

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический  
Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра Автоматизации теплоэнергетических процессов

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

| Тема работы   |
|---|
| Разработка автоматизированной системы контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом диагностики быстропротекающих процессов |

УДК 621.373.826-047.44-5

Студент

| Группа | ФИО                          | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| 5БЗВ   | Осмоловская Мария Михайловна |         |      |

Руководитель

| Должность        | ФИО                    | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|------------------------|------------------------|---------|------|
| Инженер каф. АТП | Волков Роман Сергеевич | к.т.н.                 |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность                              | ФИО                          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--|------------------------------|------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель каф. менеджмента | Кузьмина Наталия Геннадьевна |                        |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность                  | ФИО                           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент каф. Экологии и БЖД | Василевский Михаил Викторович | к.т.н.                 |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой | ФИО                         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|-----------------------------|------------------------|---------|------|
| АТП           | Стрижак Павел Александрович | д.ф.-м.н., доцент      |         |      |

Томск – 2017 г.

Бакалавр должен обладать следующими компетенциями, в соответствии с целями основной образовательной программы и задачами профессиональной деятельности, указанными в ФГОС ВПО по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

*Планируемые результаты обучения*

| Код Результата | Результат обучения (выпускник должен быть готов)   | Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон   |
|----------------|--|--|
|                | <i>Универсальные компетенции</i>   |  |
| P1             | Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной инженерной деятельности</i> .             | Требования ФГОС (ОК-2, 12; ПК-7) <sup>1</sup> , Критерий 5 АИОР (п. 2.11), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |
| P2             | Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных инженерных задач</i> .   | Требования ФГОС (ОК-3, 7), Критерий 5 АИОР (п. 2.9), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                       |
| P3             | Демонстрировать <i>личную ответственность</i> , приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной инженерной деятельности</i> с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.     | Требования ФГОС (ОК-8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (пп. 2.12, 2.13), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>         |
| P4             | Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.   | Требования ФГОС (ОК-5, 8, 10, 14), Критерий 5 АИОР (п. 2.10), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>              |
| P5             | К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности. | Требования ФГОС (ОК-16; ПК-5, 12, 17), Критерий 5 АИОР (п. 2.12), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>          |
| P6             | Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.   | Требования ФГОС (ПК-23), Критерий 5 АИОР ((2.14), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                          |

<sup>1</sup> Указаны коды компетенций по ФГОС ВПО (направление 140100 ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА), утвержденному Приказом Министерства образования и науки РФ от 18 ноября 2009 г. № 635

|     | <i>Профессиональные компетенции</i>  |   |
|-----|--|---|
| P7  | Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, <i>социально-экономические</i> знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.  | Требования ФГОС (ПК-2, 3), Критерии 5 АИОР (пп.2.1-2.3), согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>        |
| P8  | Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.   | Требования ФГОС (ОК-1; ПК-2, 6, 7, 8), Критерий 5 АИОР (п.2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |
| P9  | Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений. | Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11), Критерий 5 АИОР (п.1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>        |
| P10 | Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.   | Требования ФГОС (ПК-18, 19), Критерий 5 АИОР (п.1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>           |
| P11 | Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.   | Требования ФГОС (ОК-11, 15; ПК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>     |
| P12 | Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами на основе АСУТП; использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с   | Требования ФГОС (ПК-12, 25, 30), Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>       |

|     |  |  |
|-----|--|--|
|     | учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.  |  |
|     | <i>Специальные профессиональные</i>  |  |
| P13 | Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.                           | Требования ФГОС (ПК-15, 16, 20), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>       |
| P14 | Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины. | Требования ФГОС (ПК-12-14, 17, 21-24), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |
| P15 | Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.  | Требования ФГОС (ПК-25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>           |
| P16 | Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.              | Требования ФГОС (ПК-27-30), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>            |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический  
Направление подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»  
Кафедра Автоматизация теплоэнергетических процессов

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой АТП  
\_\_\_\_\_ Стрижак П.А.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

|                     |
|---------------------|
| Бакалаврской работы |
|---------------------|

Студенту:

| Группа | ФИО                          |
|--------|------------------------------|
| 5Б3В   | Осмоловской Марии Михайловне |

Тема работы:

|   |        |
|---|--------|
| Разработка автоматизированной системы контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом диагностики быстропротекающих процессов |        |
| Утверждена приказом директора №   | 2827/с |

|  |          |
|--|----------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 30.05.17 |
|--|----------|

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Исходные данные к работе | Объектом проектирования является комплекс, предназначенный для экспериментальной лазерной диагностики быстропротекающих процессов, работающий на базе методов PIV, PTV, IPI, SP. Комплекс представляет собой замкнутый воздушный циркуляционный контур. При разработке системы управления экспериментальным комплексом предусмотреть возможность регулирования скорости циркуляции и температуры воздушного потока. Спроектировать локальную систему защит и блокировок для обеспечения безопасности персонала и оборудования. Использовать современные микропроцессорные технические средства автоматизации для реализации функций автоматического контроля и регулирования параметров лазерного комплекса. |
|--------------------------|--|

|  |   |
|--|---|
| Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов | <p>1 Обзор литературы. Поиск существующих технических решений по автоматизации лазерных диагностических комплексов.</p> <p>2 Разработка методики исследований и проведение экспериментальных исследований с использованием метода PIV по определению характеристик аэродинамических следов при обтекании тел различной формы.</p> <p>3 Разработка и проектирование АСУ экспериментальным комплексом.</p> <p>4 Выбор структуры автоматизированной системы управления. Проработка взаимосвязи оборудования верхнего, среднего и полевого уровней.</p> <p>5 Разработка функциональной схемы АСУ и составление заказной спецификации приборов и средств автоматизации.</p> <p>6 Разработка комплекта конструкторской и схемной документации щита автоматики АСУ.</p> <p>7 Расчет параметров настройки регулятора.</p> <p>8 Разработка мнемосхемы проекта.</p> <p>9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</p> <p>10 Социальная ответственность.</p> |
| Перечень графического материала  | <p>1 Схемы структурная АСУ.</p> <p>2 Схема функциональная АСУ.</p> <p>3 Схема принципиальная электрическая щита автоматики.</p> <p>4 Схема монтажная.</p> <p>5 Общий вид щита автоматики.</p>   |

#### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

| Раздел  | Консультант                   |
|---|-------------------------------|
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Кузьмина Наталия Геннадьевна  |
| Социальная ответственность                                      | Василевский Михаил Викторович |

|  |          |
|--|----------|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | 10.02.17 |
|--|----------|

#### Задание выдал руководитель:

| Должность        | ФИО                    | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|------------------------|------------------------|---------|------|
| Инженер каф. АТП | Волков Роман Сергеевич | к.т.н.                 |         |      |

#### Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО                          | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| 5БЗВ   | Осмоловская Мария Михайловна |         |      |

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 103 с., 24 рис., 22 табл., 29 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: экспериментальный стенд, панорамные оптические методы диагностики, аэродинамический след, автоматизированная система управления, микропроцессорные технические средства автоматизации, теплоэнергетика, проектирование, теплотехника.

Объектом автоматизации является экспериментальный лазерный комплекс на базе методов PIV, PTV, IPI, SP, предназначенный для диагностики быстропротекающих процессов.

Цель работы – проектирование автоматизированной системы контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом диагностики быстропротекающих процессов.

В процессе выполнения работы проводились экспериментальные исследования, анализ объекта автоматизации, составление структурной схемы АСУ экспериментальным комплексом, разработка функциональной схемы, разработка принципиальной электрической схемы и общего вида щита автоматики, выбор приборов и технических средств автоматизации с последующим составлением заказной спецификации.

В результате исследования разработана автоматизированная система управления экспериментальным лазерным комплексом на основе современных микропроцессорных средств автоматизации.

Основным преимуществом разработанной АСУ ТП является наличие программно-оперативного комплекса на базе SCADA-системы, который осуществляет разделение функций между автоматической системой и оперативным персоналом для повышения качества регулирования и быстродействия системы, а также позволяет вовремя отреагировать на любую сложную ситуацию в процессе эксплуатации системы.

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 11 |
| 1 Обзор литературы .....   | 14 |
| 2 Объект и методы исследования.....  | 21 |
| 3 Проектирование АСУ экспериментальным комплексом .....                                      | 31 |
| 3.1 Выбор структуры АСУ экспериментального комплекса.....                                    | 31 |
| 3.2 Схема взаимосвязи оборудования верхнего уровня и полевого....                            | 34 |
| 3.3 Разработка функциональной схемы АСУ экспериментальным комплексом .....                   | 36 |
| 3.4 Выбор технических средств АСУ экспериментальным комплексом .....                         | 39 |
| 3.4.1 Выбор регулирующего устройства.....  | 39 |
| 3.4.2 Выбор регулирующих органов.....  | 42 |
| 3.4.3 Выбор термопреобразователей .....  | 43 |
| 3.4.4 Выбор нормирующих устройств.....   | 46 |
| 3.4.5 Выбор средства измерения скорости потока воздуха.....                                  | 48 |
| 3.4.6 Выбор пусковых устройств .....   | 48 |
| 3.4.7 Выбор датчика движения.....  | 50 |
| 4 Разработка схемной конструкторской документации.....                                       | 52 |
| 4.1 Проектирование принципиальной электрической схемы АСУ экспериментальным комплексом ..... | 52 |
| 4.2 Проектирование монтажной схемы АСУ экспериментальным комплексом .....                    | 54 |
| 4.3 Разработка чертежа общего вида щита автоматизации .....                                  | 56 |
| 5 Расчет параметров настройки регулятора .....   | 58 |
| 5.1 Идентификация объекта управления .....   | 58 |

|   |    |
|---|----|
| 5.2 Определение оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора .....                                | 60 |
| 6 Мнемосхема проекта .....  | 69 |
| 7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....                             | 74 |
| 7.1 Перечень работ и оценка времени выполнения.....   | 74 |
| 7.2 Смета затрат на проект .....  | 77 |
| 7.2.1 Материальные затраты.....   | 77 |
| 7.2.2 Затраты на амортизацию.....   | 77 |
| 7.2.3 Затраты на заработную плату.....  | 78 |
| 7.2.4 Затраты на социальные нужды.....  | 79 |
| 7.2.5 Прочие затраты .....  | 79 |
| 7.2.6 Накладные расходы .....   | 79 |
| 7.3 Смета затрат на оборудование и монтажные работы.....  | 80 |
| 8 Социальная ответственность .....  | 85 |
| 8.1 Производственная безопасность .....   | 87 |
| 8.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....             | 87 |
| 8.1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований ..... | 87 |
| 8.1.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....   | 88 |
| 8.2 Экологическая безопасность .....  | 89 |
| 8.2.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду .....                                 | 89 |
| 8.2.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования.....   | 90 |
| 8.2.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды....  | 91 |
| 8.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....   | 91 |

|  |     |
|--|-----|
| 8.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований .....                                  | 91  |
| 8.3.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при исследовании объекта.....                                | 92  |
| 8.3.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС ..... | 92  |
| 8.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....  | 93  |
| 8.4.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.....    | 93  |
| 8.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны .....  | 94  |
| 8.5 Заключение по разделу «Социальная ответственность» .....   | 95  |
| Заключение .....   | 96  |
| Список использованных источников .....   | 98  |
| Приложение А .....   | 102 |

|                       |                                    |
|-----------------------|------------------------------------|
| Графический материал: | на отдельных листах                |
| ФЮРА.421000.015 С2    | Схема функциональная               |
| ФЮРА.421000.015 Э3    | Схема принципиальная электрическая |
| ФЮРА.421000.015 С4    | Схема монтажная                    |
| ФЮРА.421000.015 С5    | Схема функциональная               |
| ФЮРА.421000.015 ВО    | Общий вид щита автоматизации       |

## Введение

Роль экспериментальных исследований в развитии промышленности невозможно переоценить. Именно эксперименты позволяют продемонстрировать и легко понять и простые, и сложные аспекты, которые традиционно представляются в виде теоретического материала и математических моделей. Эксперимент используется как способ постановки вопроса, как инструмент изучения физического явления и как форма ответа на вопрос. Очень часто достаточно простые физические вопросы имеют неожиданные ответы, которые зависят от конкретных условий проведения этих экспериментов. Эксперименты опровергают или подтверждают множество теоретических исследований. Во всем мире моделируются самые разнообразные процессы. Одним из быстропротекающих процессов является аэродинамическое обтекание тел. Оно также является важнейшей составляющей в разработке летательных аппаратов и судов в авиастроении. В этой области ведутся фундаментальные теоретические исследования сложных научных проблем, изучается физика течений, идут работы по формированию облика летательных аппаратов, создаются аэродинамические компоновки перспективных изделий авиационной техники. В разделе аэродинамики малых скоростей в последнее время привлекает все большее внимание теория беспилотных летательных аппаратов (БЛА). В ее развитии заинтересованы и авиамоделисты, и ученые-исследователи, и работники оборонных отраслей промышленности. Также, обтекание тел играет ключевую роль в таких областях, как кораблестроение, конструкции промышленных агрегатов в нефтегазовой промышленности и энергетике. Например, изучение процессов, протекающих в двигателях внутреннего сгорания. Проводятся многочисленные работы в научных лабораториях, направленные на определение и формирование аэродинамических характеристик летательных и ракетно-космических аппаратов, чтобы в дальнейшем решить вопросы баллистики, динамики движения и нагружения

испытываемых конструкций. Аэродинамические характеристики также важны при проектировании в автомобилестроении. В этой области, например, интерес представляет пространственное обтекание грузовых автомобилей с прицепом. Целью одного из таких исследований являлось определение эффективности работы специальных устройств, например, вихрегенераторов, предназначенных для снижения аэродинамического сопротивления за счет создания направленных в сторону прицепа вихрей, создающих "преграду" для проникновения потоков воздуха при обтекании автомобиля в "зазор" между кабиной тягача и трейлером [1]. Было установлено, что их применение уменьшает сопротивление на 10%. Такой результат в дальнейшем может существенно улучшить характеристики создаваемых конструкций. Особо важной задачей всегда являлась задача определения ветровой нагрузки на объекты гражданского и промышленного строительства. Если рассматривать менее крупные объекты, то определяются аэродинамические характеристики вентиляторов, насосов и компрессоров. Также, изучаются внутренние течения в элементах тех же конструкций (турбины, компрессоры, насосы и др.). Даже самые легко протекающие, на первый взгляд, процессы изначально требуют моделирования. Например, система вентиляции воздуха в салоне микроавтобуса. В существующих работах [2] изучалось направление подаваемого свежего воздуха, траектория его движения и распространение в салоне, при столкновении с различными предметами.

