

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Цифровой двойник стенда физического подобия, имитирующий процесс переработки нефти УДК 004.942:665.63

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т7Б	Яценко Анатолий Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н., доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын Александр Юрьевич			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Аверкиев Алексей Анатольевич			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н., доцент		

Планируемые результаты освоения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен использовать основные закономерности, действующие в процессе изготовления продукции требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда
ОПК(У)-2	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
ОПК(У)-3	Способен использовать современные информационные технологии, технику, прикладные программные средства при решении задач профессиональной деятельности
ОПК(У)-4	Способен участвовать в разработке обобщенных вариантов решения проблем, связанных с автоматизацией производств, выборе на основе анализа вариантов оптимального прогнозирования последствий решения
ОПК(У)-5	Способен участвовать в разработке технической документации, связанной с профессиональной деятельностью
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен собирать и анализировать исходные информационные данные для проектирования технологических процессов изготовления продукции, средств и систем автоматизации, контроля, технологического оснащения, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством; участвовать в работах по расчету и проектированию процессов изготовления продукции и указанных средств и систем с использованием современных информационных технологий, методов и средств проектирования
ПК(У)-2	Способен выбирать основные и вспомогательные материалы для изготовления изделий, способы реализации основных технологических процессов, аналитические и численные методы при разработке их математических моделей, методы стандартных испытаний по определению физико-механических свойств и технологических показателей материалов и готовых изделий, стандартные методы их проектирования, прогрессивные методы эксплуатации изделий

ПК(У)-3	готов применять способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов, современные методы разработки малоотходных, энергосберегающих и экологически чистых технологий, средства автоматизации технологических процессов и производств
ПК(У)-4	Способен участвовать в постановке целей проекта (программы), его задач при заданных критериях, целевых функциях, ограничениях, разработке структуры его взаимосвязей, определении приоритетов решения задач с учетом правовых и нравственных аспектов профессиональной деятельности, в разработке проектов изделий с учетом технологических, конструкторских, эксплуатационных, эстетических, экономических и управленческих параметров, в разработке проектов модернизации действующих производств, создании новых, в разработке средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством в соответствии с техническими заданиями и использованием стандартных средств автоматизации расчетов и проектирования
ПК(У)-5	Способен участвовать в разработке (на основе действующих стандартов и другой нормативной документации) проектной и рабочей технической документации в области автоматизации технологических процессов и производств, их эксплуатационному обслуживанию, управлению жизненным циклом продукции и ее качеством, в мероприятиях по контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации действующим стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам
ПК(У)-6	Способен проводить диагностику состояния и динамики производственных объектов производств с использованием необходимых методов и средств анализа
ПК(У)-7	Способен участвовать в разработке проектов по автоматизации производственных и технологических процессов, технических средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством, в практическом освоении и совершенствовании данных процессов, средств и систем
ПК(У)-8	Способен выполнять работы по автоматизации технологических процессов и производств, их обеспечению средствами автоматизации и управления, готовностью использовать современные методы и средства автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством
ПК(У)-9	Способен определять номенклатуру параметров продукции и технологических процессов ее изготовления, подлежащих контролю и измерению, устанавливать оптимальные нормы точности продукции, измерений и достоверности контроля, разрабатывать локальные поверочные схемы и выполнять проверку и отладку систем и средств автоматизации технологических процессов, контроля, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством, а также их ремонт и выбор; осваивать средства обеспечения автоматизации и управления
ПК(У)-10	Способен проводить оценку уровня брака продукции, анализировать причины его появления, разрабатывать мероприятия по его предупреждению и устранению, по совершенствованию продукции, технологических процессов, средств автоматизации и управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством, систем экологического менеджмента предприятия, по сертификации продукции, процессов, средств автоматизации и управления
ПК(У)-11	Способен участвовать: в разработке планов, программ, методик, связанных с автоматизацией технологических процессов и производств, управлением процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством, инструкций по эксплуатации оборудования, средств и систем автоматизации, управления и сертификации и другой текстовой документации, входящей в конструкторскую и технологическую документацию, в работах по экспертизе технической

	документации, надзору и контролю за состоянием технологических процессов, систем, средств автоматизации и управления, оборудования, выявлению их резервов, определению причин недостатков и возникающих неисправностей при эксплуатации, принятию мер по их устранению и повышению эффективности использования
ПК(У)-18	Способен аккумулировать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт в области автоматизации технологических процессов и производств, автоматизированного управления жизненным циклом продукции, компьютерных систем управления ее качеством,
ПК(У)-19	Способен участвовать в работах по моделированию продукции, технологических процессов, производств, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством с использованием современных средств автоматизированного проектирования, по разработке алгоритмического и программного обеспечения средств и систем автоматизации и управления процессами
ПК(У)-20	Способен проводить эксперименты по заданным методикам с обработкой и анализом их результатов, составлять описания выполненных исследований и подготавливать данные для разработки научных обзоров и публикаций
ПК(У)-21	Способен составлять научные отчеты по выполненному заданию и участвовать во внедрении результатов исследований и разработок в области автоматизации технологических процессов и производств, автоматизированного управления жизненным циклом продукции.
ПК(У)-22	Способен участвовать: в разработке программ учебных дисциплин и курсов на основе изучения научной, технической и научно-методической литературы, а также собственных результатов исследований; в постановке и модернизации отдельных лабораторных работ и практикумов по дисциплинам профилей направления; способностью проводить отдельные виды аудиторных учебных занятий (лабораторные и практические), применять новые образовательные технологии, включая системы компьютерного и дистанционного обучения

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

Уровень образования – Бакалавриат

Период выполнения – осенний/весенний семестр 2020/2021 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
25.04.2021	Основная часть	60
04.05.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
13.05.2021	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н., доцент		

Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын Александр Юрьевич			

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н., доцент		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8Т7Б	Яценко Анатолию Александровичу

Тема работы:

Цифровой двойник стенда физического подобия, имитирующий процесс переработки нефти	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Модель должна точно соответствовать реальному стенду, повторяя поведение жидкости в системе. Также она должна иметь перспективу в виде создания когнитивного помощника, обеспечивающего всестороннюю помощь в анализе течения технологического процесса и в регламентировании плановых технических осмотров и ремонтов оборудования.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Обзор функциональных возможностей стенда 2) описание процессов, описывающих поведение жидкости в системе; 3) создание полной адекватно описывающей гидростатические и гидродинамические процессы математической модели стенда, оценка физических параметров; 4) валидация и корректировка модели;
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Функциональная схема, Гидравлическая схема, Модель стенда в «MATLAB Simulink»</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Маланина Вероника Анатольевна, доцент ОСГН ШБИП, к.э.н.
Социальная ответственность	Аверкиев Алексей Анатольевич, ассистент ООД ШБИП

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Нет

--

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын Александр Юрьевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т7Б	Яценко Анатолий Александрович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа 8Т7Б	ФИО Яценко Анатолию Александровичу
-----------------------	--

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта – не более 300000 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 150000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Коэффициент взносов в социальные фонды, районный коэффициент, коэффициент дополнительной заработной платы
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы, а также указанную в МУ величину тарифа на эл. энергию
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Построение плана-графика выполнения ВКР.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Составление соответствующей сметы затрат, расчет цены результата ВКР
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Качественная и количественная характеристика экономического и др. видов эффекта от внедрения результата, определение эффективности внедрения проекта, окупаемость при продаже единицы создаваемого продукта
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. Альтернативы проведения НИ 4. График проведения и бюджет НИ 5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ 	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП	Маланина В.А.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т7Б	Яценко Анатолий Александрович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8Т7Б	Яценко Анатолий Александрович

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Тема ВКР:

Цифровой двойник стенда физического подобию, имитирующий процесс переработки нефти	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является стенд физического подобию по изучению алгоритмов автоматического управления в гидродинамических системах. Рабочим местом разработчика является аудитория 106 корпуса №10 ТПУ.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> - Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования ГОСТ 12.2.032-78. - Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования ГОСТ 21889-76. - Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018). - Требования к организации оборудования рабочих мест с ПК регулируется СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 - Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования ГОСТ 12.2.032-78. - ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы.
2. Производственная безопасность: <ul style="list-style-type: none"> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия 	<ul style="list-style-type: none"> – Поражение электрическим током. – Повышенный уровень шума и вибрации.

	<p>– Повышенный уровень ЭМП.</p> <p>– Недостаточная освещенность рабочего места.</p>
3. Экологическая безопасность:	<p>– Возможно пагубное влияние на литосферу при утилизации составных элементов станда. При производстве составных элементов возможны выбросы вредных веществ в атмосферу. Существенного влияния на гидросферу нет.</p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<p>В аудиторном помещении возможно возникновение ЧС техногенного характера – пожара.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Аверкиев Алексей Анатольевич	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т7Б	Яценко Анатолий Александрович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 84 страницы, 16 рисунков, 12 таблиц, 25 источников литературы, 4 приложения.

Ключевые слова: стенд физического подобия, математическая модель, цифровой двойник, гидродинамическая система, система управления.

Объектом исследования является стенд физического подобия по изучению алгоритмов автоматического управления в гидродинамических системах.

Цель работы – разработка и реализация полной математической модели стенда физического подобия по изучению алгоритмов автоматического управления в гидродинамических системах.

В процессе исследования проводились исследования по получению математической модели стенда физического подобия, обработка экспериментальных данных, уточнение модели, синтез простейших алгоритмов автоматического управления одноконтурных систем.

В результате исследования была получена математическая модель, адекватно описывающая происходящие процессы в системе.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: линейные размеры: 1600x680x800, питание обеспечивает блок питания 24 Вольт, 10 Ампер, 7 датчиков, насос мощностью 0.55 кВт.

Степень внедрения: перспективно представляет интерес для предприятий, занимающихся нефтепереработкой (ПАО «СИБУР»).

Область применения: нефтегазовая промышленность (разведка, добыча и переработка нефти)

Экономическая значимость работы заключается в применении научных результатов для внедрения методов улучшенного управления производственным процессом.

В будущем планируется улучшить модель, реализовать когнитивного помощника, обеспечить всестороннее цифровое планирование.

Оглавление

Введение	14
1 Описание стенда и происходящих в нем гидродинамических и гидростатических процессов.....	16
1.1 Функциональные возможности стенда.....	16
1.2 Создание модели насоса	18
1.3 Математическое описание протекающих процессов.....	22
2 Создание модели в среде «MATLAB Simulink».....	29
2.1 Ветвь от М-1 к Р-1	29
2.2 Ветвь от Р-1 к Р-2.....	33
2.3 Ветвь от Р-2 к Р-3.....	41
2.4 Обходная ветвь.....	41
2.5 Реализация транспортного запаздывания	43
2.6 Снятие со стенда и интеграция в модель насосной характеристики .	44
3 Валидация модели	48
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	53
4.1 Организация и планирование работ	53
4.2 Продолжительность этапов работ.....	54
4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта.....	60
4.3.1 Расчет затрат на материалы.....	60
4.3.2 Расчет заработной платы	61
4.3.3 Расчет затрат на социальный налог	62
4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию.....	63
4.3.5 Расчет амортизационных расходов.....	63
4.3.6 Расчёт прочих расходов	64
4.4 Расчет общей себестоимости разработки.....	64
4.5 Цена разработки НИР	65
4.6 Расчет экономической эффективности проекта	65
Вывод по финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережению	66

5 Социальная ответственность	67
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности..	67
5.2 Производственная безопасность	69
5.2.1 Отклонение показателей микроклимата.....	70
5.2.2 Превышение уровня шума.....	72
5.2.3 Отсутствие или недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны	73
5.2.4 Поражение электрическим током	74
5.2.5 Повышенная напряженность электрического поля	74
5.3 Экологическая безопасность	75
5.4 Безопасность в ЧС	76
Вывод по социальной ответственности.....	78
Заключение	79
Conclusion	80
Список литературы.....	81
Приложение А (Обязательное) Функциональная схема стенда	84
Приложение Б (Обязательное) Гидравлическая схема стенда.....	87
Приложение В (Обязательное) Модель стенда в «MATLAB Simulink».....	89

Введение

На сегодняшний день активно развиваются технологии, реализующие виртуальную копию физического продукта или технологического процесса. Другими словами, это мост между физической и виртуальной составляющей объекта. С помощью различных датчиков собираются данные с реального физического объекта, а на основании этих данных реализуются математические модели, позволяющие понимать, анализировать и изменять параметры технологического процесса.

Рассматривая применение цифровых двойников в нефтегазовой промышленности, стоит говорить в общем о цифровом планировании в нефтеперерабатывающей области. В связи с достаточно низкой ценой нефти, на сегодняшний день даже те компании, которые ранее вели консервативную политику добычи нефтепродуктов, сегодня вынуждены разрабатывать, внедрять и тестировать технологии, позволяющие повысить эффективность проводимых процессов и принимаемых ими решений. Кроме того, необходимо повысить эффективность проводимого над оборудованием технического обслуживания путём внедрения аналитических технологий, которые в состоянии обеспечить персонал своевременной информацией о возможных отказах, оптимизации планов и сроках технического обслуживания [1].

Таким образом, внедрение аналитических технологий и интернета вещей позволяет использовать необходимую информацию с датчиков, исполнительных механизмов для прогнозирования технического обслуживания. При помощи машинного обучения путём непрерывного рассмотрения нетривиальных течений процессов появляется возможность прогноза и предотвращения возможных неполадок. Исходя из этого, возможно реализовать когнитивного помощника, дающего подробные пошаговые инструкции по регламенту протекания технологического процесса [2].

Учитывая всё вышесказанное, можно заявлять об актуальности темы, рассматриваемой в данной выпускной квалификационной работе.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка и реализация цифрового двойника стенда физического подобия по изучению алгоритмов автоматического управления в гидродинамических системах.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- обзор функциональных возможностей стенда;
- описание процессов, описывающих поведение жидкости в системе;
- создание полной адекватно описывающей гидростатические и гидродинамические процессы математической модели стенда, оценка физических параметров;
- валидация и корректировка модели;

Объектом разработки является стенд физического подобия гидравлической системы последовательно соединённых резервуаров.

Предметом разработки является полноценная математическая модель стенда физического подобия.

