01	-5,6
3	0,05	-0,01	-0,01	-4,9
4	0,07	-0,01	-0,02	7,1
5	0,08	-0,01	-0,02	8,4
6	0,10	-0,02	-0,02	5,8
7	0,12	-0,01	-0,01	7,8
8	0,13	-0,01	-0,01	8,3
9	0,157	-0,01	-0,01	9,6
10	0,18	0,00	0,00	8,9
11	0,21	0,00	0,00	9,5
12	0,23	0,01	0,01	8,3
13	0,24	0,01	0,01	6,3
14	0,28	0,03	0,03	9,3
15	0,29	0,04	0,04	8,2
16	0,31	0,07	0,06	8,8
17	0,33	0,08	0,08	7,4
18	0,34	0,10	0,09	6,7
19	0,36	0,12	0,12	5,8
20	0,37	0,14	0,13	7,6
21	0,39	0,15	0,14	8,6
22	0,41	0,17	0,16	9,3
23	0,42	0,19	0,17	9,0

Продолжение таблицы А.14

1	2	3	4	5
24	0,46	0,21	0,20	7,3
25	0,47	0,22	0,20	7,0
26	0,49	0,22	0,21	7,1
27	0,52	0,24	0,23	4,6
28	0,54	0,25	0,24	4,3
29	0,57	0,25	0,24	4,1
30	0,58	0,25	0,24	3,9
31	0,60	0,24	0,24	3,2
32	0,62	0,24	0,23	4,9
33	0,63	0,24	0,22	7,2
34	0,65	0,22	0,21	6,7
35	0,69	0,20	0,19	7,1
36	0,71	0,19	0,18	6,6
37	0,75	0,17	0,15	8,4
38	0,77	0,15	0,13	8,5
39	0,81	0,10	0,09	8,8
40	0,83	0,08	0,07	8,4
41	0,86	0,06	0,06	7,9