В экспериментальной аэродинамике изучение законов быстропротекающих процессов производится с помощью специальных комплексов. В последние годы развитие получили панорамные оптические методы исследования жидкостных и газовых потоков с применением высокоскоростных кросскорреляционных видеокомплексов (в частности, Particle Image Velocimetry (PIV)). Применение оптических методов диагностики очень удобно для проведения экспериментальных исследований, так как они являются бесконтактными методами. То есть, не требуется

установка многочисленных датчиков измерения технологических параметров непосредственно в область регистрации.

В данной работе будет рассмотрен измерительный комплекс, основанный на методе цифровой трассерной визуализации для измерения полей скорости в жидкостях и газах. Данный метод позволяет решать различные научные и прикладные задачи. Помимо многочисленных достоинств метода, на практике возникает ряд недостатков, затрудняющих процесс проведения экспериментальных исследований: затрачивается длительное время на настройку оборудования под определенные требуемые условия работы, также есть необходимость вручную вносить множество коррективов в работу системы во время проведения эксперимента. Например, контролировать и поддерживать температуру в исследуемой среде. Эти факторы негативно влияют на качество и точность полученных результатов, увеличивают длительность проведения экспериментов. Поэтому целесообразно автоматизировать отдельные участки комплекса, чтобы свести описанные недостатки к минимуму.

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы управления экспериментальным комплексом, предназначенным для лазерной диагностики быстропротекающих процессов.

## 1 Обзор литературы

Для широкого круга различных отраслей промышленности разработка экспериментальных стендов (для физического моделирования процессов) является весьма актуальной задачей. Для диагностики быстропротекающих процессов существуют различные типы экспериментальных стендов. Для начала рассмотрим стенды, в которых обтекание тел осуществляется воздушным потоком.

Например, в работе [3] проводился эксперимент в аэродинамической трубе (АДТ) малых скоростей замкнутого типа с открытой рабочей частью Т-03 ЦАГИ. Целью данной работы являлась оценка возможностей использования результатов PIV измерений для получения аэродинамических сил, действующих на профиль крыла. Для этого был поставлен эксперимент, в котором, рассчитанные по измеренным полям скорости, аэродинамические коэффициенты профиля сравнивались с аналогичными результатами, полученными классическими методами — путем измерений распределений измерения давлений на поверхности модели и измерения дефектов полного давления в следе за моделью. При проведении экспериментов осуществлялся контроль давления (гребенка насадков полного давления), скорости воздушного потока (трубка Пито-Прандтля) и угла атаки крыла (видеорегистрация). Схема эксперимента представлена на рисунке 1.1.

В работе [4] проводились эксперименты по исследованию поля потока в рабочей части сверхзвуковой аэродинамической трубы методом анемометрии по изображениям частиц. Использовался бесконтактный метод (PIV) измерения скорости трассеров. Ввод зондов для подачи частиц-трассеров в контур аэродинамической трубы осуществлялся через стенку форкамеры (ФК). Контролируемыми параметрами в данной работе являлись скорость воздушного потока и ввод частиц-трассеров. В результате была представлена оценка неравномерности потока по продольной и поперечной составляющим скорости, получены трудно измеряемые контактными методами скосы потока.

Схема установки представлена на рисунке 1.2.

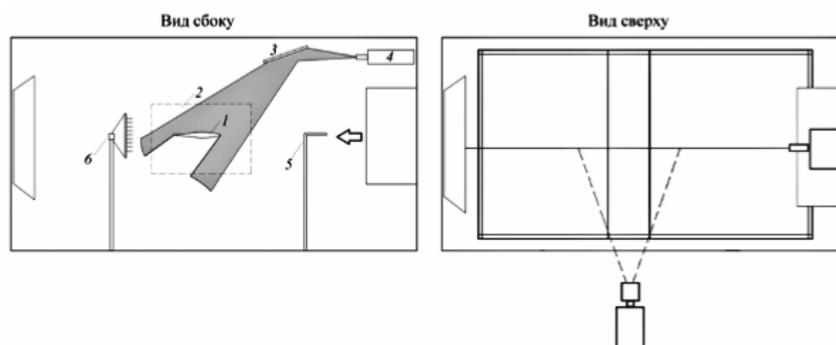


Рисунок 1.1 – Схема эксперимента [3]:

1 — модель; 2 — измерительная область; 3 — зеркало; 4 — лазер; 5 — трубка Пито — Прандтля; 6 — гребенка насадков полного давления

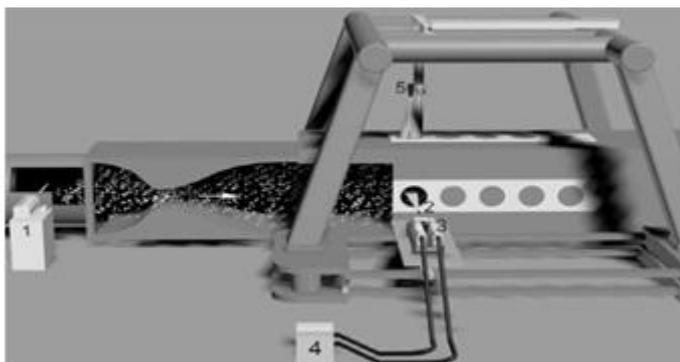


Рисунок 1.2 – Схема расположения аппаратуры лазерной системы диагностики: 1 – блок подачи трассеров; 2 – камера; 3 – лазерный нож; 4 – лазер; 5 – блок системы управления [4]

С помощью метода PIV проводятся многочисленные эксперименты, направленные на сравнение расчетных значений скорости потока со значениями, измеренными экспериментальным путем. Одно из таких исследований описано в работе [5].

Опыты с использованием метода PIV проводились в следующих условиях: одинарная (без дросселирующей решетки) или двойная ФК, режимы с мультипликатором или без мультипликатора, профилированные сопла с диаметром среза 300 мм, рассчитанные на числа Маха  $M_n = 6; 8$ . Для сравнения

значений  $W_H$  (расчетные значения) с экспериментальными значениями скорости ( $W_{piv}$ ) определялось среднеарифметическое значение  $W_{piv}$  для всех измеренных в поле скоростей векторов. Вследствие большого количества векторов (приблизительно  $2,1 \cdot 10^4$ ) случайная погрешность определения скорости  $W_{piv}$  пренебрежимо мала. Экспериментальные данные и расчетные значения приводились в таблицах [5]. Различие величин  $W_{piv}$  и  $W_H$  не превышает нескольких процентов. Схема расположения аппаратуры и область измерений в потоке приведены на рисунке 1.3.

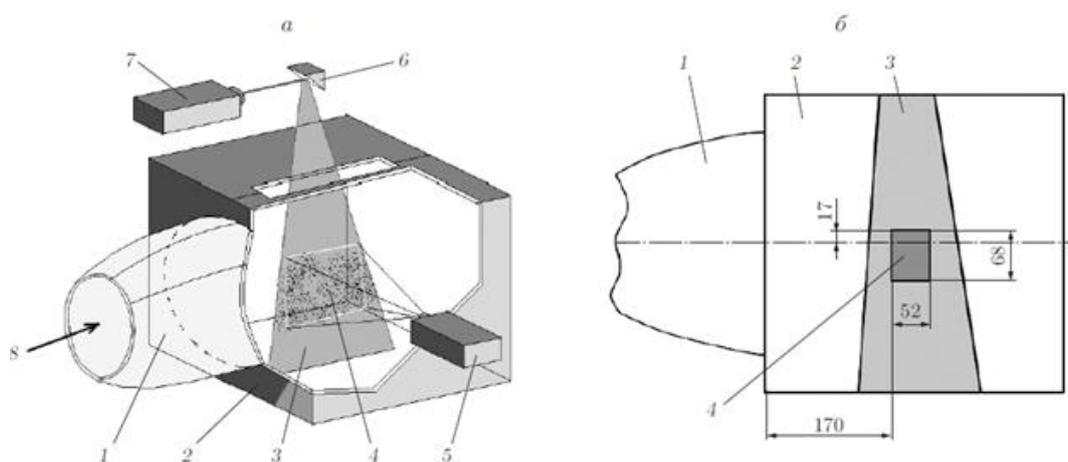


Рисунок 1.3 – Схема измерений методом PIV скорости потока в рабочей части аэродинамической трубы ИТ-302М [5]:

- а – расположение аппаратуры,
- б – область измерения скорости; 1 – сопло, 2 – рабочая часть,
- 3 – лазерный нож, 4 – область съемки камеры Hamamatsu C8484-52,
- 5 – камера Hamamatsu C8484-52, 6 – зеркало,
- 7 – лазер Litron NanoL135-15, 8 – направление движения РТ установки

При проведении рассмотренного эксперимента контролировались следующие параметры: давление, температура воздушного потока.

В существующей научной литературе упоминание об автоматизации лабораторных экспериментальных стендов встречается достаточно редко. В

одной из таких работ [6] описывается результат разработки информационно-измерительного комплекса, предназначенного для проведения экспериментальных исследований в аэродинамической трубе, а также для обучения студентов основам аэродинамики и гидромеханики. Структура информационно-измерительного комплекса состоит из следующих компонент:

- 1) подсистема сбора и обработки экспериментальных данных с датчиков аэродинамической трубы;
- 2) подсистема измерения скорости потока на основе вихревого датчика или датчика давления;
- 3) подсистема регулирования и поддержания скорости потока в аэродинамической трубе.

В работе [7] описывается разработанная система автоматизированного управления и сбора информации аэродинамического эксперимента. В качестве объекта управления используется аэродинамическая труба дозвуковых скоростей Т-503 кафедры аэрогидродинамики НГТУ с открытой рабочей частью. Управление и сбор экспериментальных данных производится с использованием персональной ЭВМ с подключенными к ней, многофункциональными модулями ввода-вывода, счетчиками и термоанемометром.

Перечень программно-технических комплексов и выполняемых ими функций, с помощью которых производится управление как самой экспериментальной установкой, так и ходом проведения в ней экспериментов:

- 1) Аэродинамические тензвесы. Предназначены для измерения моментов сил, действующих на исследуемую модель в процессе проведения эксперимента.
- 2) Альфа-механизм. С помощью альфа-механизма по команде экспериментатора производится установка требуемого угла атаки, под которым испытываемая модель устанавливается в рабочей части аэродинамической трубы.

3) Координатное устройство. Это устройство, предназначенное для перемещения измерительного датчика (например, датчика термоанемометра) в трехмерном пространстве рабочей части аэродинамической трубы по координате и по углу.

4) Главный двигатель вентилятора аэродинамической трубы. Обеспечивает вращение вентилятора для создания в трубе воздушного потока. Система осуществляет управление и поддержание постоянства скорости потока в аэродинамической трубе за счет формирования сигналов для цепи управления тиристорным приводом главного двигателя аэродинамической трубы.

Управление скоростью потока и поддержание ее постоянства осуществляется на основе алгоритмов ПИД-регулирования.

В следующей статье [8] представлены результаты изучения физических механизмов гидродинамических процессов, наиболее существенную роль среди которых играют крупномасштабные вихревые структуры (КВС) и кавитация. Применение данных результатов способствует повышению ресурса работы, увеличению КПД гидроэнергетических систем, а главное – степени их безопасности. Эксперименты проводились на кавитационном стенде Института теплофизики СО РАН, представляющем собой замкнутый гидродинамический контур. Исследования проводились на каскаде гидрокрыльев, состоящем из трех профилей НАСА0015 с длиной хорды 100 мм. Схема гидродинамического кавитационного стенда представлена на рисунке 1.4.