1 Описание стенда и происходящих в нем гидродинамических и гидростатических процессов

1.1 Функциональные возможности стенда

Функциональная схема стенда представлена в приложении А. Подача жидкости по полипропиленовым трубам осуществляется при помощи центробежного насоса. Насос управляется частотным преобразователем в диапазоне напряжений 0-10В, позволяя плавно изменять расход, создаваемый насосом, во всем диапазоне рабочих значений. Жидкость качается из резервуара Р-3, расположенного рядом с насосом и подается в трубопровод. Стенд содержит две ветки трубопровода, по которым возможно движение жидкости. Одна из ветвей подает жидкость напрямую в резервуар Р-1. Вторая ветка трубопровода называется обходной, поскольку подает жидкость к резервуару Р-2 в обход резервуара Р-1. При помощи ручных кранов и автоматических клапанов есть возможность перекрывать как каждую из веток по отдельности, так и использовать для течения жидкости обе из них. Кроме того, на стенде установлены два расходомера, позволяющих измерять расход жидкости на определенном участке трубопровода. Один из датчиков давления установлен на выходе с насоса для измерения создаваемого им давления, а второй находится на дне резервуара Р-2 для измерения давления столба жидкости на дно резервуара. Токовые значения с датчиков подаются на аналоговые входы контроллера. Связь между контроллером и используемым программными пакетами обеспечивается через протокол OPC. Программное обеспечение «CodeSyS» позволяет визуализировать данные, привязав выходы с датчика к тегам. Таким образом, возможно программно описать алгоритм их изменения, изменяя управляющее воздействие (рабочее напряжение насоса) [3].

На рисунке 1 представлена структурная схема автоматизированной системы управления технологическим процессом.

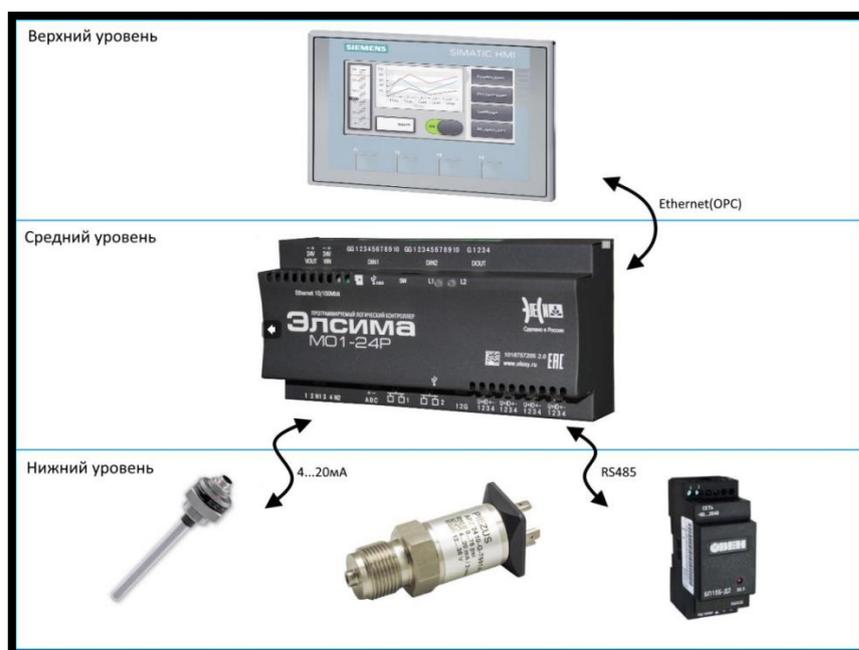


Рисунок 1 – Структурная схема АСУ ТП стенда

Резервуар Р-1, высотой в один метр, имеет цилиндрическую форму и оснащен двумя датчиками уровня. Аналоговый датчик позволяет контролировать текущий уровень в резервуаре, а при помощи дискретного датчика имеется возможность предотвращать аварийные ситуации. На выходе из резервуара Р-1 установлен аналоговый клапан, позволяющий изменять диаметр трубопровода для варьирования объема перетекаемой по трубопроводу жидкости. Уровень резервуара Р-2 может быть измерен путем его вычисления из давления столба жидкости, снимаемого с датчика давления, установленного на дне резервуара. На выходе резервуара Р-2 также установлен аналоговый клапан. При вытекании жидкости из резервуара Р-2, она сливается обратно в резервуар Р-3.

Рассматривая функционал стенда, можно выделить следующие основные его возможности:

1. исследование поведения течения жидкости по трубопроводу;
2. автоматическое управление основными параметрами системы;
3. возможность реализации двухконтурной системы управления;

4. оценка (идентификация) физических параметров оборудования (насос, клапаны);
5. отображение информации о протекающем технологическом процессе;
6. предупреждение аварийных ситуаций.

Отдельно стоит рассмотреть возможность реализации подробной математической модели (цифрового двойника) стенда. Достаточное количество датчиков, отображающих основные параметры, позволяет исследовать поведение жидкости в трубопроводе при различных наборах исходных данных [4]. Применяя теоретические знания, полученные из источников литературы, и используя основные законы гидродинамики и дифференциальные уравнения, возможно реализовать математическое подобие реального стенда, что и является основной задачей, поставленной в данной работе.

1.2 Создание модели насоса

Изначально была составлена математическая модель насоса (асинхронного двигателя) для её подстановки в общую модель для создания управляющего воздействия.

Создавая реальную модель асинхронного двигателя, для упрощения анализа и вычисления процессов, принимаются следующие допущения:

1. машина симметрична;
2. в учет не берется насыщение магнитной цепи двигателя;
3. потерями в стали статора и ротора можно пренебречь;
4. параметры обмоток сосредоточенные и не зависят от режима работы двигателя;
5. напряжения, токи и потокосцепления обмоток имеют синусоидальную форму;
6. параметры обмоток ротора приведены к цепи статора.

Геометрическая схема расположения обмоток машины имеет вид, показанный на рисунке 2.

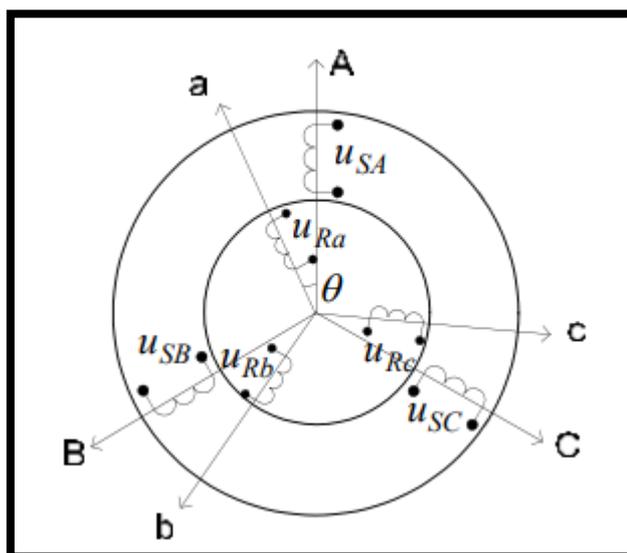


Рисунок 2 – Геометрическая схема расположения обмоток асинхронного двигателя

Для обмоток статора использованы обозначения А, В, С, для обмоток ротора – a, b, c . К каждой обмотке в общем случае может быть подведено питание – напряжения u_{Si}, u_{Rj} .

Взаимное расположение статора и ротора характеризуется угловым положением ротора θ , измеряемым в так называемых геометрических (обычных) радианах или градусах, зависящих от текущей частоты вращения вала двигателя ω .

Взаимное расположение систем координат ротора и статора определяется электрическим углом:

$$\theta_R = z_p \theta, \quad (1)$$

где θ_R – электрический угол, рад.;

z_p – количество полюсов;

θ – фактический угол, рад.

Данный угол определяется частотой вращения поля ротора относительно статора:

$$\omega_R = \frac{d\theta_R}{dt} = z_p \omega, \quad (2)$$

где ω_R – частота вращения ротора относительно статора, c^{-1} ;
 ω – частота вращения статора, c^{-1} .

Из начала координат трехфазной системы координат А, В, С, можно провести вектор \vec{I}_S такой, что его проекции на оси А, В, С равны мгновенным значениям токов каждой из фаз статора:

$$\begin{cases} i_{SA} = I_{Sm} \sin(\omega_S t + \psi_i); \\ i_{SB} = I_{Sm} \sin\left(\omega_S t + \psi_i - \frac{2\pi}{3}\right); \\ i_{SC} = I_{Sm} \sin\left(\omega_S t + \psi_i + \frac{2\pi}{3}\right), \end{cases} \quad (3)$$

где I_{Sm} – амплитуда фазного тока статора, А;
 ω_S – частота вращения поля статора, c^{-1} ;
 ψ_i – начальная фаза, эл.рад.

Величина частоты вращения поля статора связана с синхронной частотой вращения двигателя через коэффициент пропорциональности:

$$\omega_S = 2\pi f_S = z_p \omega_0, \quad (4)$$

где f_S – частота вращения поля статора, Гц;
 ω_0 – синхронная частота вращения двигателя, c^{-1} .

Данный вектор вращается относительно неподвижной системы координат А, В, С с угловой частотой ω_S поля статора, и его называют обобщенным вектором тока статора. С помощью этого вектора можно представить синусоидальные токи всех трех фаз статора симметричной машины в любой момент времени.

Таким образом, была составлена структурная схема асинхронного

двигателя для задач скалярного управления. Скалярное управление заключается в поддержании определенных соотношений между амплитудами электрических величин без контроля взаимного расположения векторов. Для формирования управляющих воздействий при этом наиболее удобно использовать синхронную систему координат x, y , которая вращается относительно неподвижной с угловой скоростью:

$$\omega_S = 2\pi f_S. \quad (5)$$

Кроме того, при управлении со стороны статора ротор двигателя замкнут накоротко непосредственно либо через добавочный реостат. Соответственно:

$$\vec{U}_R = 0, \quad (6)$$

где \vec{U}_R – напряжение на роторе, В.

Уравнение движения имеет вид:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (7)$$

где M – момент на валу двигателя, Н·м;

M_c – момент сопротивления, Н·м;

J – момент инерции, кг · м².

На основании упрощенного математического описания может быть получена структурная схема, справедливая для линейной части механических характеристик асинхронного двигателя. Данная схема является исходной при решении задач синтеза систем асинхронного электропривода со скалярным управлением, когда обеспечивается работа двигателя на линейной части механических характеристик [5]. Составленная представлена на рисунке 13.

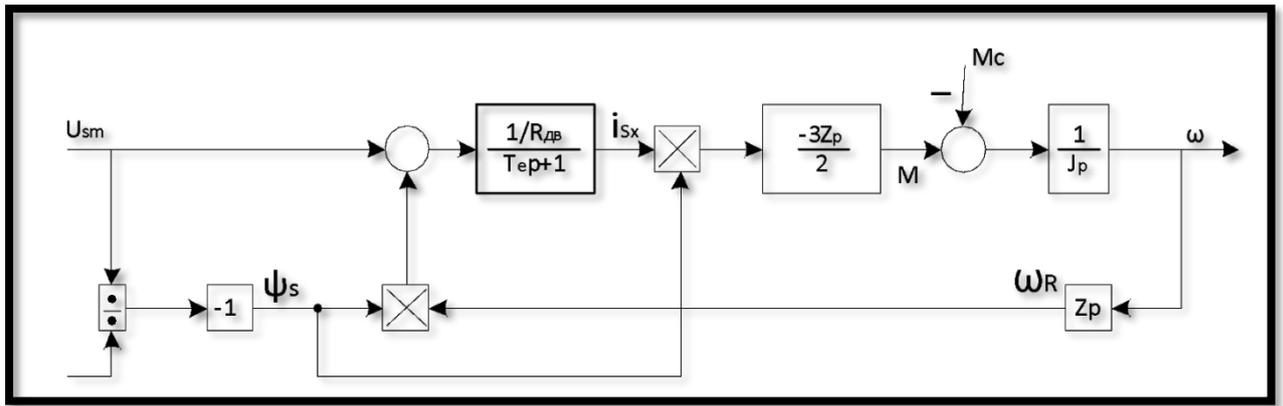


Рисунок 3 – Структурная схема асинхронного двигателя

1.3 Математическое описание протекающих процессов

По трубопроводу жидкость с некоторой скоростью (в зависимости от величины подачи жидкости насосом) подается на вход первого резервуара и начинает его наполнять.

Существует уравнение, описывающее зависимость между скоростью потока жидкости и её давлением. Согласно этому закону, если вдоль линии потока давление жидкости в трубопроводе увеличивается, то скорость, с которой течет жидкость, уменьшается. Другими словами, это уравнение является следствием закона сохранения энергии. Такое уравнение называется уравнением Бернулли и имеет следующий вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = const, \quad (8)$$

- где ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 v – скорость потока жидкости, м/с;
 g – ускорение свободного падения, м²/с;
 h – высота столба жидкости, м;
 p – давление, Па.

По сути, данное уравнение является основным для описания движения струи жидкости без учета её трения о стенки сосуда. Для приближенного

описания течения реальных жидкостей (с учетом трения) используется интеграл Бернулли с добавлением слагаемых, содержащих потери на местных сопротивлениях и потери напора по длине трубопровода [6].

Существует формула, позволяющая рассчитать скорость потока жидкости из расхода:

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (9)$$

где Q – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;

S – площадь сечения трубопровода, м^2 .

Стоит учесть, что результирующая подача жидкости в первый резервуар состоит из двух слагаемых: входной и выходной расходы. Жидкость вытекает из первого резервуара под действием давления, которое жидкость сама создает на дно сосуда. Если величина выходного расхода больше, чем величина входного расхода, то очевидно, что уровень жидкости в резервуаре будет уменьшаться (вода перетекает в другой резервуар). Текущий объём жидкости в резервуаре рассчитывается по следующей формуле:

$$V(t) = \int (Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}}) dt, \quad (10)$$

где $V(t)$ – объём жидкости в определенный момент времени, м^3 .

С другой стороны, объём жидкости в резервуаре (исходя из цилиндрической формы резервуара) находится по формуле:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot h, \quad (11)$$

где h – высота столба жидкости в резервуаре, м ;

R – радиус основания резервуара, м .

Тогда, уровень жидкости в резервуаре равен:

$$h = \frac{V}{\pi \cdot R^2}. \quad (12)$$

Важным параметром является давление, создаваемое столбом жидкости на дно резервуара. От разницы величин давлений в двух резервуарах будет зависеть скорость истекания жидкости из резервуара, поэтому необходимо отслеживать данные величины. Формула для нахождения давления, создаваемого столбом жидкости, представлена ниже:

$$p = \rho gh. \quad (13)$$

Таким образом, можно получить подачу жидкости на выходе резервуара:

$$Q_{\text{ВЫХ}} = v_{\text{ВЫХ}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (14)$$

Данная формула описывает идеальный случай. В реальной системе стоит учитывать потери напора в трубопроводе, которые вызваны трением молекул жидкости о стенки, местные изменения формы трубопровода, потери на сужение и расширение струи (в случаях прикрепления трубопровода к резервуарам),

Помимо всего, имеет место явление сжатия струи жидкости. Данное явление описывается коэффициентом сжатия струи. Для воды данный коэффициент примерно равен 0.6:

Кроме того, в момент втекания в резервуар и вытекания из него жидкости, имеют место потери напора, называемые местными, обусловленные резким сужением и резким расширением площади сечения потока жидкости. Помимо сужения и расширения сечения трубопровода, местные потери возникают при изменении формы трубопровода и прохождении жидкости через клапаны, датчики. Такие потери характеризуются коэффициентом местного сопротивления [7]. Величины коэффициентов местного сопротивления для различных участков трубопровода можно найти в

справочнике [8]. Коэффициенты местного сопротивления обладают свойством аддитивности. Таким образом, можно сложить все коэффициенты и посчитать потери на всей ветке. Среди технических характеристик датчиков, клапанов присутствует пропускная способность. Данная величина связана с коэффициентом местного сопротивления и используется для его расчёта для реального оборудования [9]. Зависимость коэффициента местного сопротивления от пропускной способности представлена ниже:

$$\xi = \frac{10.1972 \cdot 3600^2 \cdot 2g \cdot \pi^2 \cdot d^4}{16K_{vs}^2}, \quad (15)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления;
 K_{vs} – пропускная способность прибора, м³/ч;
 d – диаметр трубопровода, м.

Местные потери рассчитываются по формуле:

$$\Delta h = \xi \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (16)$$

где Δh - потеря напора, м;
 v – скорость потока жидкости, м/с.

Тогда, скорость жидкости в момент её вытекания из резервуара, можно описать следующим уравнением:

$$v_{\text{вых}} = \varepsilon \frac{\sqrt{2g \cdot \Delta h}}{\sqrt{\xi}}, \quad (17)$$

где ε – коэффициент сжатия струи;
 $v_{\text{вых}}$ – скорость жидкости в момент вытекания из резервуара, м/с;
 ξ – сумма коэффициентов местного сопротивления.

Расход жидкости в момент её выхода из резервуара находится по следующей формуле:

$$Q_{\text{вых}} = \varepsilon \frac{\sqrt{2g \cdot \Delta h}}{\sqrt{\xi}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (18)$$

Следующим рассмотренным видом потерь стали гидростатические потери, обусловленные вертикальным положением некоторых участков трубопровода:

$$\Delta h = \frac{H \cdot \rho}{1000}, \quad (19)$$

где H – высота вертикального участка трубопровода, м;

ρ – плотность переливаемой жидкости, кг/м³.

При движении жидкости по прямолинейному участку трубопровода гидростатические потери отсутствуют, однако по ходу движения жидкости присутствуют гидродинамические потери (потери на трение жидкости). Данный вид потерь вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{L v^2}{D 2g}, \quad (20)$$

где λ – коэффициент трения жидкости;

L – длина участка трубопровода, м;

D – диаметр сечения трубопровода, м.

$$\lambda = \frac{1}{(1.8 \cdot \lg(Re) - 1.5)^2}, \quad (21)$$

где Re – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса является неким идентификатором, по которому

можно определить тип течения жидкости. Ламинарный тип течения – послойное перемещение жидкости без перемешивания. Если скорость частиц жидкости при заданном диаметре трубопровода больше определенного критического значения, то такой вид движения жидкости называют турбулентным, то есть беспорядочным движением с перемешиванием частиц [10]. Число Рейнольдса определяется следующей формулой:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}, \quad (22)$$

где ν – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

Re – число Рейнольдса;

Далее было изучено поведение жидкости в сообщающихся сосудах. Было замечено, что наполнение второго резервуара в данном случае происходит за счёт разности давлений в резервуарах Р-1 и Р-2.

Тогда можно рассчитать динамику изменения уровня жидкости в первом резервуаре с учётом разницы уровней и потерь:

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{S} \left(Q - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\xi_1}} s \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_2)} \right), \quad (23)$$

где ξ_1 – сумма коэффициентов местного сопротивления на данном участке трубопровода,

h_1 – уровень жидкости в первом резервуаре, м,

h_2 – уровень жидкости во втором резервуаре, м.

Динамика изменения уровня жидкости при её вытекании из второго резервуара рассчитывается аналогично, за исключением того, что выходной расход первого резервуара является входным расходом для второго вследствие перетекания жидкости из Р-1 в Р-2. Жидкость вытекает из второго резервуара со скоростью, зависящей от высоты столба жидкости в этом резервуаре и

статической разницы давления, обусловленной разницы уровней, на которых установлены резервуары Р-2 и Р-3. Разность давлений в резервуарах не учитывается, поскольку вход трубопровода в Р-3 сделан выше максимально возможного уровня жидкости в этом резервуаре. Тогда, можно описать динамику изменения уровня жидкости в Р-2 следующим уравнением:

$$\dot{h}_2 = \frac{\varepsilon S}{S} \left(\frac{1}{\sqrt{\xi_1}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - \frac{1}{\sqrt{\xi_2}} \sqrt{2g(h_2 + H)} \right), \quad (24)$$

где ξ_2 – сумма коэффициентов местного сопротивления на участке трубопровода от резервуара Р-2 к резервуару Р-3;

H – разница уровней жидкости в резервуарах Р-2 и Р-3, м.

2 Создание модели в среде «MATLAB Simulink»

2.1 Ветвь от М-1 к Р-1

Для создания модели были использованы стандартные средства, предоставляемые «MATLAB Simulink». Данная среда позволяет моделировать динамику протекающих процессов, и наблюдать и контролировать необходимые параметры.

Исходя из уравнений, представленных ранее, был организован процесс создания модели рассматриваемой системы управления уровнем жидкости в резервуарах. Были составлены модели каждого из резервуаров с учётом потерь скорости жидкости в трубопроводах. Имеется возможность наблюдения за параметрами системы в реальном времени.

Далее представлено подробное описание составленной модели.

Скорость жидкости на начальном участке трубопровода от насоса к резервуару Р-1 определяется формулой:

$$v_1 = \frac{Q_1}{s\varepsilon}, \quad (25)$$

где v_1 – скорость жидкости, протекающей по участку трубопровода, м/с;

ε – коэффициент сужения струи (для воды $\varepsilon \approx 0.6$);

Q_1 – расход жидкости, создаваемый насосом, м³/с;

s – площадь поперечного сечения трубопровода, м².

Расход – объем жидкости, протекающий через поперечное сечение водотока (водопровода) за единицу времени [11]. Накачиваемая насосом жидкость по трубопроводу попадает в резервуар Р-1. Однако, при этом скорость движущегося потока жидкости при попадании в резервуар меньше, чем в момент начала её движения вследствие потерь напора, обусловленных трением жидкости о стенки сосуда, местными изгибами трубопровода, участками трубопровода, где жидкость проходит через клапаны и

расходомеры, гидростатическими потерями напора. Далее приведен расчет потерь на данном участке трубопровода.

Суммарные потери на данном участке трубопровода:

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3, \quad (26)$$

где Δh – суммарные потери напора на участке, м.в.ст.;

Δh_1 – потери напора по длине, м.в.ст.;

Δh_2 – потери на местные сопротивления, м.в.ст.;

Δh_3 – гидростатические потери, м.в.ст.

Потери по длине, возникающие вследствие трения воды о стенки трубопровода имеют вид:

$$\Delta h_1 = \lambda_1 \cdot \frac{L_1 v_1^2}{D 2g}, \quad (27)$$

где λ_1 – коэффициент гидравлического трения;

L_1 – длина рассматриваемого участка трубопровода, м;

D – диаметр сечения трубопровода, м.

$$\lambda_1 = \frac{1}{(1.8 \cdot \lg(Re_1) - 1.5)^2}, \quad (28)$$

где Re_1 – число Рейнольдса для данного участка трубопровода.

$$Re_1 = \frac{v_1 \cdot D}{\nu}. \quad (29)$$

Потери на местных сопротивлениях, возникающие при прохождении жидкости через различные не прямые участки трубопровода:

$$\Delta h_2 = \xi_1 \frac{v_1^2}{2g}, \quad (30)$$

где ξ_1 – суммарный коэффициент местного сопротивления на рассматриваемом участке трубопровода.

$$\xi_1 = 3\xi_T + 3\xi_{\Pi} + \xi_{pp} + \xi_{pc} + \xi_{dk}, \quad (31)$$

где ξ_T – коэффициент местного сопротивления тройника;

ξ_{Π} – коэффициент местного сопротивления поворота трубопровода под прямым углом;

ξ_{pp} – коэффициент местного сопротивления для резкого расширения трубопровода;

ξ_{pc} – коэффициент местного сопротивления для резкого сужения трубопровода;

ξ_{dk} – коэффициент местного сопротивления для дискретного клапана.

Каждая из этих величин является табличной, кроме коэффициента местного сопротивления для клапана. В документации к клапану указана пропускная способность клапана. Исходя из зависимости, представленной ранее, можно определить его коэффициент местного сопротивления.

$$\xi_{dk} = \frac{10.1972 \cdot 3600^2 \cdot 2g \cdot \pi^2 \cdot D^4}{16K_{vs}^2}, \quad (32)$$

где K_{vs} – пропускная способность дискретного клапана.

Для используемого клапана $K_{vs} = 8,82$ м³/ч. Тогда, его коэффициент местного сопротивления:

$$\xi_{dk} = 3.29.$$

Гидростатические потери в метрах водного столба:

$$\Delta h_3 = \frac{\rho H_1}{1000}, \quad (33)$$

где H_1 – высота вертикального отрезка трубопровода, м.

Тогда, формула для нахождения суммарных потерь примет вид:

$$\Delta h = \left(\lambda_1 \cdot \frac{L_1}{D} + \xi_1 \right) \cdot \frac{v_1^2}{2g} + \frac{\rho H_1}{1000}. \quad (34)$$

Претерпевая данные потери, жидкость уже с другой скоростью попадает в резервуар Р-1. Тогда входная подача жидкости в резервуар Р-1 равна:

$$Q_1 = v_1 \cdot s, \quad (35)$$

где v_1 – скорость жидкости в момент её втекания в резервуар Р-1, м/с.

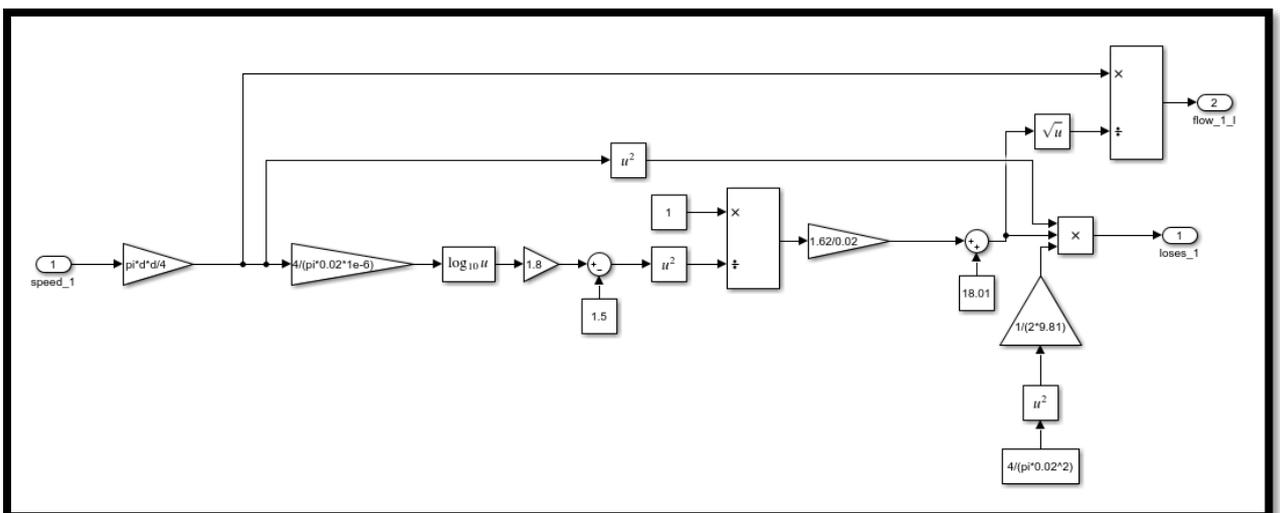


Рисунок 3 – Потери напора на участке трубопровода от насоса до Р-1

2.2 Ветвь от P-1 к P-2

При открытии аналогового клапана на выходе с резервуара P-1, жидкость под собственным давлением начинает перетекать из резервуара P-1 в резервуар P-2. Исходя из этого, изначально объем в резервуаре P-1 был рассчитан как интеграл от расхода во времени при помощи блока «Integrator».

$$V_1 = \int (Q_1 - Q_2) dt, \quad (36)$$

где V_1 – объем жидкости в первом резервуаре, м³;

Q_2 – расход жидкости в момент выхода жидкости из первого резервуара, м³/с.

Форма резервуара цилиндрическая, соответственно из формулы площади цилиндра:

$$V_1 = \pi R_1^2 h_1, \quad (37)$$

где V_1 – объем жидкости в резервуаре P-1, м³;

h_1 – уровень столба жидкости в резервуаре P-1, м.;

R_1 – радиус поперечного сечения резервуара P-1, м.

Таким образом, можно найти текущий уровень жидкости в рассматриваемом резервуаре P-1:

$$h_1 = \frac{V_1}{\pi R_1^2}. \quad (38)$$

Зная текущее значение уровня в резервуаре, можно найти значение гидростатического давления, создаваемого столбом жидкости на дно резервуара. Связь давления и уровня жидкости определяется следующей формулой:

$$p_1 = \rho g h_1, \quad (39)$$

где p_1 – давление, создаваемое столбом жидкости в рассматриваемом резервуаре Р-1, Па.

Трубопровод от первого резервуара ко второму не имеет изгибов и вертикальных участков, поэтому местные сопротивления возникают только при прохождении жидкости через аналоговый клапан, при резком сужении и расширении трубопровода (при прикреплении трубопровода к резервуарам) и при прохождении жидкости через тройник. Необходимо учесть гидродинамическое сопротивление (трение частиц воды о стенки трубопровода). Потери при движении жидкости от первого резервуара ко второму были рассчитаны в отдельной подсистеме. Далее описан процесс расчета данных значений.

Суммарные потери на участке от резервуара Р-1 до Р-2:

$$\Delta h = \Delta h_4 + \Delta h_5, \quad (40)$$

где Δh_4 – потери напора по длине, м.в.ст.;

Δh_5 – потери на местные сопротивления, м.в.ст.;

Входным параметром подсистемы является скорость выходного потока без учёта потерь. Необходимо рассчитать число Рейнольдса на данном участке. Данный параметр является обязательным для расчёта гидродинамической потери напора:

$$Re_2 = \frac{v_2 \cdot D}{\nu}, \quad (41)$$

где Re_2 – число Рейнольдса для участка трубопровода между резервуарами Р-1 и Р-2.

Далее, был рассчитан коэффициент трения жидкости о стенки сосуда.

$$\lambda_2 = \frac{1}{(1.8 \cdot \lg(Re_2) - 1.5)^2}. \quad (42)$$

Формула расчета гидродинамических потерь на данном участке выглядит следующим образом:

$$\Delta h_4 = \lambda_2 \cdot \frac{L_2 v_2^2}{D \cdot 2g}, \quad (43)$$

где L_2 – длина участка трубопровода, м;

Δh_4 – гидродинамические потери, м.в.ст.