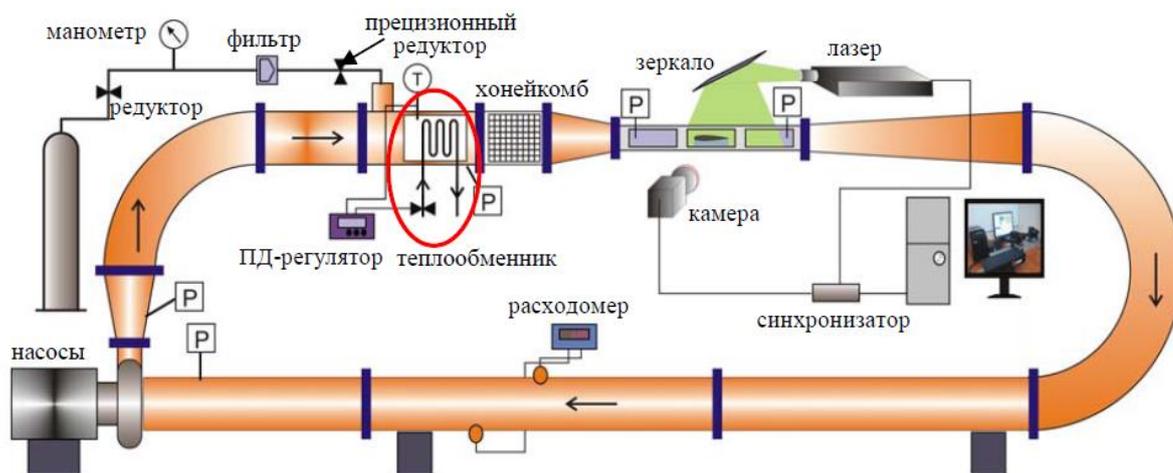


Рисунок 1.4 – Схема гидродинамического кавитационного стенда ИТ СО РАН (Р – датчик давления, Т – датчик температуры) [8]

Перечень параметров, контролируемых при проведении экспериментов на данном стенде: скорость течения жидкости, температура, давление и расход циркулирующей жидкости. С помощью методики PIV измерены пространственные распределения мгновенной скорости и завихренности турбулентного потока при кавитационном обтекании каскада гидрокрыльев NASA0015. На основе измеренных полей мгновенной скорости были рассчитаны пространственные распределения средней скорости, а также статистические моменты пульсаций скорости жидкости второго порядка.

Таким образом, из анализа литературы можно заключить, что на сегодняшний день изучение процессов аэродинамического обтекания тел является очень актуальным и во всем мире создается большое количество исследовательских стендов для осуществления экспериментального моделирования этих процессов. Однако, число автоматизированных стендов крайне ограничено. В пользу осуществления автоматизации стендов можно привести несколько основных доводов. Во-первых, при усовершенствовании стендов таким образом, уменьшается потребность в большом количестве персонала, проводящего эксперимент, так как контроль технологических параметров будет осуществляться автоматизированным комплексом, а не

ручным управлением. Все действия по подготовке и проведению эксперимента сможет производить один человек. Во-вторых, большую роль играет обеспечение безопасности проводимых экспериментов. Так как в процессе проведения используется импульсный лазер (в составе PIV системы), видимое, а также ближнее инфракрасное и ультрафиолетовое лазерные излучения представляют из себя опасность для глаз, так как эти излучения хорошо фокусируются хрусталиком на сетчатке глаза. Высокая плотность энергии может вызвать ожоги и другие повреждения. Поэтому помимо автоматизации самого процесса выполнения эксперимента необходимо также обеспечить лабораторный стенд системой защиты и блокировок, во избежание проникновения человека в область распространения лазерного луча и нанесения вреда здоровью.

## 2 Объект и методы исследования

При проведении исследований по обтеканию каплей воздушным потоком применялся экспериментальный стенд [9], схема и внешний вид которого приведены на рисунке 2.1. Стенд состоял из металлического каркаса 13, внутри которого устанавливался циркуляционный контур. Последний выполнен из пластмассовых труб с участком из стекла 4 (толщина – 4 мм) и вентилятора 3. Размеры контура: ширина – 0,76 м; высота – 1,79 м.

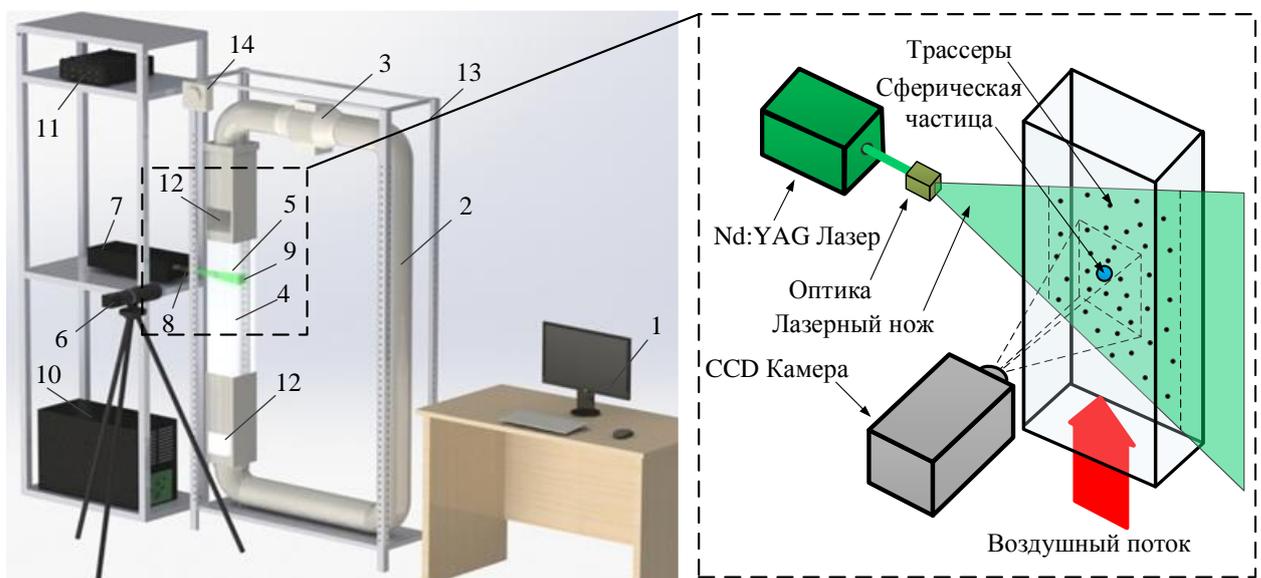


Рисунок 2.1 – Схема экспериментального стенда [9]:

1 – рабочая станция (персональный компьютер – ПК);

2 – циркуляционный контур; 3 – вентилятор; 4 – стеклянный участок контура; 5 – обтекаемые частицы; 6 – кросскорреляционная видеокамера; 7 – двойной импульсный Nd:YAG лазер; 8 – оптика для формирования лазерного ножа; 9 – нож лазера; 10 – генератор лазерного излучения;

11 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 12 – отверстие для размещения трассирующих частиц; 13 – металлический каркас;

14 – регулятор скорости вентилятора

Для видеорегистрации процесса обтекания каплей воздушным потоком с трассирующими частицами использовалась кросскорреляционная видеокамера 6 Imperx Bobcat GEV IGV-B2020 (формат изображения – 2048x2048 пикселей, кадровая частота – не менее 1,5 Гц, минимальная задержка между двумя последовательными кадрами – не более 5 мкс). Для создания воздушного потока использовался вентилятор 3 VENTS (ТТ 125) диаметром 125 мм в комплекте с регулятором скоростей 14. Скорость потока варьировалась в диапазоне от 0,5 до 3 м/с. Размеры генерируемых частиц варьировались в широком диапазоне:  $d = 3 - 7$  мм. В качестве трассирующих частиц использовался диоксид титана ( $TiO_2$ ). В качестве обтекаемых частиц 5 использовался материал пластилин.

Для определения и контроля параметров обтекания воздушным потоком частиц используемый стенд оснащался комплектом устройств для реализации измерений посредством панорамных оптических методов диагностики потоков «Particle Image Velocimetry» (PIV) [10]. Метод цифровой трассерной визуализации относится к классу бесконтактных методов измерения скорости в потоках. Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. Схема метода PIV представлена на рисунке 2.1.

Его применение позволяло одновременно (не прибегая к дополнительным экспериментам) регистрировать скорости  $U_d$  циркулирующих частиц. Используемая система диагностики потоков состояла из следующих основных компонентов:

- 1) кросскорреляционная CCD видеокамера 6 Imperx Bobcat GEV (ImperX IGV-B2020) (формат изображения – 2048x2048 пикселей, кадровая частота – не менее 1,5 Гц, минимальная задержка между двумя последовательными кадрами – не более 5 мкс);

- 2) двойной импульсный твердотельный Nd:YAG лазер «QUANTEL

EverGreen 70» 8 с генератором излучения 9 (длина волны – 532 нм, максимальная энергия в импульсе – не менее 74 мДж, длительность импульса – не более 12 нс, частота повторений – не более 15 Гц);

3) синхронизирующий процессор 10 (дискретизация сигналов – не более 10 нс);

4) делитель лазерного излучения 11 с оптикой для формирования лазерного «ножа».

Перед началом проведения экспериментов осуществлялась калибровка системы и фокусировка объектива ССD видеокамеры 6 в измерительной области конкретной частицы 5: подбирались значения мощности каждого модулятора Nd:YAG лазера 7, размера относительного отверстия диафрагмы камеры, угла раскрытия и толщины светового «ножа» лазера. С применением специальных устройств (калибровочной мишени либо призмы) определялся масштабный коэффициент –  $S$ , мм/пикс. Регистрировались видеogramмы (пары изображений) потока трассеров в непосредственной близости от частиц. Для этого установленные частицы многократно рассекались световым ножом лазера 9, образуемым специальной оптикой 8, а образы подсвеченных в результате данного процесса трассеров регистрировались кросскорреляционной ССD видеокамерой 6 (каждый эксперимент включал не менее 200 фотокадров потока). Отснятые видеоизображения потока сохранялись на рабочую станцию 1, где подвергались последующей обработке с применением ряда программных фильтров (для устранения шумов) и специализированных итерационных алгоритмов расчета мгновенных скоростей. Для каждого изображения потока определялось перемещение трассеров за время между вспышками лазера, затем для одних и тех же регистрационных областей значения усреднялись. Вычислялись мгновенные скорости воздушного потока. С применением масштабного коэффициента  $S$  осуществлялся пересчет значений скорости в м/с.

Весь цикл экспериментов можно разделить на 2 этапа.

На первом этапе определялись скорости движения воздушного потока ( $U_g$ ) в регистрационной области циркуляционного контура с помощью изменения положения регулятора скоростей вентилятора. Выполнялась следующая последовательность действий:

1) при помощи устройства засева контур 2 наполнялся трассирующими частицами. (Для предотвращения оседания трассирующих частиц в контуре использовался компрессор, нагнеталось давление, осуществлялся вдув воздуха в контур). Далее, при открытии клапана, осуществлялся вдув частиц в контур, где они начинали циркулировать;

2) регулятор скорости вентилятора 3 устанавливался в положения, соответствующие максимальному (положение 3), минимальному (положение 1) и среднему (положение 2) значению скоростей потока, вентилятор запускался;

3) луч лазера 9 настраивался перпендикулярно видеокамере 6;

4) проводился запуск видеосъемки процесса циркуляции воздушного потока с применением высокоскоростной видеокамеры 6;

5) в результате видеосъемки получено 100 кадров, сохраненных на рабочей станции 1. Далее проводилась обработка данных при помощи программного обеспечения ActualFlow. Строились поля скоростей воздушного потока, при помощи которых определялась скорость потока при заданном положении регулятора скорости вентилятора;

б) процедура повторялась для положений регулятора скорости вентилятора «2» и «1».

Результаты экспериментов (поля скорости воздушного потока) приведены на рисунке 2.2.

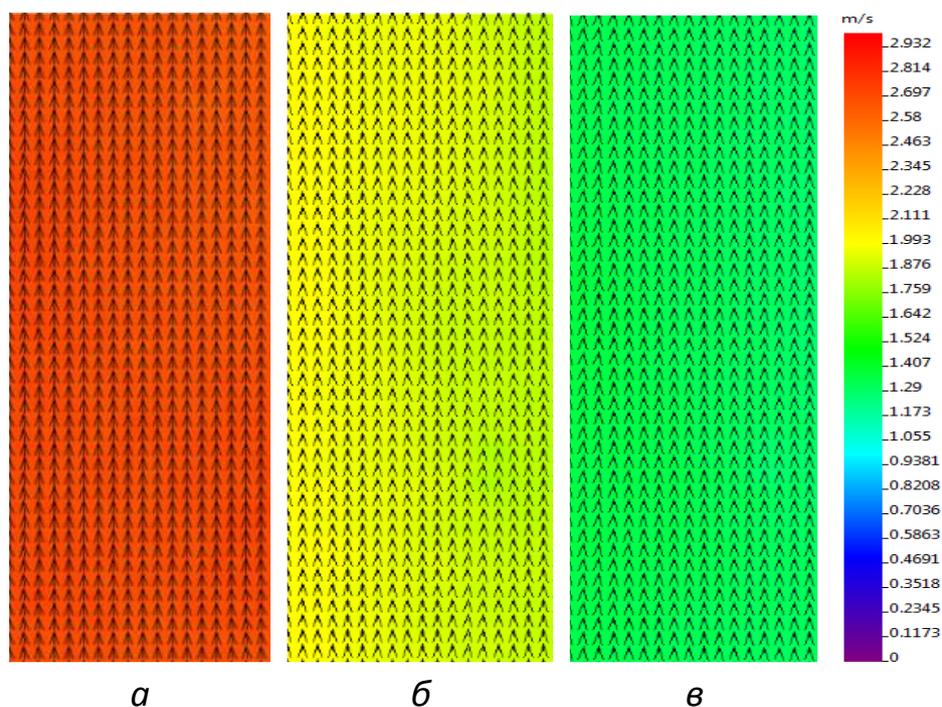


Рисунок 2.2 – Поля скоростей воздушного потока в регистрационной области циркуляционного контура, соответствующие следующим положениям регулятора скорости: *a* – 2,6 – 2,8 м/с; *б* – 1,9 - 2,0 м/с; *в* – 1,3 - 1,4 м/с

Таким образом, было установлено, что при установке регулятора скорости вентилятора в различные положения, возможно регулировать скорость воздушного потока в диапазоне от 1,3 м/с до 2,8 м/с.