Потери на местные сопротивления:

$$\Delta h_5 = \xi_2 \frac{v_2^2}{2g}, \quad (44)$$

где ξ_2 – суммарный коэффициент местного сопротивления на рассматриваемом участке трубопровода.

$$\xi_2 = \xi_T + \xi_{pc} + \xi_{pp} + \xi_{ак}, \quad (45)$$

где $\xi_{ак}$ – коэффициент местного сопротивления аналогового клапана.

$$\xi_{ак} = \frac{10.1972 \cdot 3600^2 \cdot 2g \cdot \pi^2 \cdot D^4}{16K_{vs}^2} \quad (46)$$

Для установленного на стенде аналогового клапана $K_{vs} = 6,3 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Тогда, коэффициент местного сопротивления для данного клапана:

$$\xi_{ак} = 6.45.$$

Тогда, формула для нахождения суммарных потерь примет вид:

$$\Delta h = \left(\lambda_2 \cdot \frac{L_2}{D} + \xi_2 \right) \cdot \frac{v_2^2}{2g}. \quad (47)$$

Тогда, общее уравнение, описывающее изменение уровня в первом резервуаре, выглядит следующим образом:

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{S} \left(Q_1 - \varepsilon s \frac{1}{\sqrt{\xi_2}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \right), \quad (48)$$

где \dot{h}_1 – скорость изменения уровня в первом резервуаре, м/с;

S – площадь основания резервуара, м.

Модель, описывающая динамику в первом резервуаре и реализующая все уравнения, описанные ранее, представлена на рисунках ниже:

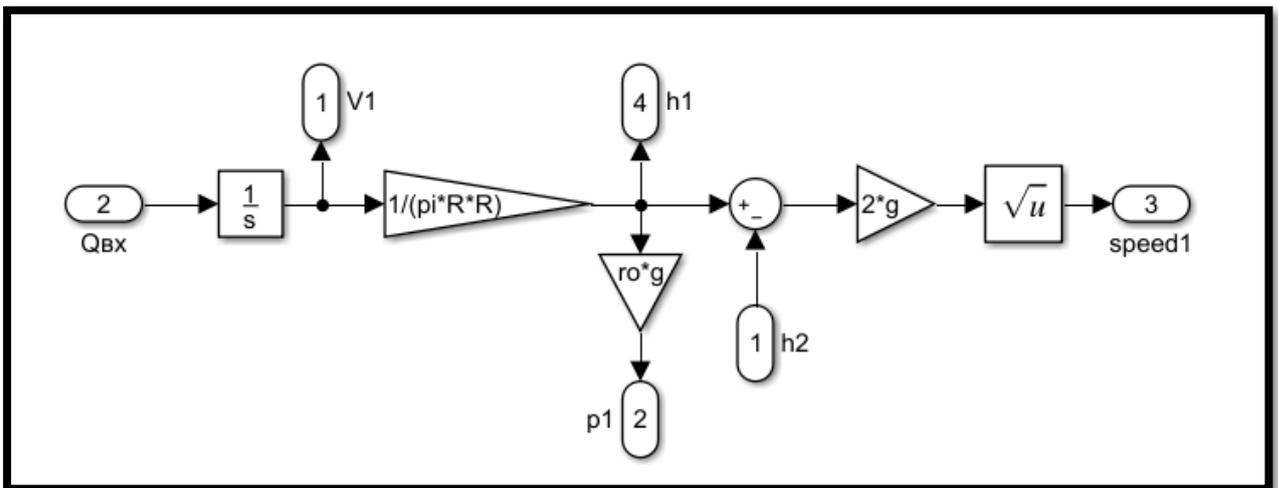


Рисунок 4 – Модель резервуара Р-1

Жидкость, вытекая из резервуара Р-1, попадет в резервуар Р-2. Входная подача жидкости в резервуар Р-2 равна:

$$Q_2 = \frac{\varepsilon S}{\sqrt{\xi_2}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)}, \quad (49)$$

где Q_2 – входная подача жидкости во второй резервуар, м³/с.

Тогда, скорость входного потока в резервуар Р-2 равна (согласно формуле Торичелли):

$$v_2 = \frac{Q_2}{\varepsilon S} \cdot \sqrt{\xi_2}. \quad (50)$$

Таким образом, объем в резервуаре Р-2 есть интеграл по времени от разницы входной и выходной подач:

$$V_2 = \int (Q_2 - Q_3) dt, \quad (51)$$

где V_2 – текущий объем жидкости во втором резервуаре, м³;

Q_3 – выходная подача жидкости из резервуара Р-2, м³/с.

Зная объем жидкости в определенный момент времени, можно найти уровень жидкости в данном резервуаре в этот момент времени:

$$V_2 = \pi R_2^2 h_2; \quad (52)$$

$$h_2 = \frac{V_2}{\pi R_2^2}. \quad (53)$$

Тогда, давление в резервуаре Р-2 выражается следующим образом:

$$p_2 = \rho g h_2, \quad (54)$$

где p_2 – давление в резервуаре Р-2, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

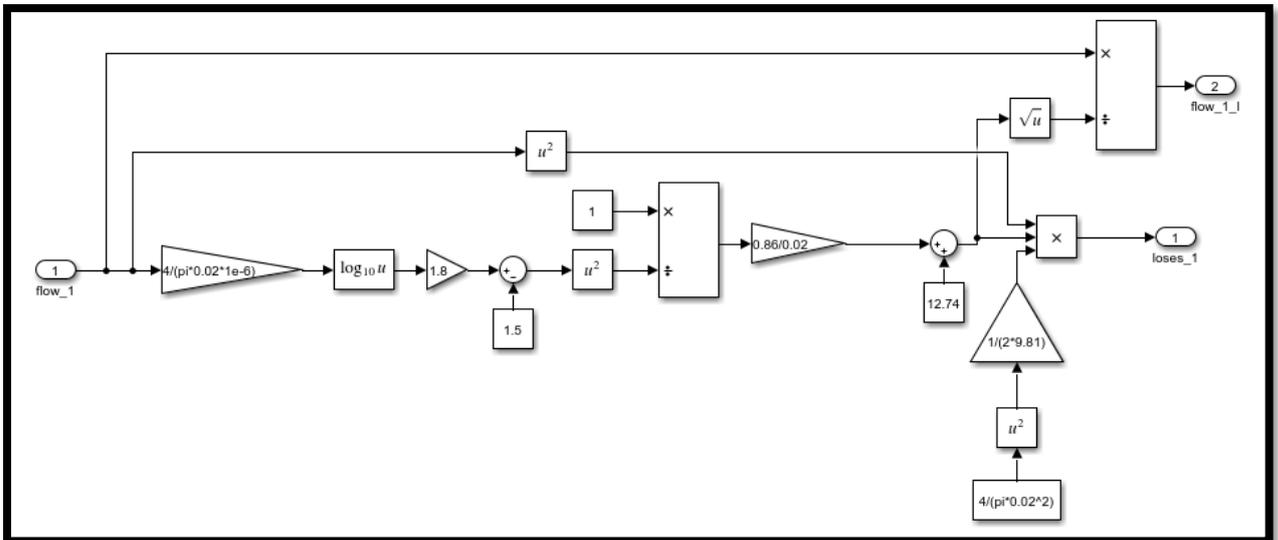


Рисунок 5 – Расчет потерь напора на участке от Р-1 к Р-2

Необходимо рассчитать потери напора, возникающие при движении жидкости по трубопроводу от резервуара Р-2 к резервуару Р-3. Отличие от прошлого расчета состоит в том, что на данном участке трубопровода имеется вертикальный наклон трубы, то есть присутствуют гидростатические изменения напора. Кроме того, присутствуют изгибы трубопровода (прямой угол), то есть необходимо принять во внимание коэффициент местного сопротивления на изгиб трубопровода.

$$\Delta h = \Delta h_7 + \Delta h_8 + \Delta h_9, \quad (55)$$

где Δh_7 – потери напора по длине, м.в.ст.;

Δh_8 – потери на местные сопротивления, м.в.ст.;

Δh_9 – гидростатические потери, м.в.ст.

$$Re_3 = \frac{v_2 \cdot D}{\nu}, \quad (56)$$

где Re_3 – число Рейнольдса для участка трубопровода между резервуарами Р-2 и Р-3.

Далее, был рассчитан коэффициент трения жидкости о стенки сосуда.

$$\lambda_3 = \frac{1}{(1.8 \cdot \lg(Re_3) - 1.5)^2}. \quad (57)$$

Потери напора, возникающие при движении жидкости по трубопроводу:

$$\Delta h_7 = \lambda \cdot \frac{L_3 v_2^2}{D 2g}, \quad (58)$$

где L_3 – длина участка трубопровода, м.

Потери напора на местных изменениях формы трубопровода были рассчитаны при помощи формул, представленных ниже.

$$\Delta h_8 = \xi_3 \frac{v_2^2}{2g}, \quad (59)$$

где ξ_3 – суммарный коэффициент местного сопротивления на рассматриваемом участке трубопровода.

$$\xi_3 = 2\xi_{\text{п}} + \xi_{\text{рс}} + \xi_{\text{рр}} + \xi_{\text{ак}}, \quad (60)$$

$$\Delta h_9 = \frac{\rho \cdot H_2}{1000}, \quad (61)$$

где H_2 – высота вертикального участка трубопровода, м.

Тогда, общие потери напора в трубопроводе:

$$\Delta h = \frac{\rho \cdot H_2}{1000} + \left(\xi_3 + \lambda_3 \cdot \frac{L_3}{D} \right) \cdot \frac{v_2^2}{2g}. \quad (62)$$

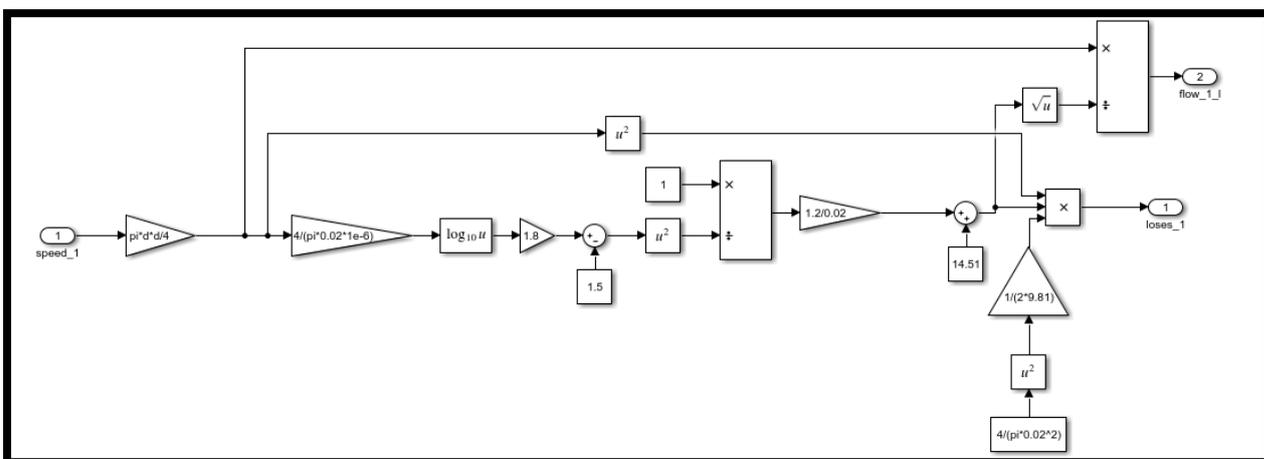


Рисунок 6 – Модель потерь напора на участке от Р-2 к Р-3

Тогда, общее уравнение, описывающее изменение уровня в резервуаре Р-2, выглядит следующим образом:

$$\dot{h}_2 = \frac{\varepsilon S}{S} \left(\frac{1}{\sqrt{\xi_2}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - \frac{1}{\sqrt{\xi_3}} \sqrt{2gh_2} \right). \quad (63)$$

Модель, описывающая динамику во втором резервуаре, представлена на рисунках ниже:

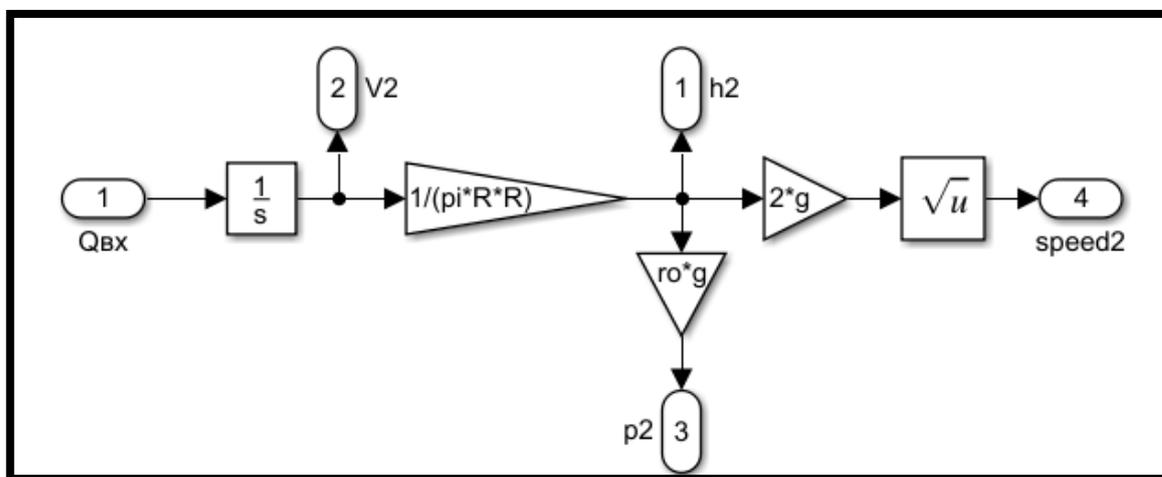


Рисунок 7 – Модель резервуара Р-2

2.3 Ветвь от P-2 к P-3

Вытекая из второго резервуара, жидкость по трубопроводу попадает обратно в исходный резервуар P-3, откуда снова нагнетается насосом в трубопровод. Для данного резервуара аналогично были посчитаны контролируемые величины. Модель, отображающая преобразования величин, представлена на рисунке ниже.

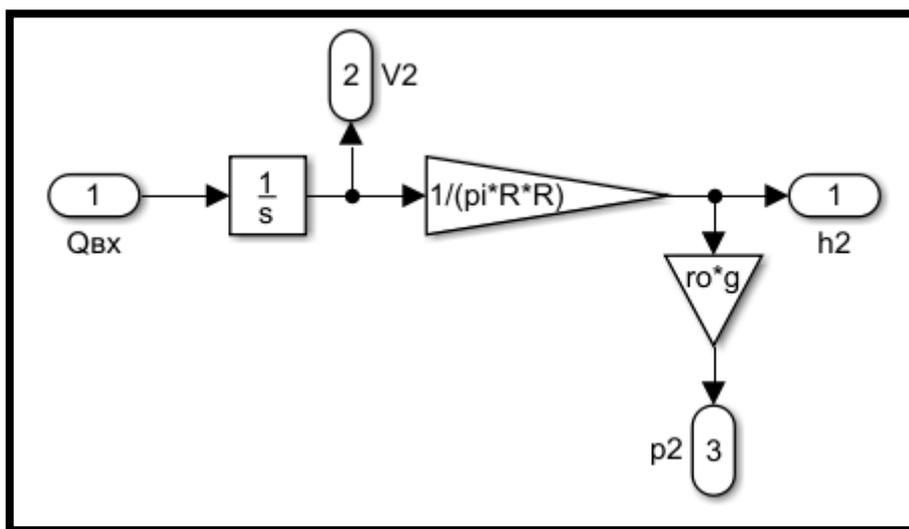


Рисунок 8 – Модель резервуара P-3

2.4 Обходная ветвь

Последней ветвью трубопровода является обходная. Необходимо рассчитать потери напора, возникающие при движении жидкости по трубопроводу от насоса к резервуару P-2 в обход P-1. На данном участке присутствует участок вертикального трубопровода, потери по длине и местные потери в виде изгибов трубопровода, потерь напора при прохождении через тройники и клапаны, потерь при резком расширении и сужении площади сечения трубопровода.

$$\Delta h = \Delta h_{10} + \Delta h_{11} + \Delta h_{12}, \quad (64)$$

где Δh_{10} – потери напора по длине, м.в.ст.;

Δh_{11} – потери на местные сопротивления, м.в.ст.;

Δh_{12} – гидростатические потери, м.в.ст.

$$Re_4 = \frac{v_3 \cdot D}{\nu}, \quad (65)$$

где Re_4 – число Рейнольдса для участка трубопровода между насосом и резервуаром Р-2,

v_3 – скорость жидкости при начале движения по обходной ветке, м/с.

$$\lambda_4 = \frac{1}{(1.8 \cdot \lg(Re_4) - 1.5)^2}. \quad (66)$$

Потери напора, возникающие при движении жидкости по трубопроводу:

$$\Delta h_{10} = \lambda_4 \cdot \frac{L_4 v_3^2}{D \cdot 2g}, \quad (67)$$

где L_4 – длина участка трубопровода, м.

Потери напора на местных изменениях формы трубопровода были рассчитаны при помощи формул, представленных ниже.

$$\Delta h_{11} = \xi_4 \frac{v_3^2}{2g}, \quad (68)$$

где ξ_4 – суммарный коэффициент местного сопротивления на рассматриваемом участке трубопровода.

$$\xi_4 = 4\xi_{\Pi} + \xi_{pc} + \xi_{pp} + 2\xi_{dk} + 4\xi_T. \quad (69)$$

$$\Delta h_{11} = \frac{\rho \cdot H_3}{1000}, \quad (70)$$

где H_3 – высота вертикального участка трубопровода, м.

Тогда, общие потери напора в трубопроводе:

$$\Delta h = \frac{\rho \cdot H_3}{1000} + \left(\xi_4 + \lambda_4 \cdot \frac{L_4}{D} \right) \cdot \frac{v_3^2}{2g}. \quad (71)$$

Кроме того, необходимо учесть транспортное запаздывание, насосную характеристику.

2.5 Реализация транспортного запаздывания

Транспортное запаздывание – отрезок времени с момента подачи напряжения на насос до момента, когда жидкость поступит в резервуар (датчик зафиксирует изменения уровня жидкости) [12]. Был найден следующий метод нахождения данной величины. При взятии интеграла скорости жидкости, протекающей по трубопроводу от насоса до первого резервуара, получается расстояние, пройденное жидкостью. Так как длина участка трубопровода известна, можно создать условие, при достижении которого уровень жидкости в резервуаре начнет изменяться (до этого уровень равен нулю, так как жидкость еще движется по трубопроводу).

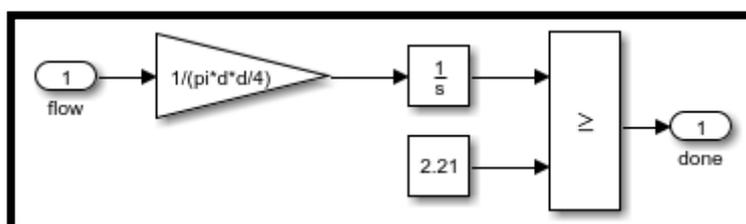


Рисунок 9 – Реализация транспортной задержки для участка от насоса до резервуара Р-1

Аналогичным образом была рассчитана величина транспортной задержки для участка трубопровода от резервуара Р-1 к резервуару Р-2.

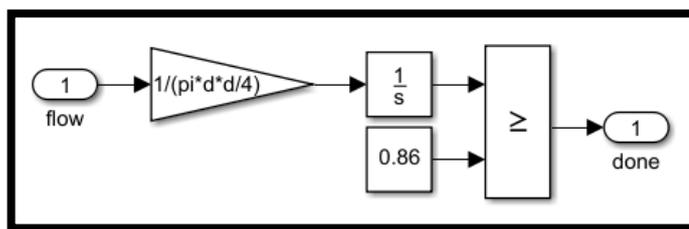


Рисунок 10 – Транспортная задержка для участка трубопровода от резервуара Р-1 к резервуару Р-2

2.6 Снятие со стенда и интеграция в модель насосной характеристики

Кроме того, со стенда была снята насосная характеристика. Насосная характеристика – зависимость расхода жидкости от величины давления в трубопроводе при работе насоса на определенном значении напряжения. Общий вид насосной характеристики представлен на рисунке 9.

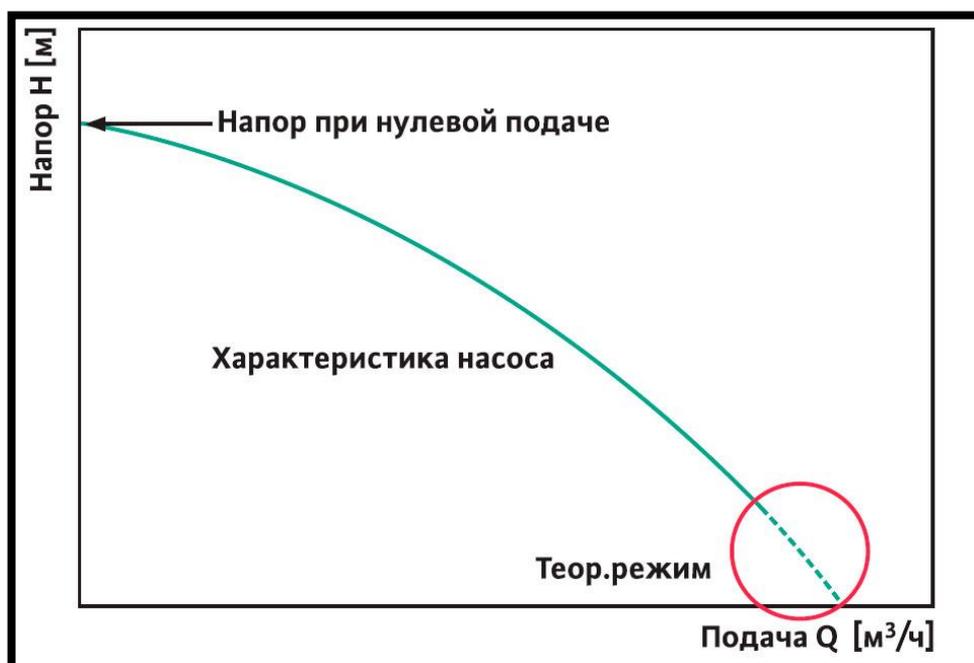


Рисунок 11 – Общий вид насосной характеристики

Из рисунка выше видно, что при нулевой подаче, давление в трубопроводе максимально. В реальном случае величина расхода варьируется степенью открытия клапана или крана. Таким образом, максимальное значение давления достигается при полностью закрытом клапане. Крутизна кривой зависит от величины давления нагнетаемого насосом потока жидкости. Теоретическим режимом называется участок кривой, который в идеальном случае обеспечивал максимальную подачу жидкости при нулевом давлении. В случае течения реальной жидкости такой участок отсутствует по причине постоянного трения жидкости о стенки сосуда, то есть жидкость в любом случае создает некоторое давление в трубопроводе [13].

Таким образом, область рабочих напряжений для насоса, установленного на стенде, лежит в диапазоне 0 – 10 В. При изменении значения рабочего напряжения насоса, кривая насосной характеристики смещается по каждой из осей (в зависимости от направления изменения значения напряжения). Для учёта насосной характеристики, на стенд дополнительно был установлен кран с ручным управлением, позволяющий частично или полностью закрывать участок трубопровода. Кроме того, на стенде установлены датчик давления и расходомер. Таким образом, на каждом напряжении было определен набор точек, в каждой из которых были сняты значения расхода и давления жидкости в трубопроводе. После этого, была произведена интерполяция некоторых имеющих место значений расхода и давления для построения более точной кривой. Исходя из этого, были получены несколько насосных характеристик, увеличивающих точность математической модели. Полученные насосные характеристики были сведены в один график и представлены на рисунке 10.

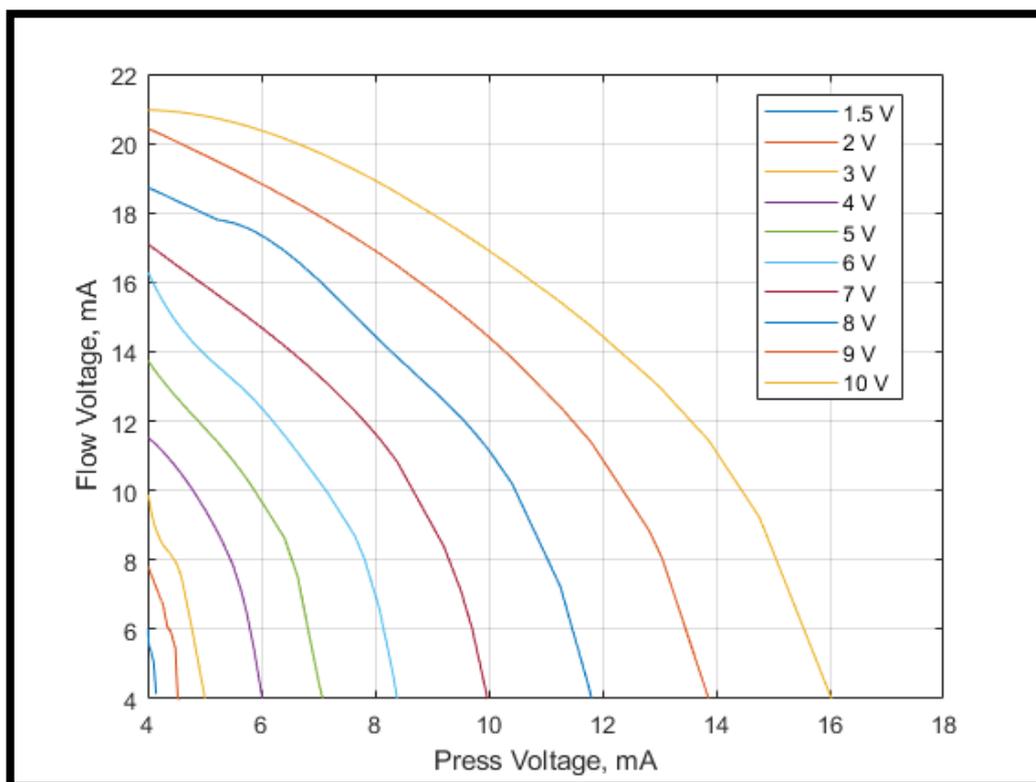


Рисунок 12 – Полученные насосные характеристики

Далее, для получения расхода как функции давления и напряжения, была построена трехмерная поверхность, описывающая такую зависимость. По оси X расположены значения тока с датчика давления (мА), по оси Y – значения напряжения насоса (В), а по оси Z – значения с датчика расхода при данном давлении и напряжении (мА).

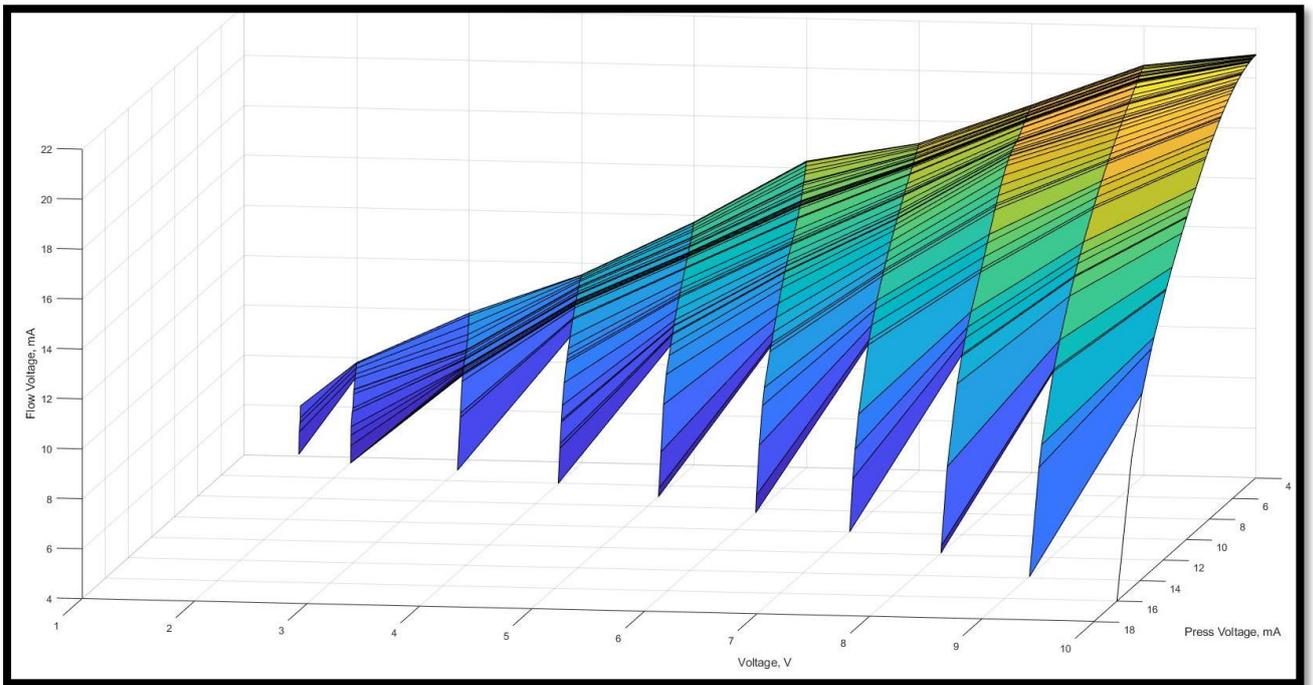


Рисунок 13 – Трехмерная поверхность зависимости расхода от давления и напряжения

3 Валидация модели

Составленная модель повторяет характер переходного процесса, однако переходная характеристика параметров является недостаточно точной по отношению к характеристике, полученной в результате проведения эксперимента с реальным стендом. Это обусловлено тем, что закон нахождения числа Рейнольдса меняется в ходе процесса, а значения коэффициентов местного сопротивления, указанные в справочнике, являются экспериментальными, а не теоретическими. Это говорит о том, что для каждого такого участка коэффициенты на самом деле могут отличаться, отклоняясь от примерных табличных значений. В связи с этим возникла необходимость внести поправки в ранее полученные коэффициенты местного сопротивления.