На втором этапе проводились эксперименты по определению характеристик обтекания воздушным потоком одиночных и групп частиц различных размеров ( $d = 3$  мм, 5 мм, 7 мм), формы (шар, эллипс длиной 7 мм, грушевидная частица длиной 8 мм) и конфигураций (2 частицы последовательно по направлению воздушного потока, перпендикулярно направлению воздушного потока). Расстояние между каплями составляло 3 мм, 5 мм, 6 мм и 10 мм.

Чтобы закрепить в стеклянной области циркуляционного контура частицы, использовались пластилин и проволоки. Внешний вид частиц

различных диаметров и способ их закрепления в контуре представлены на рисунках 2.3 и 2.4 соответственно.



Рисунок 2.3 – Пластилиновые частицы диаметром 3 мм, 5 мм и 7 мм соответственно

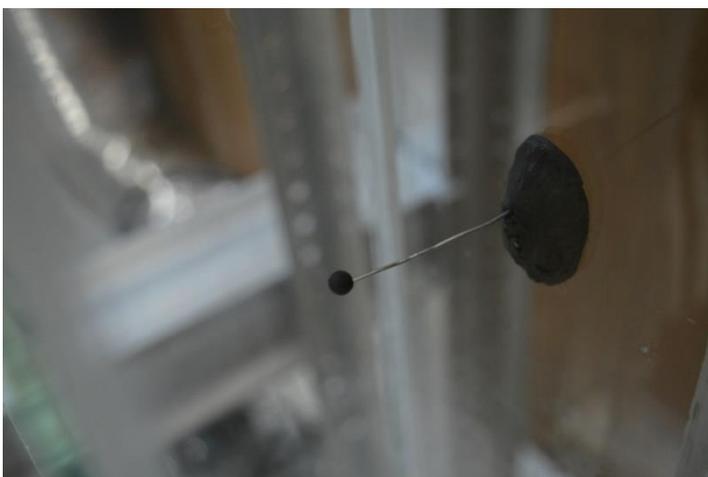


Рисунок 2.4 – Способ закрепления частицы в регистрационной области циркуляционного контура

Проведены экспериментальные исследования влияния скорости воздушного потока на длину аэродинамического следа (рисунок 2.5).

Анализ рисунка 2.5 позволяет говорить об определяющем влиянии скорости  $U_g$  на длину аэродинамического следа (рисунок 2.5 а). Таким образом, рост  $U_g$  в 2,5 раза приводит к увеличению значений  $l_{\text{следа}}$  более чем в 3-5 раз. И для более крупных частиц ( $d_0 \approx 5$  мм) влияние более существенное. Влияние начального диаметра частицы ( $d_0$ ) на значения  $l_{\text{следа}}$  имеет более умеренный характер (рисунок 2.5 б). Увеличение  $d_0$  в диапазоне 3-5,5 мм приводит к увеличению параметра  $l_{\text{следа}}$  не более чем в 1,5-2 раза.

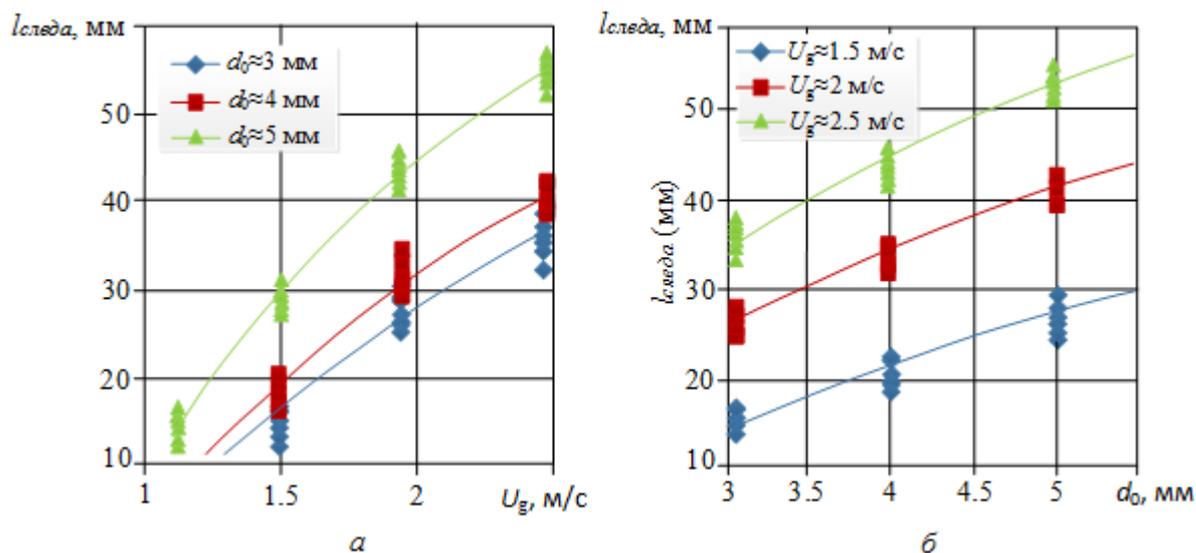


Рисунок 2.5 – Зависимости длины аэродинамического следа частицы от скоростей воздушного потока (*а*) и размеров частицы (*б*) [9]

Такой результат показывает важность учета такого параметра, как  $U_g$  при прогнозировании особенностей обтекания сферических частиц. Это особенно важно учитывать в тех технологиях, которые используют потоки капель, движущихся в противоположно направленном потоке газа. Например, испаряющееся охлаждение воды в охладителях типа вентилятора, тепловая (огневая) обработка жидкостей и водяное пожаротушение. Выбирая необходимые параметры каплеотвода, можно обеспечить условия, при которых капли будут проходить почти свободно от встречного потока газа. Или напротив, можно достичь условий полного торможения потока.

Также, проведены экспериментальные исследования влияния позиционирования двух капель относительно друг друга в газовом потоке на характеристики их аэродинамических следов. Пример полученных данных, иллюстрирующих особенности обтекания двух сферических частиц ( $d_0 \approx 5$  мм), приведен на рисунке 2.6.

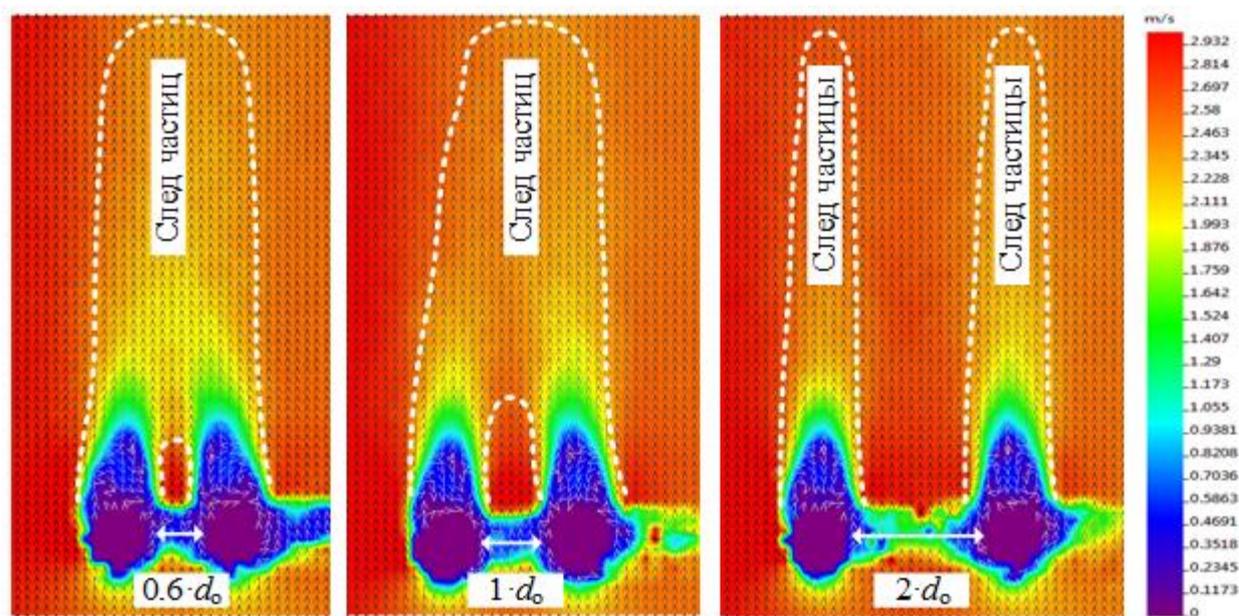


Рисунок 2.6 – Поля скоростей воздушного потока, полученные с использованием метода PIV [9]

В ходе экспериментов было установлено, что при сближении частиц на расстояние менее  $1 \cdot d_0$  наблюдается один общий аэродинамический след. В то же время длина интегрального следа на 5-10% превышает длину аэродинамического следа одной частицы. При удалении частиц на расстоянии больше  $(1.5-2) \cdot d_0$  у каждой частицы наблюдается отдельный аэродинамический след.

Далее проводились экспериментальные исследования, направленные на выявление влияния формы частицы на поведение воздушного потока в аэродинамическом следе этой частицы.

Эксперименты проводились с различными формами частиц:

- 1) сферическая;
- 2) грушевидная;
- 3) эллипсоидальная.

Полученные в результате поля скоростей представлены на рисунке 2.7.

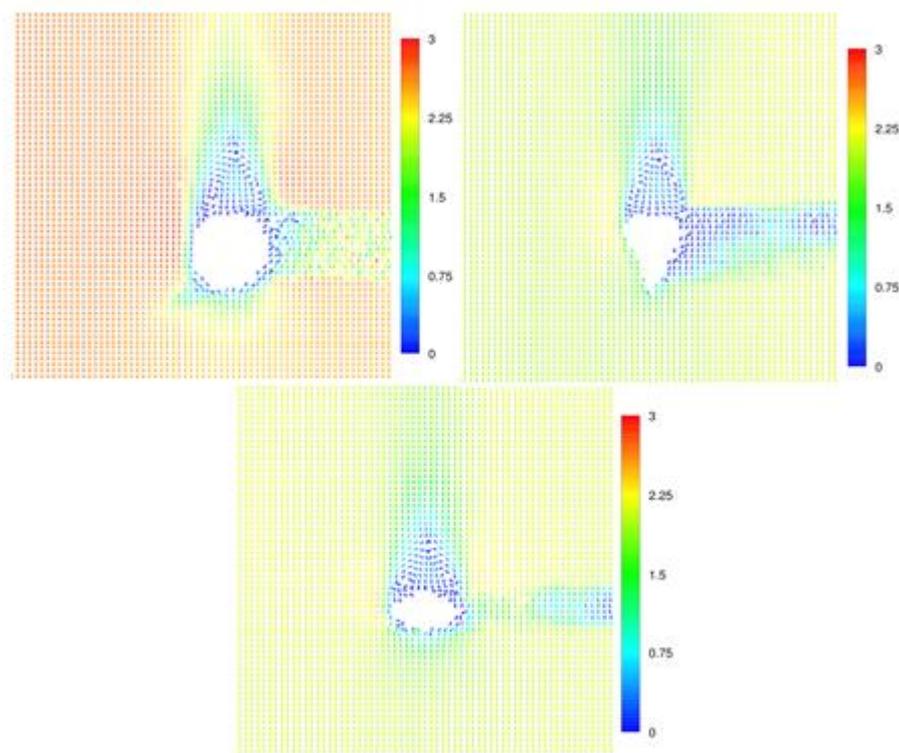


Рисунок 2.7 – Поля скоростей воздушного потока при обтекании им частиц различной формы

Полученные поля скоростей воздушного потока наглядно иллюстрируют, что форма обтекаемой фигуры незначительно влияет на скорость в следе фигуры. На характеристики обтекания большее влияние оказывает поперечный размер исследуемой частицы. Чем больше поперечный размер, тем шире и более протяженным оказывался аэродинамический след частицы и наоборот.

Также выполнен цикл оценочных экспериментов по определению характеристик обтекания воздушным потоком нескольких последовательно расположенных сферических частиц. Поля скорости для исследованных случаев приведены на рисунке 2.8.

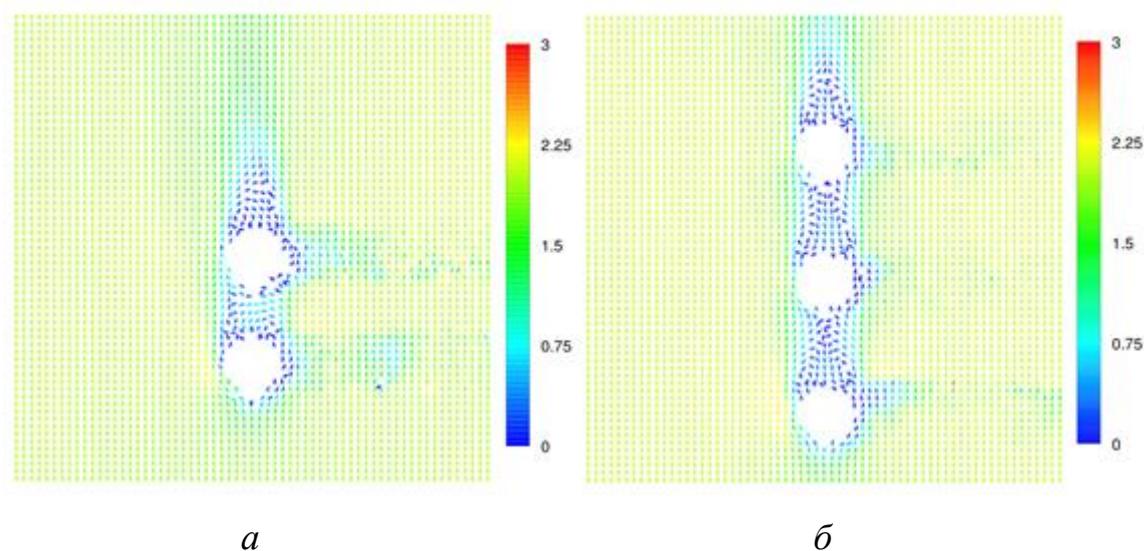


Рисунок 2.8 – Поля скоростей воздушного потока при обтекании им частиц ( $d_0=5$  мм): *a* – 2 частицы на расстоянии 3 мм; *б* – 3 частицы на расстоянии 5 мм

Установлено, что при последовательном расположении частиц протяженность аэродинамического следа также возрастает до 1,5 раз. Спроектированный экспериментальный комплекс, разработанные методики исследований, а также полученные результаты могут быть использованы при расчете сил сопротивления, действующих на частицы при их обтекании воздушным потоком.