Для нахождения реальных коэффициентов местного сопротивления было принято решение вычислить их сумму экспериментально для каждого из участков трубопровода рассматриваемого стенда. После вычисления необходимо заменить справочные коэффициенты на реальные.

Используя законы гидродинамики и оборудование, установленное на стенде (датчики давления и расходомеры), можно рассчитать зависимость реальных потерь напора от расхода жидкости на данном участке трубопровода. Например, для участка трубопровода от насоса к резервуару Р-1 был использован датчик давления и расходомер, установленные на участке трубопровода рядом с насосом. Полученные значения для каждого из участков трубопровода представлены в приложении Б. Зная значение уровня (давления) в резервуаре Р-1, можно вычислить реальные значения потерь на динамику движения жидкости на данном участке трубопровода:

$$\Delta P_1 = P_1 - P_{1\text{ст}}, \quad (72)$$

где ΔP_1 – потери напора на рассматриваемом участке от насоса до резервуара Р-1, Па;

P_1 – значение давления, снятое с датчика у насоса, Па;

$P_{1\text{ст}}$ – потери напора на вертикальном участке трубопровода, Па.

$$P_{1\text{ст}} = \rho g H_1, \quad (73)$$

Датчики имеют выходной токовый сигнал. Формулы для перерасчета показаний в физические величины для каждого из видов датчиков представлены ниже.

Диапазон измеряемых значений датчиком давления – 0-250 кПа. Тогда, формула перерасчета токового сигнала 4-20 мА выглядит следующим образом:

$$P_1 = \frac{250000}{16} \cdot (P_{1i} - 4), \quad (74)$$

где P_{1i} – токовое значение, снятое с датчика давления, мА.

Диапазон измеряемых значений расходомера 5-85 л/мин при токовом значении выхода с датчика 4-20 мА.

$$Q_1 = \frac{5.313}{60000} \cdot (Q_{1i} - 4), \quad (75)$$

где Q_1 – расход жидкости на данном участке трубопровода, м³/с;

Q_{1i} – токовый сигнал с расходомера, мА.

Данные значения были собраны в единый вектор. При помощи пакета «Curve Fitting Tool», предоставляемого «Matlab», была применена функция, описывающая зависимость потерь напора на участке от расхода. В качестве неизвестного слагаемого выступил суммарный коэффициент местного сопротивления, который вычислил используемый программный пакет. Таким образом, был получен реальный коэффициент местного сопротивления на

участке трубопровода от насоса до резервуара P-1.

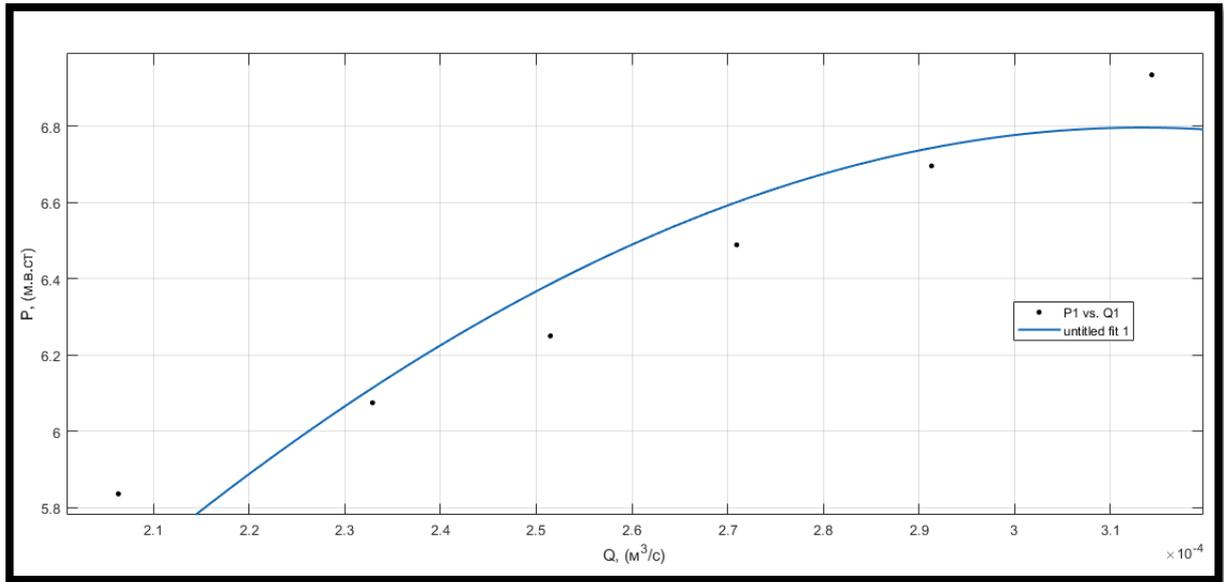


Рисунок 14 – Аппроксимированная функция потерь на участке трубопровода от насоса к резервуару P-1

Для вычисления реальных потерь на участке трубопровода от резервуара P-1 до P-2 был использован расходомер, установленный на данном участке, известное заданное значение уровня в резервуаре P-1 и датчик давления, установленный в резервуаре P-2 и снимающий значение давления столба жидкости в данном резервуаре. Разница давлений в установившемся режиме при определенном расходе и является значением потерь, возникающих на данном участке.

$$\Delta P_2 = \rho g h_1 - P_2, \quad (76)$$

где ΔP_2 – реальное значение потерь напора на динамику жидкости, Па;
 P_2 – показания датчика давления в резервуаре P-2, Па.

Датчик давления в резервуаре P-2 идентичен датчику, установленного у выхода с насоса, поэтому:

$$P_2 = \frac{250000}{16} \cdot (P_{2i} - 4), \quad (77)$$

где P_{2i} – выход с датчика давления, мА.

Расходомер, установленный между резервуарами, снимает значение скорости жидкости в диапазоне 0.3-10 м/с и имеет аналоговый выходной сигнал 4-20 мА.

$$v_2 = \frac{9.7}{16} \cdot (v_{2i} - 4), \quad (78)$$

где v_2 – значение скорости жидкости на рассматриваемом участке трубопровода, м/с;

v_{2i} – токовый сигнал расходомера, мА.

Тогда, значение подачи жидкости:

$$Q_2 = v_2 \cdot s, \quad (79)$$

где Q_2 – значение расхода жидкости через расходомер, м³/с.

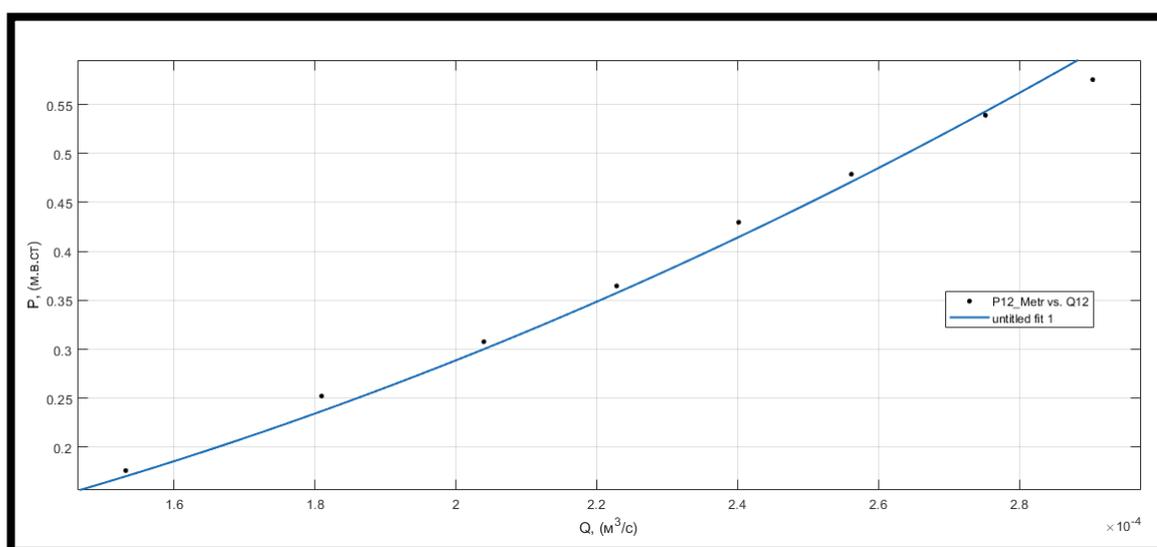


Рисунок 15 – Аппроксимированная функция зависимости потерь напора от расхода жидкости на участке от Р-1 к Р-2

Экспериментальные значения потерь на обходной ветви рассчитывались следующим образом. Использовались оба датчика давления и расходомер, установленный у входа в резервуар Р-2. Разница между давлением на выходе с насоса и давлением, создаваемым столбом жидкости, и является величиной динамических потерь напора (за вычетом вертикального участка трубопровода).

$$\Delta P_3 = P_1 - \rho g H_1 - P_2, \quad (80)$$

где ΔP_3 – потери напора на рассматриваемом участке трубопровода, Па.

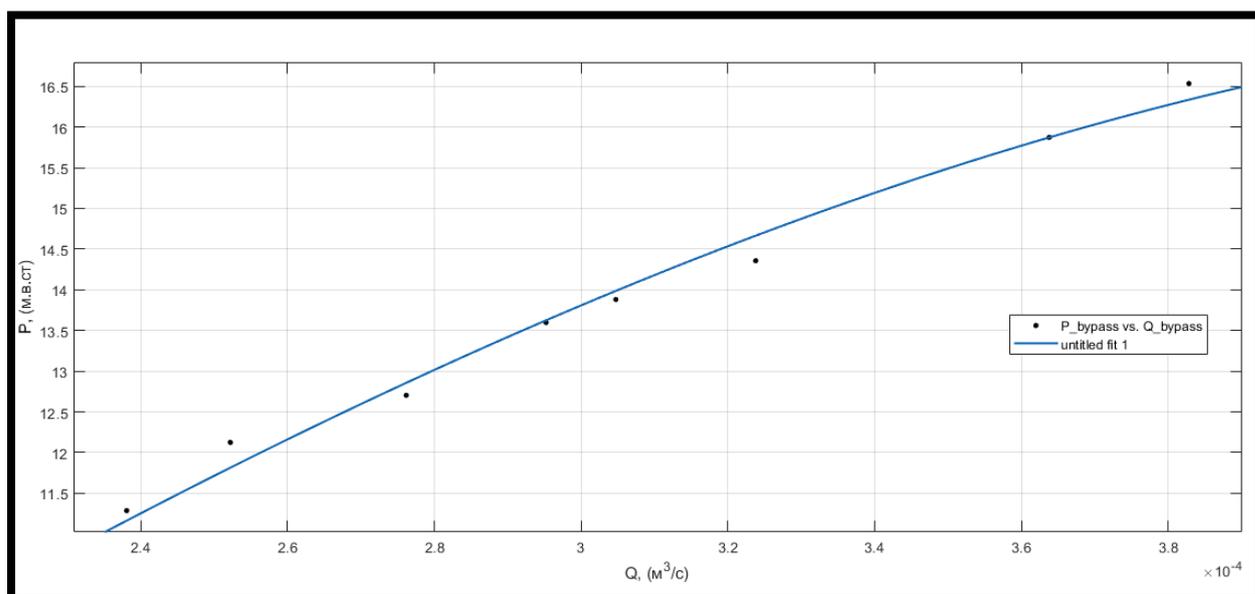


Рисунок 16 – Аппроксимированная функция зависимости потерь напора от расхода жидкости на обходной ветви трубопровода

Для расчета потерь на участке трубопровода от резервуара Р-2 к резервуару Р-3 необходимо дополнительно установить расходомер для определения зависимости потерь от расхода жидкости.

Полученные коэффициенты были подставлены в реализованную модель для её уточнения.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данном проекте был разработан стенд физического подобия по исследованию алгоритмов автоматического управления в гидродинамических системах, который позволит обучать студентов Теории автоматического управления с помощью лабораторных работ, так же сотрудники промышленных производственных компаний смогут проходить курсы повышения квалификации еще более эффективно. Помимо этого, стенд предполагает проведение исследовательской деятельности для совершенствования алгоритмов автоматического управления в процессах хранения и транспортировки промышленных жидкостей. В настоящее время перспективность научной разработки определяется главным образом коммерческой ценностью разработки. Высокая коммерческая ценность разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования.

В данном разделе будет проведен комплексный анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы. Кроме того, будет проведена оценка полных денежных затрат на разработку и реализацию данного проекта.

4.1 Организация и планирование работ

В реализации данного проекта участвовали два человека: научный руководитель проекта и исполнитель (студент). В каждом из видов запланированных работ принимали участие либо оба, либо один из отмеченных людей.

Далее был составлен перечень выполненных работ. Была определена их рациональная продолжительность. Перечень был сведен в таблицу, представленную ниже:

Таблица 1 – Перечень работ и продолжительность выполнения

Выполняемая задача	Исполнитель	Загрузка исполнителей
Постановка целей, задач	НР	НР – 100%
Получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 50%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обзор литературы	НР, И	НР – 20% И – 100%
Обзор элементов стенда, их параметров и характеристик	И	И – 100%
Вывод уравнений динамики происходящих процессов	И	И – 100%
Адаптация ПО	И	И – 100%
Разработка цифрового двойника	И	И – 100%
Тестирование и редактирование модели	НР, И	НР – 50% И – 100%
Подготовка презентации	И	И – 100%
Подведение итогов работ	НР, И	НР – 60% И – 100%

4.2 Продолжительность этапов работ

Для расчета продолжительности этапов работ был использован опытно-статический метод, в котором расчет ожидаемого времени работ осуществляется на основе минимального и максимального времени выполнения работ:

$$t_{\text{ожид}} = \frac{3 \cdot t_{\text{мин}} + 2 \cdot t_{\text{макс}}}{5}, \quad (81)$$

где $t_{\text{мин}}$ – минимальная продолжительность работы, дни;

$t_{\text{макс}}$ – максимальная продолжительность работ, дни.