### 3 Проектирование АСУ экспериментальным комплексом

Принцип действия всякой АСУ заключается в том, чтобы обнаруживать отклонения регулируемых величин, характеризующих работу объекта или протекание процесса от требуемого режима и при этом воздействовать на объект или процесс так, чтобы устранять эти отклонения.

Основным признаком АСУ является наличие главной обратной связи, по которой регулятор контролирует значение регулируемого параметра.

По принципу регулирования все системы автоматизированного управления подразделяются на три класса:

1) система программного регулирования – система, обеспечивающая изменение регулируемого параметра по заранее заданному закону (во времени);

2) следящая система – система, обеспечивающая изменение регулируемого параметра в зависимости от какой-либо другой величины;

3) система экстремального регулирования - система, в которой регулятор поддерживает оптимальное для изменяющихся условий значение регулируемой величины.

Для регулирования температурного режима электронагревательных установок применяются, в основном, системы двух первых классов.

#### 3.1 Выбор структуры АСУ экспериментального комплекса

Автоматизированная система управления и контроля экспериментальным лазерным комплексом разделена на две подсистемы:

1) локальная система регулирования температуры;

2) система технологической защиты и блокировки.

Основной задачей автоматизации экспериментального комплекса является регулирование температуры воздушного потока в циркуляционном контуре.

На рисунке 3.1.1 представлена структурная схема системы автоматизированного регулирования температуры. Схема представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.015 С5.

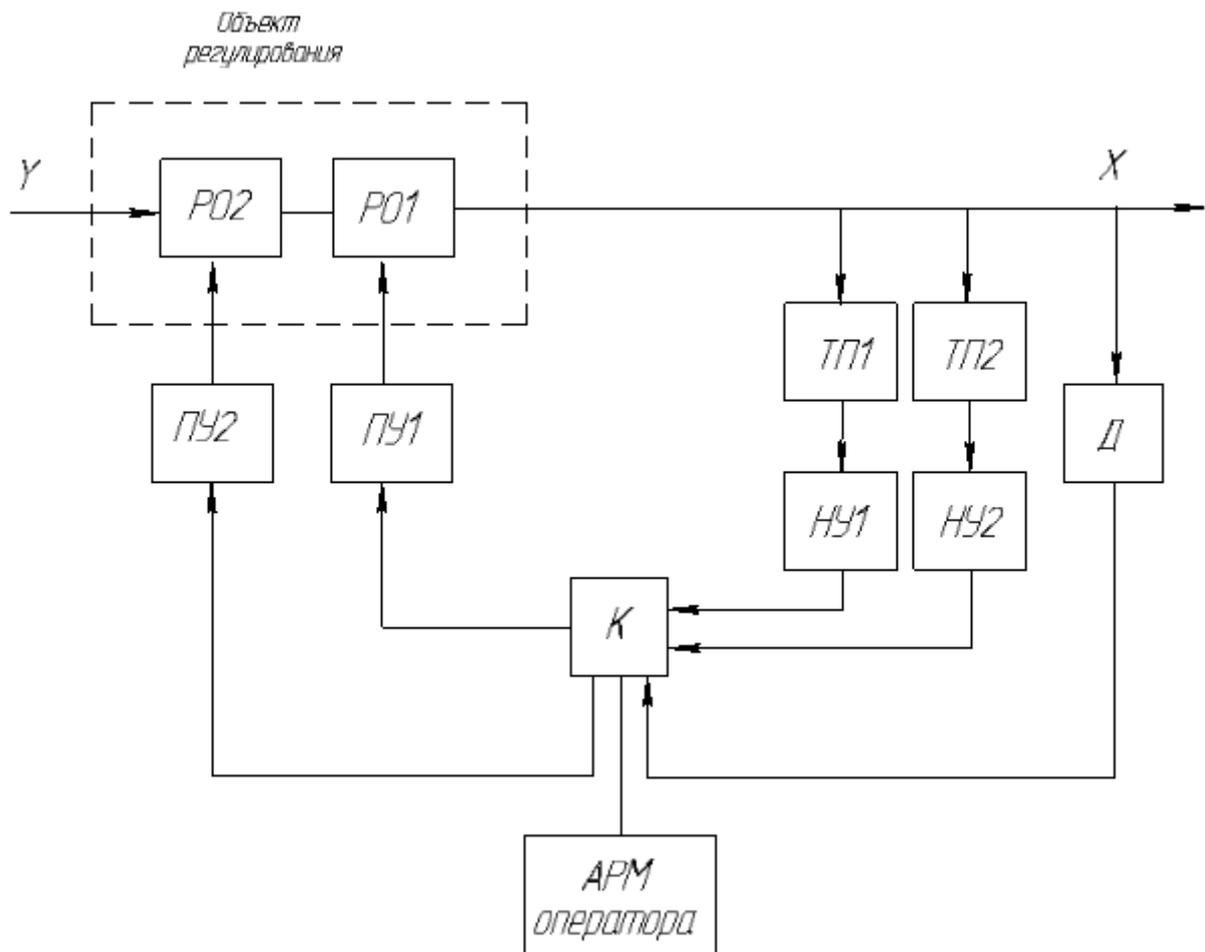


Рисунок 3.1.1 – Структурная схема АСУ температуры воздушного потока: ТП1, ТП2 – термопреобразователи; Д – датчик скорости (анемометр); НУ1, НУ2 – нормирующие устройства; К – контроллер; ПУ1, ПУ2 – пусковые устройства; РО1, РО2 – регулирующие органы; Y – регулирующее (управляющее) воздействие; X – регулируемый параметр

Цель автоматизированного регулирования состоит в поддержании регулируемой величины X на заданном контроллером значении, при помощи изменения величины Y положением регулирующего органа (РО). Принцип работы такой схемы состоит в следующем. Регулируемая величина X оценивается измерительными преобразователями (термопреобразователем и

анемометром). Значение с измерительного преобразователя поступает в промежуточный преобразователь (нормирующее устройство). Значение с промежуточного преобразователя подается на регулирующее устройство (контроллер), в котором сравнивается с заданным значением температуры. Если регулируемая величина  $X$  равна заданному значению, то АСУ находится в состоянии равновесия. При отклонении регулируемой величины от заданного значения, равновесие нарушается. Регулирующий орган приводится в действие, возникает процесс регулирования. Контроллер подает выработанные управляющие воздействия на пусковые устройства, где сигнал усиливается и подается непосредственно на регулирующие органы. В данной АСУ роль регулирующих органов выполняют воздухонагреватель и канальный вентилятор. Регулирующее воздействие направлено на уменьшение рассогласования между действительным и заданным значениями регулируемой величины. Регулятор будет воздействовать на объект до тех пор, пока регулируемая величина  $X$  не сравняется с заданным значением.

Дополнительно к основной системе регулирования температуры воздушного потока экспериментальный комплекс включает в себя систему технологических защит и блокировок. Данная система реализует следующие функции.

1) При обнаружении человека в области распространения лазерного излучения датчик движения подает дискретный сигнал на контроллер. Контроллер осуществляет управление лазерным комплексом (импульсный лазер прекращает работу) посредством подачи сигнала на генератор лазерного излучения.

2) Концевые выключатели установлены на двух дверцах контура. При разомкнутом состоянии выключателей контроллер получает дискретный сигнал, информирующий о том, что включение воздухонагревателя и вентилятора невозможно. Данная функция необходима для того, чтобы избежать уноса трассирующих частиц в окружающую среду через открытые дверцы контура во время циркуляции воздушного потока.

Рассмотренные выше подсистемы, в совокупности являются автоматизированной системой управления экспериментальным лазерным комплексом.

### 3.2 Схема взаимосвязи оборудования верхнего уровня и полевого

Автоматизированная система контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом диагностики быстропротекающих процессов построена на основе классической трехуровневой модели построения архитектуры системы:

- 1) нижний – полевой уровень (датчики);
- 2) средний – уровень базовой автоматизации процессов производства (управляющий контроллер);
- 3) верхний – уровень управления технологией (АРМ).

На нижнем уровне находится полевое оборудование: датчики, исполнительные механизмы и их вторичные приборы. В задачи оборудования этого уровня входит измерение физических параметров и их преобразование в стандартные типы электрических сигналов, получение управляющих сигналов от оборудования среднего уровня (контроллер) и непосредственное управление технологическим оборудованием в соответствии с этими сигналами.

Средний уровень управления построен с применением высокопроизводительных программируемых логических контроллеров с распределенной системой ввода-вывода.

На верхнем уровне осуществляется централизованный контроль и управление технологическим процессом. В состав оборудования верхнего уровня входят рабочие станции операторов (автоматизированные рабочие места).

Верхний уровень САУ является автоматизированным рабочим местом оператора (АРМ). Оборудование АРМ-оператора предназначено для оперативного отражения состояний технологических объектов и

оборудования комплекса на экране компьютера, а также предоставляет возможность дистанционного управления оборудованием и задания технологических уставок. В составе оборудования представлен персональный компьютер.

Структурная схема контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом диагностики быстропротекающих процессов представлена на рисунке 3.2.1.

Нижний уровень представляет собой совокупность первичных средств измерения температуры и скорости, необходимого для контроля всех технологических параметров циркулирующего в контуре воздуха. Используются два датчика температуры и анемометр, сигналы с которых поступают на нормирующие устройства и контроллер, расположенные в щите автоматизации (средний уровень). Контроллер вырабатывает управляющее воздействие по каналу управления. Управляющие сигналы поступают на пусковые устройства, которые приводят в действие исполнительные механизмы (воздухонагреватель и вентилятор). ИМ регулируют температуру и скорость воздушного потока в циркуляционном контуре.

Также, на нижнем уровне установлены датчик движения и концевые выключатели, передающие дискретные сигналы на контроллер. Последний, в свою очередь, имеет связь с генератором лазерного излучения, что предоставляет возможность управлять лазером.

Связь среднего и верхнего уровней (АРМ) осуществляется с помощью интерфейса RS-485.

### *Верхний уровень*

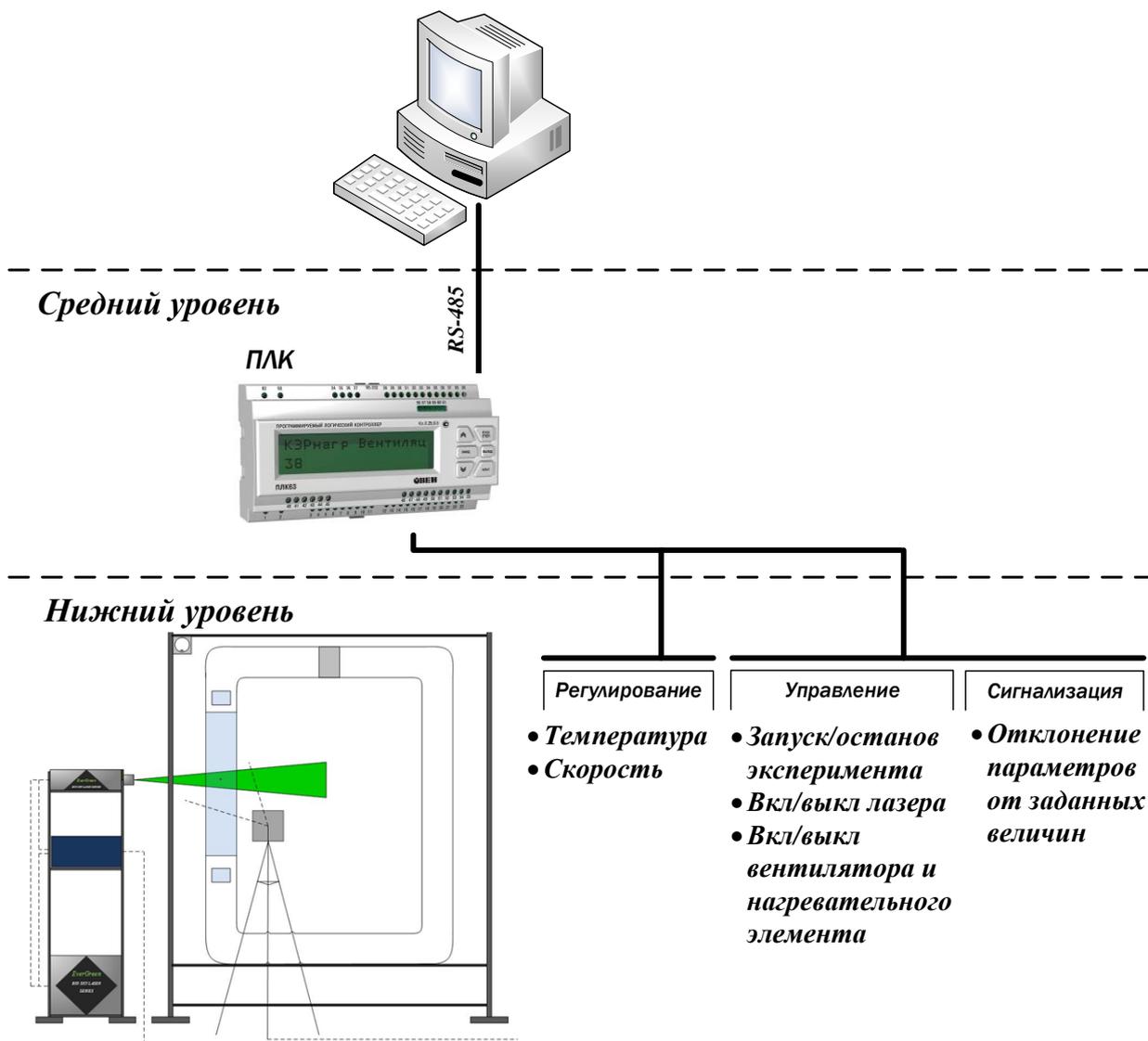


Рисунок 3.2.1 – Структурная схема контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом диагностики быстропротекающих процессов

### 3.3 Разработка функциональной схемы АСУ экспериментальным комплексом

Функциональные схемы автоматизации являются основным проектным документом, определяющим структуру и уровень автоматизации технологического процесса проектируемого объекта, и оснащение его

приборами и средствами автоматизации (в том числе средствами вычислительной техники).

Функциональные схемы представляют собой чертежи, на которых при помощи условных изображений показывают технологическое оборудование, коммуникации, органы управления, приборы и средства автоматизации, средства вычислительной техники и другие агрегатные комплексы с указанием связей между приборами и средствами автоматизации, таблицы условных обозначений и пояснения к схеме.

Схемы являются основанием для выполнения остальных чертежей проекта, а также для составления заявочных ведомостей в заказных спецификациях приборов и средств автоматизации. Функциональная схема согласовывается с заказчиком или организацией, выдавшей задание.

При разработке функциональных схем автоматизации технологических процессов должны быть решены следующие задачи:

- 1) получение первичной информации о состоянии технологического процесса и оборудования;
- 2) стабилизация технологических параметров процесса;
- 3) контроль и регистрация технологических параметров процессов и состояния технологического оборудования.

Технологическое оборудование и коммуникации при разработке функциональных схем должны изображаться, как правило упрощенно, без указания отдельных технологических аппаратов и трубопроводов вспомогательного назначения. Однако изображенная таким образом технологическая схема должна давать ясное представление о принципе ее работы и взаимодействии со средствами автоматизации.

Была разработана функциональная схема АСУ экспериментальным комплексом. Схема представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.015 С2.

На первом этапе разработки функциональной схемы были определены измерительные каналы (1-3), канал управления (4, 5, 7, 8) и канал сигнализации (6). В циркуляционном контуре установлены два первичных

преобразователя температуры и один измеритель скорости воздушного потока. Им соответствуют каналы 1-3. В процессе разработки функциональной схемы в верхней части изображены схематично места установки первичных преобразователей и регулирующих устройств в магистрали циркулирующего воздуха. Термоэлектрические преобразователи 1а и 2а измеряют температуру воздушного потока и передают полученные значения на нормирующие устройства, где они преобразуются в унифицированный токовый сигнал 4...20 мА и передаются на контроллер 10а. Анемометр 3а измеряет скорость воздушного потока и в виде унифицированного токового сигнала передает на контроллер 10а. Также, в области циркуляционного контура размещен двойной импульсный твердотельный лазер 7г, распространяющий лазерное излучение в регистрационной области.

Далее разрабатывалась нижняя часть функциональной схемы. В нижней части изображены устройства, установленные по месту (вне щита управления). Генератор лазерного излучения 7б, подключенный к лазеру по каналу 7. Синхронизирующий процессор 7в, предназначенный для синхронизации работы лазера и камеры. А также кнопочный пост 7г, осуществляющий пуск и останов эксперимента. Приборы, установленные в щите управления: нормирующие устройства 1б, 2б, пусковые устройства 4а, 5а и контроллер 10а.

На функциональной схеме АСУ экспериментального комплекса выделены каналы управления (4, 5).

Контроллер формирует регулирующие сигналы, которые поступают на пусковые устройства 4а и 5а, где сигнал усиливается и приводит в действие регулирующие органы (воздухонагреватель и канальный вентилятор).

Также, выделены каналы сигнализации 4 и 6. На 6 канале располагается датчик движения 6а, предназначенный для идентификации наличия человека в области распространения лазерного ножа. На 4 канале располагаются

концевые выключатели 9а, передающие дискретный сигнал на контроллер, информирующие об открытых дверцах контура.

### 3.4 Выбор технических средств АСУ экспериментальным комплексом

Руководствуясь выбранной структурной схемой в пункте 3.2, основное оборудование контроля и управления экспериментальным комплексом – это два термопреобразователя для измерения температуры циркулирующего воздуха в двух точках контура, анемометр для измерения скорости воздушного потока, воздухонагреватель, вентилятор, нормирующие устройства, два пусковых устройства, датчик движения и контроллер.

#### 3.4.1 Выбор регулирующего устройства

В данной работе разрабатывается автоматизированная система контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом. Для осуществления контроля и управления технологическими параметрами контура рассмотрены несколько программируемых логических контроллеров разных производителей, таких как: Schneider Electric Modicon M221, ОВЕН ПЛК63 и ВЭСТ-02.

Для начала рассмотрим ПЛК фирмы «Schneider Electric» с маркировкой M221, цена которого составляет 16400 рублей. Применяется для решения задач малых систем автоматизации. Исполнение контроллера блочное. Технические характеристики Modicon M221 приведены в таблице 1 [11].

Таблица 1 – Технические характеристики ПЛК Modicon M221

| Параметр                       | Значение  |
|--------------------------------|---|
| Напряжение питания             | 100-220 В переменного тока, 24 В постоянного тока   |
| Логические входы, шт.          | 9, приемник/ источник, 24 В   |
| Логические выходы, шт.         | 7 релейных  |
| Аналоговые входы, шт.          | 2, 0...10 В   |
| Модули расширения ввода-вывода | 7 и 14 модулей ТМ3 или ТМ2  |
| Встроенные средства связи      | 1 порт Ethernet, 1 последовательный порт RS232/485 с питающим напряжением + 5 В, SD карта памяти и USB порт |
| Управление процессом           | ПИД-регулирование   |

Продолжение таблицы 1

| Параметр                  | Значение   |
|---------------------------|--|
| Контроль положения        | Есть   |
| Картриджи                 | 3 расширения аналогового ввода-вывода, 1 дополнительного последовательного порта               |
| Дисплей                   | Графический дисплей и блок мониторинга   |
| Монтаж                    | Установка на симметричную монтажную DIN-рейку или панель при помощи монтажного комплекта ТМAM2 |
| Ширина x высота x глубина | 95 x 90 x 70 мм  |
| Программирование          | Через ПО SoMachine Basic   |

Производство НПО «ВЭСТ» разработало программируемый логический контроллер ВЭСТ-02, предназначенный для создания систем управления малыми и средними объектами. Контроллер может быть запрограммирован на работу под определенные условия и задачи: тепловой пункт, вентиляция, тепловые завесы и множество других. Конфигурация этих задач осуществляется в бесплатной программе "АКИАР" производства НПО «ВЭСТ», что является несомненным плюсом данного ПЛК. Цена контроллера составляет 14000 рублей. Рассмотрим технические характеристики в таблице 2 [12].

Таблица 2 – Технические характеристики контроллера ВЭСТ-02

| Параметр                         | Значение       |
|----------------------------------|----------------|
| Напряжение питания               | ~220 В, 50 Гц  |
| Потребляемая мощность            | 3 ВА           |
| Диапазон контроля температур     | -50...+150 °С  |
| Тип входных датчиков температуры | Pt1000         |
| Аналоговых входов                | 8 шт.          |
| Цифровых входов                  | 5 шт.          |
| Симисторных выходов              | 6 шт.          |
| Аналоговых выходов 0...10 В      | 2 шт.          |
| Интерфейс связи                  | RS-232, RS-485 |
| Средняя наработка на отказ       | 50000 ч        |
| Средний срок службы              | 10 лет         |
| Масса прибора                    | 350 г          |

Рассмотрим «ОВЕН ПЛК63» производства ООО «Овен».

Данный программируемый логический контроллер предоставляет возможность управлять технологическим процессом непосредственно с лицевой панели контроллера с помощью встроенного текстового монохромного дисплея – для конфигурирования вывода и задания значения параметров программы, информации о ходе процесса и сигнализации и 9 кнопок управления – для управления индикацией задания значения параметров.

Значительным преимуществом данного ПЛК является встроенная батарея бесперебойного питания, позволяющая выполнять программу при пропадании питания, и переводить выходные элементы в безопасное состояние.

Имеется 5 различных типов выходных элементов, которые можно выбрать при заказе контроллера, а также универсальные аналоговые входы для подключения широкого спектра датчиков и встроенные интерфейсы RS – 485, RS – 232. В таблице 3 приведены основные технические характеристики ПЛК [13].

Таблица 3 – Технические характеристики ОВЕН ПЛК63

| Параметр   | Значение |
|--|----------|
| Напряжение питания   | ~220 В   |
| Потребляемая мощность, для переменного тока, Вт                            | 18       |
| Параметры встроенного вторичного источника питания, выходное напряжение, В | 24±3     |
| Количество дискретных входов   | 8        |
| Количество аналоговых входов   | 8        |
| Количество дискретных выходов  | 8        |
| Количество аналоговых выходов  | 6        |
| Разрядность АЦП, бит   | 15       |

### Продолжение таблицы 3

| Параметр             | Значение                                |
|----------------------|---|
| Поддержка протоколов | ОВЕН, Modbus RTU, Modbus ASCII, GateWay |
| Цена, руб.           | 12390                                   |

Для реализации автоматизированной системы контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом выбран программируемый логический контроллер «ОВЕН ПЛК63», так как за наименьшую стоимость предоставляет все необходимые характеристики. В частности, имеет оптимальное количество входов и выходов, встроенный вторичный источник питания, который необходим для реализации питания нормирующих устройств. Также, выбранный контроллер обладает наименьшей стоимостью, что является несомненным преимуществом при выборе оборудования.

Для отображения величин измеряемых сигналов используется персональный компьютер фирмы Intel на базе процессора Intel Core i7.

#### 3.4.2 Выбор регулирующих органов

В качестве регулирующего органа, осуществляющего нагрев воздуха в циркуляционном контуре, используется нихромовая проволока марки Х20Н80-Н  $d = 0,2$  мм, намотанная на керамическую изоляцию и закрепленная в контуре с помощью неё. Применяют нихромовую нить при изготовлении ТЭНов, так как она обладает высокой износостойкостью. Для производства нагревательных элементов используют тончайший прокат из нихрома диаметром 0,04-12 мм. Чем больше никеля содержит сплав – тем выше его пластичность.

В качестве регулирующего органа, осуществляющего создание воздушного потока, использовался канальный вентилятор смешанного типа VENTS (ТТ 125) в пластиковом корпусе производительностью до 20502 м<sup>3</sup>/ч. Предназначен для приточно-вытяжных систем вентиляции. Скорость потока

варьировалась в диапазоне от 0,5 до 3 м/с. Технические характеристики представлены в таблице 4 [14].

Таблица 4 – Технические характеристики вентилятора VENTS (ТТ 125)

| Параметр   | Значение |
|--|----------|
| Напряжение, В                                      | 230      |
| Потребляемая мощность, Вт                          | 23/37    |
| Диаметр, мм  | 125      |
| Масса, кг  | 1,35     |
| Максимальный расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч     | 280      |
| Максимальная температура перемещаемого воздуха, °С | 60       |

### 3.4.3 Выбор термопреобразователей

Регулируемым параметром в проектируемой автоматизированной системе управления является температура. Важно не просто измерять температуру, но и своевременно реагировать на происходящие изменения, а зачастую и предсказывать возможность появления каких-либо отклонений в процессе, избегая опасных аварийных ситуаций, незапланированных остановок и, как следствие, снижения эффективности работы. В разрабатываемой автоматизированной системе управления температуры воздушного потока необходимо контролировать температуру в двух точках циркуляционного контура. Первая точка находится в регистрационной области. Вторая – после исполнительного механизма (воздухонагреватель).

Основными факторами, которые определяют конструкцию термопары, являются условия ее эксплуатации. Некоторые из них: диапазон измеряемых температур и свойства среды, в которой осуществляются измерения. Перечисленные факторы влияют на способ соединения термоэлектродов в рабочем спае, изоляции термоэлектродов, защиты термопары. Множество производителей предлагают широкую линейку средств измерения температуры для разнообразных применений, с различным набором функций

и уровнем интеллектуальности. Рассмотрим несколько вариантов средств измерения температуры (термоэлектрических преобразователей).

Наиболее широкое применение получили термопары хромель-алюмель (ТХА), хромель-копель (ТХК), железо-константан (ТЖК), медь-копель (ТМК), медь-константан(ТМК), платинородий-платина (ТПП), платинородий-платинородий (ТПР), Вольфрам-рений (ТВР). Среди наиболее используемых можно выделить термопары хромель-алюмель, хромель-копель и железо-константан.