Далее, была рассчитана длительность этапов в рабочих и календарных днях. Расчет продолжительности выполнения каждого из этапов в рабочих днях осуществляется по следующей формуле:

$$T_{\text{рд}} = \frac{t_{\text{ожид}}}{K_{\text{вн}}} \cdot K_{\text{д}}, \quad (82)$$

где $t_{\text{ожид}}$ – ожидаемая продолжительность работ, дни;

$K_{\text{вн}}$ – коэффициент выполнения работ ($K_{\text{вн}} = 1$);

$K_{\text{д}}$ – коэффициент учета дополнительного времени на компенсацию задержек в работе и их согласование ($K_{\text{д}} = 1.2$);

$T_{\text{рд}}$ – продолжительность выполнения этапа работ в рабочих днях.

Далее был произведен расчет продолжительности одного этапа в календарных днях. Была использована следующая формула:

$$T_{\text{кд}} = T_{\text{рд}} \cdot T_{\text{к}}, \quad (83)$$

где $T_{\text{кд}}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{\text{к}}$ – коэффициент календарности.

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}}, \quad (84)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году ($T_{\text{кал}} = 365$);

$T_{\text{вд}}$ – количество выходных дней в году ($T_{\text{вд}} = 52$);

$T_{\text{пд}}$ – количество праздничных дней в году ($T_{\text{пд}} = 12$).

Тогда, рассчитанное значение коэффициента календарности равно 1.213.

В таблице ниже представлены результаты расчета продолжительности этапов работ и их трудоемкость по исполнителям, которые были задействованы в разработке на каждом из этапов.

Таблица 2 – Продолжительность этапов работ

Этап работ	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дни.			
					$T_{рд}$		$T_{кд}$	
		$t_{мин}$	$t_{макс}$	$t_{ожд}$	НР	И	НР	И
Постановка целей, задач	НР	3	6	4.2	5.04	–	6.11	–
Получение исходных данных	НР	2	3	2.4	2.88	–	3.49	–
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	2	4	2.8	3.36	1.68	4.08	2.04
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	12	14	12.8	4.61	15.36	5.59	18.63
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1.4	1.68	0.17	2.04	0.21
Обзор литературы	НР, И	8	10	8.8	2.11	10.56	2.56	12.81
Обзор элементов стенда, их параметров и характеристик	И	7	11	8.6	–	10.32	–	12.52

Продолжение таблицы 2 – Продолжительность этапов работ

Вывод уравнений динамики происходящих процессов	И	5	9	6.6	–	7.92	–	9.61
Адаптация ПО	И	2	4	2.8	–	3.36	–	4.08
Разработка цифрового двойника	И	14	18	15.6	–	18.72	–	22.71
Тестирование и редактирование модели	НР, И	5	7	5.8	3.48	6.96	4.22	8.44
Подготовка презентации	И	3	6	4.2	–	5.04	–	6.11
Подведение итогов работ	НР, И	1	2	1.4	1.01	1.68	1.23	2.04
Итого		65	96	77.4	24.17	81.77	29.32	103.1

4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

Для расчета затрат необходимо выделить основные статьи расходов при выполнении проекта. Основные статьи расхода:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- прочие (накладные расходы) расходы.

4.3.1 Расчет затрат на материалы

В таблице ниже представлены все материальные затраты на материалы в проекте.

Таблица 4 – Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Лицензия ПО «MATLAB»	70464	1	70464
Итого:			70464

Предполагается, что ТЗР составляет 5% от отпускной цены материалов и устройств. Таким образом, итоговые расходы на материалы с учетом ТЗР, составят:

$$C_{\text{мат}} = 70464 \cdot 1.05 = 73987.2 \text{ руб.} \quad (85)$$

4.3.2 Расчет заработной платы

В реализации проекта участвуют двое: научный руководитель и студент (инженер). Тогда, суммарные затраты на заработную плату составят:

$$K_{зп} = ЗП_{инж} + ЗП_{нр}, \quad (86)$$

где $ЗП_{инж}$ – заработная плата инженера, руб.;

$ЗП_{нр}$ – заработная плата научного руководителя, руб.

Тогда, месячный размер заработной платы рассчитывается по следующей формуле:

$$ЗП_{мес} = ЗП_{окл} \cdot k, \quad (87)$$

где $ЗП_{окл}$ – месячный оклад работника, руб.;

k – районный повышающий коэффициент (1.3).

Пусть оклад инженера составляет 15000 рублей. Тогда, заработная плата инженера за один месяц составит:

$$ЗП_{инж} = 15000 \cdot 1.3 = 19500 \text{ руб.} \quad (88)$$

Пусть оклад научного руководителя составляет 45000 рублей. Тогда, месячная заработная плата научного руководителя составит:

$$ЗП_{нр} = 45000 \cdot 1.3 = 58500 \text{ руб.} \quad (89)$$

Фактическая заработная плата инженера:

$$ЗП_{\text{ф.инж}} = \frac{ЗП_{\text{инж}} \cdot n}{25.714} = \frac{19500 \cdot 82}{25.714} = 62184 \text{ руб.} \quad (90)$$

где n – количество отработанных дней.

Фактическая заработная плата научного руководителя:

$$ЗП_{\text{ф.нр}} = \frac{ЗП_{\text{нр}} \cdot n}{25.714} = \frac{58500 \cdot 25}{25.714} = 56875 \text{ руб.} \quad (91)$$

В таблице ниже представлены результаты расчета заработной платы.

Таблица 5 – Расчет заработной платы исполнителям

Исполнитель	Месячный оклад, руб	Дневная ставка	Занятость, дни	Итого, руб
НР	45000	1750.02	25	56875
И	15000	583.34	82	62184
Итого				119059

4.3.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог включают в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование. Он составляет 30.2% от полной заработной платы по проекту. Тогда, для данного проекта, сумма затрат на социальный налог составит:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0.3 = 119059 \cdot 0.302 = 35955.8 \text{ руб.} \quad (92)$$

где $C_{зп}$ – полная заработная плата, руб.

4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию

Так как в ходе выполнения проекта задействованы приборы, питающиеся от сети, был проведен расчет затрат на электроэнергию.

$$C_{об} = P_{об} \cdot t \cdot C_{эл}, \quad (93)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием за единицу времени, кВт;

$C_{эл}$ – тариф на электроэнергию, руб;

t – время работы оборудования, час.

Трафик на электроэнергию составляет для ТПУ: $C_{эл} = 6.59$ руб/кВт · час.

Таблица 6 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	t , час	$P_{об}$, кВт	$C_{об}$, руб
Персональный компьютер	800	0.3	1581.6

4.3.5 Расчет амортизационных расходов

Амортизационные отчисления для персонального компьютера:

$$C_{ам} = \frac{N_A \cdot C_{об} \cdot t_{рф} \cdot n}{F_d}, \quad (94)$$

где N_A – годовая норма амортизации единицы оборудования (0,4);

$C_{об}$ – балансовая стоимость единицы оборудования, руб.;

F_d – действительный годовой фонд времени работы соответствующего

оборудования (2384 часа);

$t_{рф}$ – фактическое время работы оборудования, ч.;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Тогда, амортизационные затраты на персональный компьютер составят:

$$C_{ам} = \frac{0.4 \cdot 70000 \cdot 800 \cdot 1}{2384} = 9395 \text{ руб.} \quad (95)$$

4.3.6 Расчёт прочих расходов

Прочие расходы следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов.

$$\begin{aligned} C_{проч} &= (C_{мат} + C_{зп} + C_{соц} + C_{эл} + C_{ам}) \cdot 0.1 = \\ &= (73987.2 + 119059 + 35955.8 + 1581.6 + 9395) \cdot 0.1 = 23997.9 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (96)$$

4.4 Расчет общей себестоимости разработки

Было произведено суммирование смет по всем статьям расходов на разработку. Результаты приведены в таблице ниже.

Таблица 7 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материальные затраты	$C_{мат}$	73987.2
Основная заработная плата	$C_{зп}$	119059
Социальные отчисления	$C_{соц}$	35955.8

Таким образом, затраты на разработку составили 263976.5 руб.

Продолжение таблицы 7 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Расходы на электричество	$C_{эл}$	1581.6
Амортизационные отчисления	$C_{ам}$	9395
Прочие расходы	$C_{проч}$	23997.9
Итого		263 976.5

4.5 Цена разработки НИР

Полная цена разработки равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, поэтому необходимо произвести суммирование данных смет. Однако, так как проект научный, НДС отсутствует, соответственно полная цена разработки НИР равна полной себестоимости проекта:

$$C_{НИР} = 263976.5 \text{ руб.} \quad (97)$$

4.6 Расчет экономической эффективности проекта

Данный проект разрабатывается в рамках создания лаборатории автоматизации на базе ТПУ и предназначен для обеспечения учебного процесса студентов, прохождения курсов повышения квалификации инженеров промышленных производств, поэтому экономический эффект от разработки и применения стенда несет дидактический характер и прямая оценка экономической эффективности невозможна. Но также возможно производство разрабатываемой модели стенда на продажу в другие научно-технические лаборатории, что позволит извлекать прибыль с проекта. Наценка на готовую установку составит в пределах 20% от цены разработки,

следовательно, чистая прибыль с одной модели составит 52795.3 рублей.

Вывод по финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережению

В ходе оценки финансовой эффективности разрабатываемого проекта был разработан календарный план проведения основных работ, количество дней, необходимых на разработку проекта, составило 82 рабочих дня. Были рассчитаны сметы затрат на проектирование, себестоимость проекта и его итоговая цена разработки, которая составила 263976.5 рублей.

5 Социальная ответственность

В ходе данной работы был разработан стенд физического подобия для исследования алгоритмов автоматического управления в гидравлических процессах. На стенде планируется исследование и разработка алгоритмов управления для использования в гидравлических системах, помимо исследовательской деятельности, на разрабатываемом устройстве подразумевается обучение студентов основам теории автоматического управления и выполнение лабораторных работ. Стенд будет оснащен датчиками, исполнительные механизмы и персональным компьютером с организованным рабочим местом пользователя. Пользователями данного устройства будут являться студенты ТПУ. Работы по проектированию и реализации стенда проводились в аудитории 106 корпуса №10 ТПУ. Местом будущей эксплуатации стенда является также 106 аудитория корпуса №10 ТПУ.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Государственный надзор и контроль в организациях осуществляют специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с федеральными законами [14]. К таким органам относятся Федеральная инспекция труда, Государственная экспертиза условий труда, Федеральная служба по труду и занятости населения, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Госгортехнадзор, Госэнергонадзор, Госатомнадзор России) Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Госсанэпиднадзор России) и др. Так же в стране функционирует Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), положение о которой утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации, в соответствии с которым, система объединяет органы управления, силы и

средства.

Основные виды работ со стендом связаны с работой на персональном компьютере, поэтому важно то, как будет скомпоновано рабочее место студента. Также работа будет вестись и с аппаратной частью. Средствами отображения информации является монитор ПК и панель оператора, а часто используемые органы управления — это мышь, клавиатура и touch-панель оператора. Рабочее место оборудуется в соответствии требованиями [15]. Оно должно занимать площадь не менее 6 м², высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м³ на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Также рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Так же кресло оператора должно соответствовать требованиям [16]. Так как стенд оборудован устройствами индикации они должны соответствовать нормативным требованиям [17]. Помимо это рабочее место должно соответствовать гигиеническим нормам СанПиН [18]. Требования СанПиН распространяются на проектируемые, вновь вводимые в эксплуатацию, реконструируемые и эксплуатируемые объекты с момента вступления СанПиН в действие. Иные санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам для отдельных отраслей (подотраслей) могут быть установлены с учетом технической возможности, особенностей технологических процессов и оборудования, специфики трудовой деятельности, при условии разработки системы эффективных мер защиты здоровья работающих.

5.2 Производственная безопасность

В таблице 8 представлены опасные производственные факторы.

Таблица 8 – Опасные производственные факторы

Факторы по ГОСТ	Этапы			Нормативные документы
	Разр.	Произв.	Экспл.	
Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация. ГОСТ 12.1.019-2017 Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное
Превышение уровня шума	-	+	+	
Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	
Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	
Поражение электрическим током	-	+	+	
Повышенная напряженность электрического поля	+	+	+	

Продолжение таблицы 8 – Опасные производственные факторы

Факторы по ГОСТ	Этапы			Нормативные документы
	Разр.	Против.	Экспл.	
				освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений (1 октября 1996 г. N 21).

5.2.1 Отклонение показателей микроклимата

На микроклимат в рабочем помещении может влиять температура за окном, нагревательные батареи, вентиляция, а также количество включенной техники в лаборатории.

Микроклимат помещения, в котором человек находится долго, играет большую роль в работоспособности, возможности комфортно отдохнуть и расслабиться. Состояние внутренней среды здания может не только плодотворно влиять на здоровье человека, но и оказывать негативное воздействие. Микроклимат любых помещений характеризуется температурой воздуха, его влажностью и скоростью движения.

Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата приведены в таблице 9 и таблице 10 соответственно, исходя из требований СанПиН [19]. Вид деятельности оператора преимущественно сидячий это относится к категории 1а по энергозатратам.

Таблица 9 – Оптимальные величины показателей микроклимата

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	1а (до 139)	(22-24)	(21-25)	(40-60)	0,1
Теплый	1а (до 139)	(23-25)	(22-26)	(40-60)	0,1

В целях защиты, работающих от возможного перегревания или охлаждения, при температуре воздуха на рабочих местах выше или ниже допустимых величин, время пребывания на рабочих местах (непрерывно или суммарно за рабочую смену) должно быть ограничено. Кроме того, в случае повышенных температур и недостатка воздуха необходимо обеспечить кондиционирование, аэроионизацию и охлаждение воздуха. В случае пониженной температуры на рабочем месте, необходимо предусмотреть автоматическую регулируемую систему отопления. Кроме того, для контроля температуры на рабочем месте, необходимо установить датчики температуры помещения (термометры).

Таблица 10 – Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория работ, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			Диапазон температур воздуха ниже оптимальных величин	Диапазон температур воздуха выше оптимальных величин
Холодный	1а (до 139)	(20,0-21,9)	(24,1-25)	(19-26)	(15-75)	0,1	0,1
Теплый	1а (до 139)	(21,0-22,9)	(25,1-26)	(20-29)	(15-75)	0,1	0,2

5.2.2 Превышение уровня шума

Шум в рабочем помещении может возникать при работе ПК, исполнительных механизмов станда, от других работающих установок, системы кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникает извне. Повышенный шум ухудшает условия труда, оказывает вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Предельно допустимые уровни звукового давления представлены в таблице 11, исходя из источника [20].

Таблица 11 – Допустимые уровни звукового давления

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Распространенные средства индивидуальной защиты от шума – это пробки, наушники, вкладыши (беруши) и шлемы.

Меры коллективной защиты могут включать в себя, в частности:

- оценку риска потери слуха работником;
- использование малошумных машин;
- использование материалов, конструкций, препятствующих распространению шума и вибраций;
- привлечение к работам лиц, не имеющих медицинских противопоказаний по шуму;
- контроль правильности использования средств индивидуальной защиты.