В таблице 5 представлены различные типы термопар с соответствующими им диапазонами рабочих температур.

Таблица 5 – Диапазоны рабочих температур для различных видов термоэлектрических преобразователей

| Тип термопары | Диапазон рабочих температур, °С |
|---------------|---------------------------------|
| ТПП (S)       | 0 – 1300                        |
| ТПР (B)       | 600 – 1700                      |
| ТХК (L)       | -200 – 700                      |
| ТХА (K)       | -200 – 1200                     |
| ТЖК (J)       | -200 – 750                      |
| ТВР (A)       | 0 – 2200                        |

Циркуляционный контур, в котором предстоит измерять температуру воздуха, изготовлен из полипропилена. Температура, при которой данный материал начинает размягчаться составляет 140 °С. Плавление происходит при 175 °С. Данный факт ограничивает диапазон температур, при которых возможно проводить экспериментальные исследования, поэтому можно использовать термоэлектрический преобразователь, предназначенный для относительно невысоких температур исследуемой среды. Рассмотрим термопары двух производителей «Метран» и «Элемер».

1. Термопреобразователь сопротивления медный ТСМ Метран-203. Предназначены для измерения температуры жидких и газообразных химически неагрессивных сред, а также агрессивных, не разрушающих

материал защитной арматуры. Технические характеристики ТСМ Метран-203 представлены в таблице 6 [15].

Таблица 6 – Технические характеристики ТСМ Метран-203

| Параметр                           | Значение  |
|------------------------------------|-----------|
| НСХ                                | 50М       |
| Класс допуска                      | В, С      |
| Диапазон измеряемых температур, °С | -40...150 |
| Показатель тепловой инерции, с     | 40        |

2. Термоэлектрический преобразователь ТХК Метран-242. Предназначен для измерения температуры малогабаритных подшипников, поверхности твердых тел, корпусов и головок термопластавтоматов, червячных прессов для переработки пластмасс и резиновых смесей. Технические характеристики ТП ТХК Метран-242 представлены в таблице 7 [15].

Таблица 7 – Технические характеристики ТП ТХК Метран-242

| Параметр                           | Значение  |
|------------------------------------|-----------|
| НСХ                                | ХК        |
| Диапазон измеряемых температур, °С | -40...200 |
| Класс допуска                      | 2         |
| Показатель тепловой инерции, с     | 2,5       |

3. Термопреобразователь сопротивления ТП-1388 (L) производства ООО «Элемер». Предназначены для контроля и измерения температуры жидких, твердых, газообразных и сыпучих сред, неагрессивных к материалу корпуса преобразователя. Технические характеристики ТП-1388 представлены в таблице 8 [16].

Выберем два термоэлектрических преобразователя производителя «Элемер» (Россия) ТП-1388 (L). Так как данные термопары обладают наименьшей инерционностью и наилучшим образом подходят по габаритным размерам для установки в циркуляционный контур.

Таблица 8 – Технические характеристики термоэлектрического преобразователя ТП-1388 (L)

| Параметр                           | Значение  |
|------------------------------------|-----------|
| Диапазон измеряемых температур, °С | -40 - 200 |
| Класс допуска                      | 2         |
| Количество рабочих спаев, шт.      | 1         |
| Условное давление, МПа             | 0,4       |
| Показатель тепловой инерции, с     | 2         |

### 3.4.4 Выбор нормирующих устройств

Нормирующее устройство (НУ) – это устройство, которое преобразует входные сигналы от первичных датчиков в унифицированные сигналы стандартных диапазонов.

Рассмотрим несколько вариантов нормирующих преобразователей.

1. НПСИ-ТП нормирующий преобразователь сигналов термопар и напряжения в унифицированный токовый сигнал 0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА. Стоимость составляет 5551 руб. Технические характеристики НУ НПСИ-ТП представлены в таблице 9 [17].

Таблица 9 – Технические характеристики НУ НПСИ-ТП

| Параметр   | Значение  |
|--|---|
| Диапазон рабочих температур, °С                                      | -40...70  |
| Диапазон напряжений питания  | 85...265 В переменного тока,<br>10...36 В постоянного тока                      |
| Габаритные размеры   | 115 × 105 × 22,5 мм   |
| Диапазоны выходного токового сигнала (программируется пользователем) | 0...5 мА,<br>0...20 мА,<br>4...20 мА  |
| Диапазон линейности выходного тока (для диапазона)                   | 0...5,1 мА (0...5 мА),<br>0...20,5 мА (0...20 мА),<br>3,8...20,5 мА (4...20 мА) |

2. Нормирующее устройство НПТ-1 производства «ОВЕН» (Россия). Преобразователь предназначен для преобразования термо-ЭДС термоэлектрических преобразователей (термопар) в унифицированный токовый сигнал 4-20 мА. Имеет линейную зависимость тока от температуры. Стоимость составляет 3363 руб. Технические характеристики НУ НПТ-1 представлены в таблице 10 [18].

Таблица 10 – Технические характеристики преобразователя НПТ-1

| Наименование  | Значение             |
|---|----------------------|
| Номинальное значение напряжения питания (постоянного тока)                              | 24 В                 |
| Диапазон допустимых напряжений питания (постоянного тока)                               | 12 – 36 В            |
| Потребляемый ток, не более:   |                      |
| – для рабочего режима   | 35 мА                |
| – для режима конфигурирования   | 50 мА                |
| Номинальный диапазон выходного тока преобразователя                                     | 0 – 20 мА, 4 – 20 мА |
| Номинальное значение сопротивления нагрузки (при напряжении питания 24 В)               | 250 Ом ±5 %          |
| Максимальное допустимое сопротивление нагрузки (при напряжении питания 36 В)            | 1200 Ом              |
| Время установления выходного сигнала после скачкообразного изменения входного, не более | 1 с                  |
| Интерфейс связи с ПК  | USB2.0 Full Speed    |
| Габаритные размеры  | 98 × 82 × 22 мм      |

В рамках выполнения данной работы, для экспериментального стенда было выбрано два нормирующих устройства НПТ-1 производства «ОВЕН» (Россия), так как данное НУ обладает меньшей стоимостью и подходит для реализации задач курсового проекта.

Применение нормирующих преобразователей сигналов позволяет передавать измеренный сигнал от измерительных устройств на регулирующее устройство, а также понижать воздействие электромагнитных помех. Применение нормирующих преобразователей позволяет унифицировать сигналы в системе.

### 3.4.5 Выбор средства измерения скорости потока воздуха

На изменение температуры воздуха, циркулирующего в контуре, помимо воздушнонагревателя, также влияет скорость воздуха, подаваемого вентилятором. Чем выше скорость циркулирующего воздуха, тем ниже его температура. Чтобы установить зависимость изменения температуры воздуха от изменения его скорости, в контур необходимо установить средство измерения скорости. Температура воздуха внутри контура, при проведении экспериментов, не будет превышать 100 °С. Для осуществления поставленной задачи был выбран двунаправленный крыльчатый анемометр LA-14680 производства ООО «Полтраф СНГ» (Россия), так как выходной сигнал данного анемометра 0...4 мА, 0...20 мА, что является преимуществом, так как не требуются дополнительные преобразователи. Технические характеристики анемометра представлены в таблице 11 [19].

Таблица 11 – Технические характеристики анемометра LA-14680

| Параметр               | Значение  |
|------------------------|---|
| Измерительный элемент  | Измеряющий генератор постоянного тока                 |
| Область применения     | -30...120 °С  |
| Диапазон измерения     | 0,5...20 м/с  |
| Выход                  | 0...4 мА, 0...20 мА                                   |
| Токовые характеристики | $V = 4,91 + 0,5$                                      |
| Корпус                 | Корпус сделан из лёгкого металла, лопатки из алюминия |
| Вес/размер             | 0,4 кг/ ø 109 мм                                      |

### 3.4.6 Выбор пусковых устройств

Контроллер формирует управляющий сигнал, который поступает на пусковые устройства, где сигнал усиливается и приводит в действие исполнительные механизмы, создающие необходимые условия в циркуляционном контуре. В качестве пускового устройства для вентилятора был выбран регулятор скорости SB033 (электронный трансформатор)

производства компании ООО «Ситирон» (Россия). Управление внешним сигналом 0...10 В производится с контроллера. Технические характеристики регулятора представлены в таблице 12 [20].

Таблица 12 – Технические характеристики регулятора SB033

| Параметр                 | Значение           |
|--------------------------|--------------------|
| Напряжение питания       | 220 В              |
| Максимальная мощность    | 200 Вт             |
| Управляющий сигнал       | 0...10 В           |
| Регулировка мощности     | 5-100%             |
| Габаритный размер/ масса | 70x60x86 мм/ 250 г |
| Степень защиты           | IP21               |

В качестве пускового устройства для воздухонагревателя (система из нихромовой спирали и керамической трубки) был выбран регулятор напряжения РОТ-160, предназначенный для питания однофазным током активных и активно-индуктивных нагрузок, допускающих фазовое регулирование напряжения. Выполняется в виде блока, встраиваемого в другие изделия, и может быть использован в качестве исполнительного устройства в системах автоматического регулирования тока, напряжения, температуры, мощности и т.д. Технические характеристики регулятора напряжения РОТ-160 представлены в таблице 13 [21].

Таблица 13 – Технические характеристики регулятора напряжения РОТ-160

| Параметр                                       | Значение |
|--|----------|
| Номинальное входное напряжение, В              | 380/220  |
| Номинальный выходной ток, А                    | 160      |
| Диапазон регулирования выходного напряжения, % | 3-98     |
| Диапазон изменения входного сигнала, мА        | 0...5    |

### 3.4.7 Выбор датчика движения

Так как в процессе проведения экспериментов используется импульсный лазер (в составе PIV системы), видимое, а также ближнее инфракрасное и ультрафиолетовое лазерные излучения представляют из себя опасность для глаз, так как эти излучения хорошо фокусируются хрусталиком на сетчатке глаза. Высокая плотность энергии может вызвать ожоги и другие повреждения. Для предотвращения возникновения рассмотренных опасных ситуаций, в область распространения лазерного ножа устанавливается инфракрасный датчик движения, при срабатывании которого сигнал поступает в ПЛК, а от него сигнал идет на синхронизатор, который в свою очередь не позволяет осуществить запуск лазера. Сам датчик движения представляет из себя бесконтактный датчик, фиксирующий перемещение объектов и используемый для контроля за окружающей обстановкой или автоматического запуска требуемых действий в ответ на перемещение объектов.

Рассмотрим несколько вариантов инфракрасных датчиков движения.

#### 1. Датчик движения ИЕК ДД 024

Датчик движения ИЕК ДД 024 предназначен для эксплуатации в однофазных электрических сетях переменного тока напряжением 230 В частотой 50 Гц. Предназначен для автоматического включения и отключения нагрузки в заданном интервале времени при появлении движущихся объектов в зоне обнаружения датчика и в зависимости от уровня освещенности. В качестве коммутирующего нагрузку элемента использовано электромеханическое реле [22]. Основные характеристики датчика ИЕК ДД 024 приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Основные характеристики датчика движения ИЕК ДД 024

| Параметр                           | Значение |
|------------------------------------|----------|
| Угол обнаружения                   | 360°     |
| Максимальная подключаемая мощность | 1100 Вт  |
| Материал                           | Пластик  |
| Мощность                           | 0,45 Вт  |
| Вес                                | 0,204 кг |
| Радиус действия                    | 6 м      |
| Стоимость                          | 429 руб. |

## 2. Датчик движения (PIR Motion sensor) HC-SR501

Пирозлектрический инфракрасный сенсор. PIR датчики позволяют обнаруживать движение людей в контролируемой зоне, так как тело человека излучает тепло.

Основные технические характеристики датчика движения HC-SR501 приведены в таблице 15 [23].

Таблица 15 – Основные технические характеристики датчика HC-SR501

| Параметр                              | Значение  |
|---------------------------------------|---|
| Размеры                               | примерно 3.2 см x 2.4 см x 1.8 см                           |
| Напряжение питания                    | 4,5 В - 20 В  |
| Дистанция обнаружения                 | 3 – 7 м (настраивается)                                     |
| Угол обнаружения                      | до 120°-140° (в зависимости от конкретного датчика и линзы) |
| Длительность импульса при обнаружении | 5 – 200 сек. (настраивается)                                |
| Время блокировки до следующего замера | 2,5 сек. (но можно изменить заменой SMD-резисторов)         |
| Рабочая температура                   | -20 – +80 °С  |
| Режим работы                          | L – одиночный захват, H – повторяемые измерения             |
| Стоимость                             | 105 руб.  |

Для реализации поставленной выше задачи произведем выбор датчика движения HC-SR501, так как он обладает низкой стоимостью и очень прост в подключении и использовании. Решения по выбору технических средств автоматизации приведены в заказной спецификации, представленной в приложении А.

## 4 Разработка схемной конструкторской документации

### 4.1 Проектирование принципиальной электрической схемы АСУ экспериментальным комплексом

Принципиальные схемы являются основными чертежами для разработки рабочих монтажных чертежей, устройств и систем электрического принципа действия. Принципиальная электрическая схема должна быть спроектирована так, чтобы ее эксплуатация в производственных условиях была предельно простой, требовала минимум затрат и внимания эксплуатационного персонала, обеспечивала возможность проведения ремонтных и наладочных работ с соблюдением необходимых мер безопасности.