5.2.3 Отсутствие или недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны

В условиях работы в лаборатории ТПУ, могут возникать проблемы с поступлением естественного света. Согласно нормам освещенности [21] недостаточная освещенность рабочей зоны является вредным фактором, который приводит к быстрому утомлению и снижению работоспособности. Плохое освещение негативно воздействует на зрение и приводит к быстрому утомлению. Средствами нормализации освещенности производственных помещений рабочих мест являются:

- источники света;
- осветительные приборы;
- световые проемы;
- светозащитные устройства;
- светофильтры;
- защитные очки.

В таблице 12 представлены регламентированные допустимые характеристики освещенности рабочих мест в учебных аудиториях в университете.

Таблица 12 – Допустимые характеристики освещенности

Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение				
КЕО, %		КЕО, %		Освещенность, лк			Показатель дискомфорта, М, не более	Коэффициент пульсации освещенности, Кп, %, не более
				При комбинированном освещении	При общем освещении	От общего		
При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	Всего	От общего	При общем освещении		
3,2	1,2	2,1	0,7	-	-	400	40	10

Для того чтобы снизить влияние данного фактора на здоровье, необходимо соблюдать допустимое время нахождения перед монитором компьютера и делать перерывы в работе. Помимо этого, возможно

использование дополнительных источников света, таких как настольные лампы.

5.2.4 Поражение электрическим током

Поражение электрическим током возможно при контакте с силовыми цепями электродвигателя насоса. Поражение электрическим током является наиболее опасным из всех видов вредного воздействия, по причине того, что электрический ток является невидимым для глаз человека. Действие электрического тока на организм человека носит своеобразный и разносторонний характер. Проходя через организм человека, электрический ток производит термическое, электролитическое и биологическое действие.

Для предотвращения поражения электрическим током помещение, где размещается рабочее место и разрабатываемое устройство, должно быть оборудовано защитным заземлением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации. Основными техническими средствами защиты, являются защитное заземление, как указывалось ранее, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Перед началом работы на стенде необходимо изучить правила электробезопасности, которые описаны в требованиях к электробезопасности [22].

5.2.5 Повышенная напряженность электрического поля

Повышенная напряженность электрического поля может возникать в аудитории от работы электронных устройств, таких как мониторы и персональные электронно-вычислительные машины.

Негативное воздействие на человека повышенная напряженность электрического поля выражается в виде торможения рефлексов, изменения головного мозга, нарушения памяти, понижения кровяного давления, замедления сокращений сердца, нарушений в печени и селезенке, помутнения

хрусталика глаза. Для того что бы уберечь людей от получения хронических заболеваний при эксплуатации стенда существуют временные требования к пребыванию в электрическом поле.

Исходя из гигиенических требований к персональным электронно-вычислительным машинам [23] пребывание в электрическом поле напряженностью до 5кВ/м включительно допускается в течение рабочего дня, а нахождение в поле напряженностью от 5 до 20 кВ/м допускается в течение одного часа. Необходимо отслеживать время, проведенное за работой, при необходимости осуществлять перерывы и проветривать помещение.

5.3 Экологическая безопасность

В данном подразделе рассмотрим характер воздействия проектируемого устройства на окружающую среду, а также выявим предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации стенда.

Стенд на этапе разработки наносит вред окружающей среде за счет выбросов, которые происходят при производстве всех деталей и устройств, используемых в проектируемой системе. Так же в процессе работы электрические узлы стенда потребляют электроэнергию, при выработке которой, наносится вред окружающей среде.

По истечению срока эксплуатации, будет необходимо утилизировать составные компоненты, что повлечет возможное загрязнение литосферы. Поэтому нужно рассмотреть варианты утилизации деталей разрабатываемого устройства. Резервуары из оргстекла подлежат переработки (пере плавки) и могут вторично использоваться. Отходы органического стекла перерабатывать труднее, чем отходы полиэтилена, но эта переработка почти всегда целесообразна, так как вторичный материал имеет достаточно высокое качество. Для переработки отходов органического стекла их необходимо превратить в мелкую крупку или чешуйки. При переработке органического стекла оно, как правило, подвергается тепловым нагрузкам. При горячем

формовании (вытяжке, прессовании) материал из стеклообразного состояния переходит в пластическое, а затем снова в стеклообразное. Так же переработки подлежат полипропиленовые трубы. В основном пластик имеет короткий жизненный цикл и сразу после использования попадает на свалку. Процесс переработки полипропилена включает в себя сбор, сортировку, очистку и непосредственно переработку. Для переработки полипропилен важно отделить от других полимеров. После получения однородного материала, пластик измельчается в порошок или в хлопья, которые затем можно реализовывать как вторичный полипропилен. Так же требуется утилизировать электронные компоненты датчиков, исполнительных механизмов и информационных устройств.

5.4 Безопасность в ЧС

При выполнении работ наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в лаборатории. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Исходя из установленной номенклатуры обозначений зданий по степени пожарной опасности, анализируемое в данной работе помещение относится к категории В [24]. Основные источники возникновения пожара:

- неработоспособное электрооборудование, неисправности в проводке, розетках и выключателях;
- электрические приборы с дефектами;
- перегрузка в электроэнергетической системе и короткое замыкание в электроустановке.

Человек, выполняющий работы в аудитории, в случае возникновения пожара или его признаков (задымление, запах горения или тления различных материалов, повышение температуры и т.п.) обязан:

- немедленно сообщить об этом по телефону «01» в пожарную часть

(при этом необходимо четко назвать адрес учреждения, место возникновения пожара, а также сообщить свою должность и фамилию);

— задействовать систему оповещения людей о пожаре, приступить самому и привлечь других лиц к эвакуации людей из здания в безопасное место согласно плану эвакуации;

— принять по возможности меры по тушению пожара имеющимися в учреждении средствами пожаротушения и сохранности материальных ценностей;

— известить о пожаре руководителя или другого работника.

Меры безопасности обеспечиваются системами предотвращения пожара и противопожарной защиты исходя из требований пожарной безопасности [25].

Средствами обеспечения пожаробезопасности являются:

— огнетушитель, которым обеспечена аудитория, а также пожарный кран, находящийся в здании;

— системы автоматической пожарной сигнализации;

— средства организации эвакуации, в том числе технические.

Мероприятиями обеспечивающие пожаробезопасность являются:

— обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);

— пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;

— обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

Перед началом работы необходимо пройти инструктаж и оставить свою роспись в журнале инструктажа по пожарной безопасности.

Вывод по социальной ответственности

В данном разделе были проанализированы основные опасные факторы, которые могут возникнуть при разработке и эксплуатации устройства, представленного в ВКР. Были изучены государственные стандарты и нормы.

Заключение

В ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы были выполнены следующие поставленные задачи:

- Проведен обзор функциональных возможностей стенда;
- Математически описаны процессы, описывающие поведение жидкости в рассматриваемой системе;
- Создана полная адекватно описывающая гидростатические и гидродинамические процессы математическая модель стенда, оценены физические параметры;
- Произведено уточнение и корректировка созданной модели.

Кроме того, был проведен анализ финансовой эффективности и социальной ответственности для данного проекта.

Conclusion

In the course of the final qualification work, the following tasks were performed:

- Overview of the stand functionality;
- Mathematical description of the processes describing the behavior of the fluid in the system under consideration;
- Complete mathematical model of the stand that adequately describes hydrostatic and hydrodynamic processes, physical parameters are estimated;
- Updating and correcting the created.

In addition, an analysis of the financial efficiency and social responsibility for this project was carried out.

Список литературы

1. Цифровая трансформация нефтегазовой промышленности [Электронный ресурс] URL: <https://www.ibm.com/downloads/cas/JLE286ZX/> (Дата обращения: 15.03.2021)
2. Цифровой двойник. Digital Twin of Organization [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/company/luxoft/blog/519218/> (Дата обращения: 15.03.2021)
3. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CodeSys [Электронный ресурс] URL: https://habr.promprog.ru/upload/medialibrary/wago/CODESYS_manual.pdf (Дата обращения: 05.04.2021)
4. Цифровое зеркало. Технологии цифровых двойников в нефтегазовой промышленности. [Электронный ресурс] URL: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2018-september-projects/1863687/> (Дата обращения: 10.04.2021)
5. Математическое описание асинхронного двигателя как объекта управления [Электронный ресурс] URL: https://habr.promprog.ru/upload/medialibrary/wago/CODESYS_manual.pdf (Дата обращения: 01.05.2021)
6. Уравнение Бернулли [Электронный ресурс] URL: http://koi.tspu.ru/koi_books/bandaevskiy/page5.htm (Дата обращения: 30.03.2021)
7. Основы гидродинамики [Электронный ресурс] URL: <http://gidravl.narod.ru/osnovdin.html> (Дата обращения: 30.03.2021)
8. Коэффициенты местных сопротивлений на участке трубопровода [Электронный ресурс] URL: https://www.politerm.com/zuluthermo/webhelp/app_local_resists.html (Дата обращения: 30.03.2021)

9. Пропускная способность. Что это такое? [Электронный ресурс]
URL: <http://infosantehnik.ru/str/48.html> (Дата обращения: 10.04.2021)
10. Число Рейнольдса. [Электронный ресурс] URL:
https://elementy.ru/trefil/21200/Chislo_Reynoldsa (Дата обращения: 10.04.2021)
11. Гидродинамика. Расход жидкости. Средняя скорость жидкости.
[Электронный ресурс] URL: <https://www.calc.ru/Gidrodinamika-Raskhod-Zhidkosti-Srednyaya-Skorost-Zhidkosti.html> (Дата обращения: 10.04.2021)
12. Запаздывание. Транспортное запаздывание [Электронный ресурс]
URL: <https://studfile.net/preview/1804041/page:6/> (Дата обращения: 15.04.2021)
13. Характеристики насосов – подача, напор и рабочая точка
[Электронный ресурс] URL:
http://www.agrovodcom.ru/info_nasos_character.php (Дата обращения:
15.04.2021)
14. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ
(ред. от 05.02.2018).
15. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место
при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования ГОСТ
12.2.032-78.
16. Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора. Общие
эргономические требования ГОСТ 21889-76.
17. Безопасность машин. Эргономические требования к оформлению
индикаторов и органов управления. Часть 3. Органы управления ГОСТ EN
894-3-2012.
18. Требования к организации оборудования рабочих мест с ПК
регулируются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.
19. Гигиенические требования к микроклимату производственных
помещений СанПиН 2.2.4.548-96.
20. Шум. Общие требования безопасности ГОСТ 12.1.003-2014
ССБТ.

21. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
22. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты ГОСТ 12.1.019-2017.
23. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.
24. Нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности НПБ 105-03.
25. Пожарная безопасность. Общие требования ГОСТ 12.1.004-91.

Приложение А
(Обязательное)
Функциональная схема стенда

Приложение Б

(Обязательное)

Гидравлическая схема стенда

Перв. примен.

Справ. №

A

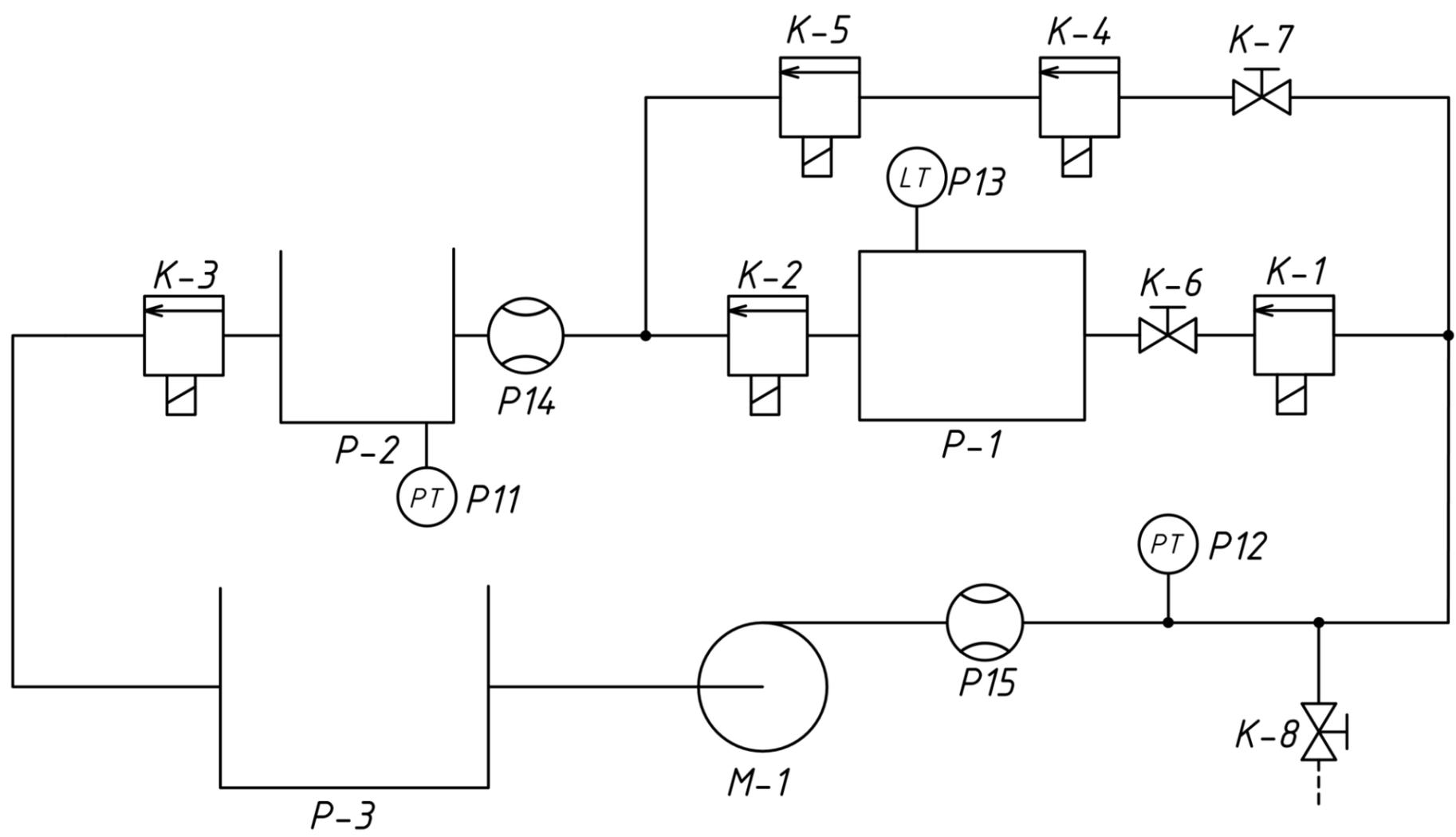
Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Яценко			
Пров.	Зарницын			
Нач.отд.				
Н. контр.				
Утв.				

ФЮРА.063000.002.Э2

Гидравлическая схема
стенда

Лит.	Лист	Листов
P		1

ТПУ ИШИТР ОАР
Группа 8Т7Б

Приложение В

(Обязательное)

Модель стенда в «MATLAB Simulink»