В процессе проектирования систем автоматизации различных технологических процессов принципиальные электрические схемы разрабатывают обычно в следующем порядке:

1) на основании функциональной схемы автоматизации составляют четко сформулированные технические требования, предъявляемые к принципиальной электрической схеме;

2) применительно к этим требованиям устанавливают условия и последовательность действия схемы;

3) каждое из заданных условий действия схемы изображают в виде тех или иных элементарных цепей, отвечающих данному условию действия;

4) элементарные цепи объединяют в общую схему;

5) проверяют в схеме возможность возникновения ложных или обходных цепей, или ее неправильной работы при повреждениях элементарных цепей или контактов;

6) рассматривают возможные варианты решения и принимают окончательную схему применительно к имеющейся аппаратуре.

На принципиальной схеме отображаются физические объекты и линии связи. Также могут быть показаны конструктивы.

В принципиальных схемах должно быть мало пересечений и изгибов, линии связи (горизонтальные и вертикальные), обозначения (над элементом или слева).

Условные обозначения:

- 1) буквенные;
- 2) цифровые;
- 3) буквенно-цифровые.

В данном разделе была разработана схема электрическая принципиальная АСУ экспериментальным комплексом, которая приведена на первом листе с шифром ФЮРА.421000.015 ЭЗ.

Для обозначения участков цепей принципиальных электрических схем применяются арабские цифры одного размера. Обозначения располагают в последовательности сверху вниз в направлении слева направо. В данной электрической схеме для цепей управления, регулирования и измерения используется группа чисел 1 - 100, для цепей питания 101 - 200.

Электропитание всех технических средств осуществляется от распределительного щита питания переменным напряжением 220 В, 50 Гц.

Термоэлектрические преобразователи В1 и В3 подключаются к нормирующим устройствам В2 и В4, которые преобразуют измеряемые величины в унифицированные токовые сигналы 4...20 мА (18). Далее сигналы поступают на соответствующие входы контроллера А1. В соответствии с [19] осуществляется подключение анемометра к контроллеру А1 [13]. Подключение анемометра производится с помощью прецизионного резистора R3, сопротивление которого составляет 500 Ом [24]. На основе программно заданных алгоритмов формируются управляющие сигналы, которые передаются на пусковые устройства А2 [20] и А3 [21]. Датчик движения В7 [22] подключен к контроллеру А1 [13]. По результату его сигналов, контроллер вырабатывает воздействие на генератор лазерного излучения В6.

Также, к контроллеру А1 подключены концевые выключатели [25], установленные на дверцах циркуляционного контура. При наличии хотя бы

одного разомкнутого концевого выключателя, контроллер А1 не позволяет осуществить запуск воздухонагревателя и вентилятора. К дискретному входу [26] ПЛК А1 подключен компрессор В8 [27] для осуществления периодического (1 раз в 10-20 секунд) продувания циркуляционного контура, с целью поднятия трассирующих частиц, осевших на стенках контура.

#### 4.2 Проектирование монтажной схемы АСУ экспериментальным комплексом

К технической документации относятся монтажные схемы. Схемы соединений показывают каким образом соединены между собой клеммы или выводы технических средств, расположенных либо на конструкции, либо за пределами конструкций.

Схемы подключений показывают каким образом технические средства систем контроля и автоматизации подключены к сборкам или блокам зажимов, расположенным на щитовых конструкциях.

Монтажная документация предназначена для выполнения монтажных работ. Эту документацию также используют в процессе эксплуатации, наладке, ремонте и выполнения профилактических работ.

Наладку выполняют перед вводом в эксплуатацию или после проведения ремонтов.

Для разработки монтажных документаций используют следующие материалы:

- 1) функциональные схемы;
  - 2) принципиальные схемы;
  - 3) техническая документация заводов изготовителей средств автоматизации и других средств:
- техническое описание;
  - инструкция по эксплуатации;
- 4) общие виды щитовых и других конструкций.

В данной работе необходимо разработать монтажную схему автоматизированной системы контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом. Для этого необходимо выполнить следующие этапы:

- 1) нанести на монтажную схему условные обозначения технических средств автоматизации;
- 2) выбрать кабели для соединения и подключения технических средств автоматизации;
- 3) произвести нумерацию проводников в соответствии с разработанной ранее электрической схемой;
- 4) выполнить подключение средств измерения и управления в шкаф автоматизации.

На монтажной схеме в верхней левой части поля чертежа размещена таблица с поясняющими надписями. Под таблицей с поясняющими надписями расположены изображения первичных преобразователей, устанавливаемых непосредственно в циркуляционном контуре. Также, в верхней части чертежа расположены регулирующие органы.

Датчики температуры и анемометр изображены монтажными символами в соответствии с заводскими инструкциями. При этом, внутри монтажных символов указаны номера зажимов и подключение к ним жил кабелей, причем, изображены только используемые клеммы. Маркировка жил нанесена вне монтажного символа.

Щит автоматизации изображен в виде прямоугольника в нижней области чертежа.

Первичные преобразователи, внешние приборы и шкаф управления соединены между собой электрическими линиями связи, выполненными с помощью электрических кабелей, проводов и жгутов проводов.

Присвоены порядковые номера средств системы автоматизации. В соответствии с принципиальной схемой маркированы проводники, подключаемые к зажимам и клеммам технических средств.

К внешним электрическим и трубным проводкам относят такие проводки, которые расположены за пределами щитов и пультов.

Для линий питания выбраны кабели с алюминиевыми жилами типа АКРВБГ сечением 2,5 мм<sup>2</sup> с броней из двух стальных оцинкованных лент.

Для информационных линий выбираем кабели типа КРВГ сечением кабеля 10,54 мм<sup>2</sup>. Выбранные кабели, а также их технические характеристики представлены в таблице 16 [28].

Таблица 16 – Характеристики проводов и кабелей электропроводки АСР

| № линии      | Марка    | Кол-во жил | Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> | Диаметр, мм |
|--------------|----------|------------|--------------------------------------|-------------|
| 7            | АКРВБГ   | 7          | 2,5                                  | 18          |
| 3,4,5,8,9,13 | КРВГ     | 4          | 1                                    | 10,54       |
| 6            | КРВГ     | 5          | 1                                    | 12,39       |
| 1,2          | ПТН-А-ХК | 2          | 0,2                                  | 0,5         |
| 10,11        | АКРВБГ   | 4          | 2,5                                  | 15,8        |

В щите автоматизации для соединения сборок зажимов с контроллером используется провод с медной жилой и изоляцией из поливинилхлоридного пластика марки ПВ-1.

Схема монтажная внешних электрических проводок, представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.015 С4.

#### 4.3 Разработка чертежа общего вида щита автоматизации

Щиты систем автоматизации предназначены для размещения на них средств контроля и управления технологическими процессами, сигнальных устройств, контрольно-измерительных приборов, аппаратуры управления, автоматического регулирования, блокировки, защиты, линий связи между ними и т.п.

Щиты устанавливаются в производственных и специальных щитовых помещениях: операторских, аппаратных, диспетчерских и т.п.

На данном этапе был составлен комплект чертежей, необходимых для изготовления щита, монтажа технических средств автоматизации, электрических проводок и эффективной эксплуатации средств автоматизации.

Учитывая конструктивные особенности, в том числе степень защиты от прикосновения к токоведущим частям, в лаборатории применим для монтажа средств автоматизации разрабатываемой системы регулирования щит навесной ОЩН 552, степень защиты IP65.

Для контроля за ходом технологического процесса разместим на щите контроллер, нормирующие устройства, пусковые устройства и сборки зажимов.

В данном случае для размещения средств автоматизации используем щит с дверью одиночный, шириной 500 мм, высотой 500 мм и глубиной 210 мм. Фасадная сторона щитов (шкафных и панельных с каркасом) разбита на два (исполнение 1) или на три (исполнение 2) функциональных поля. Разбивка выполнена на основе рационального распределения приборов, органов управления и сигнальной арматуры. При проектировании щитов систем автоматизации технологических процессов рекомендуется в первую очередь применять щиты исполнения 2. Фасадные панели этого исполнения наиболее технологичны в изготовлении благодаря минимальным размерам и применению автоматизированного процесса пробивки отверстий в них.

Чертеж общего вида одиночного щита содержит вид спереди, вид на внутренние плоскости, перечень составных частей.

Блок контроллера рассчитан на утопленный монтаж на вертикальной панели щита управления. Все остальные блоки, входящие в состав щита, рассчитаны на навесной монтаж.

В нижней части панели щита расположены сборки зажимов ХТ2, ХТ3.

Общий вид щита представлен на чертеже с шифром ФЮРА.421000.015 ВО.

## 5 Расчет параметров настройки регулятора

### 5.1 Идентификация объекта управления

Идентификация предназначена для получения математических моделей объекта управления. Существует активная и пассивная, в инженерной практике применяют активную идентификацию (на объект подается специализированное входное воздействие и по реакции объекта при обработке результатов получают математическую модель).

В данной работе для получения кривой разгона использовалась динамическая модель изменения температуры по времени в циркуляционном контуре. Модель основана на экспериментальных данных. Кривая разгона представлена на рисунке 5.1.1.

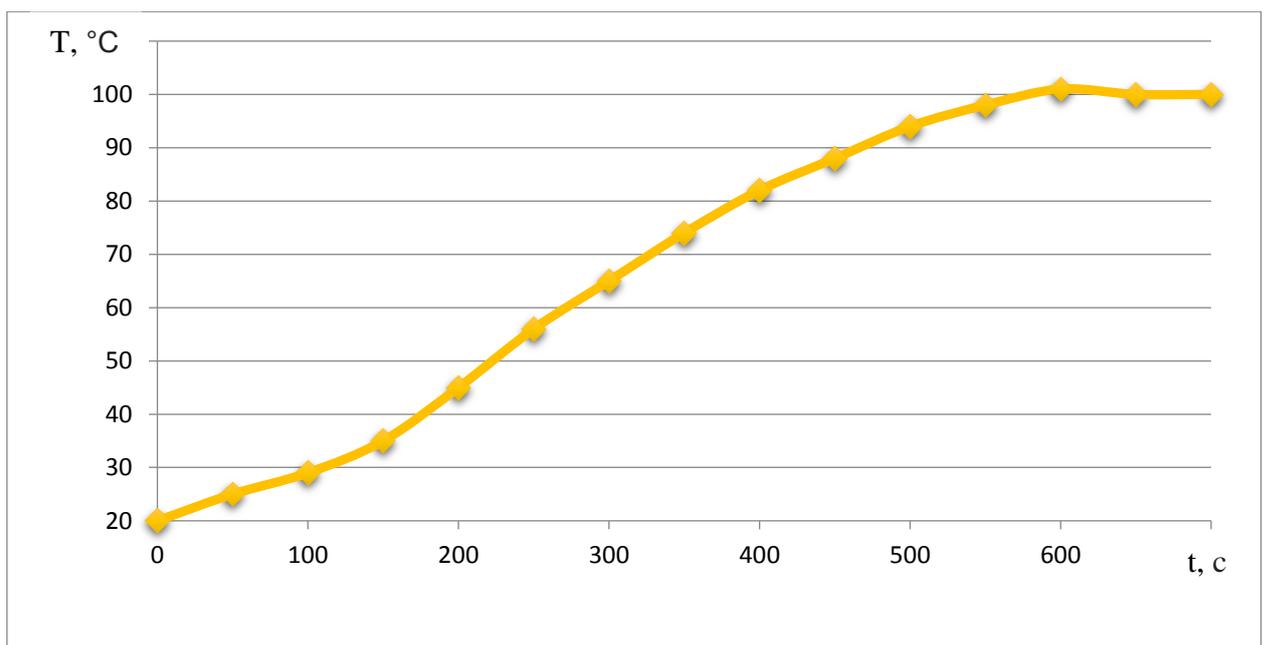


Рисунок 5.1.1 – Кривая разгона для объекта управления

Далее необходимо определить динамические параметры объекта управления: постоянная времени  $T$ ; запаздывание объекта  $\tau$ ; коэффициент передачи объекта  $K$ .

Для кривой разгона передаточная функция представляет собой апериодическое звено с запаздыванием:

$$W(P) = \frac{k}{(TP+1)} e^{-P\tau}, \quad (5.1.1)$$

где  $k$  – коэффициент передачи объекта;

$P$  – оператор Лапласа;

$\tau$  – время запаздывания;

$T$  – постоянная времени.

Решение уравнения 8.1.1 при нулевых начальных условиях представлено формулой 8.1.2.

$$\begin{cases} h(t) = 0 & 0 \leq t \leq \tau, \\ h(t) = h(\infty) \left[ 1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right] & t > \tau. \end{cases} \quad (5.1.2)$$

Получаем два неизвестных значения времени запаздывания  $\tau$  и постоянную времени  $T$ .

В итоге получается два неизвестных значения: время запаздывания  $\tau$  и постоянная времени  $T$ . На кривой разгона строятся две точки А и Б. Точка А определяется как  $0,33k$ , а точка Б определяется как  $0,7k$ . Время запаздывания  $\tau$  и постоянная времени  $T$  определяются по формулам:

$$T = -\frac{t_A - \tau}{\ln(1 - h_A)}, \quad (5.1.3)$$

$$\tau = \frac{t_B \ln(1 - h_A) - t_A \ln(1 - h_B)}{\ln(1 - h_A) - \ln(1 - h_B)}, \quad (5.1.4)$$

где  $t_A$  и  $t_B$  – значения времени для точек А и Б на кривой;

$h_A$  и  $h_B$  – значения ординат для точек А и Б на кривой.

Далее необходимо определить расположение точек А и Б на кривой и найти необходимые параметры.

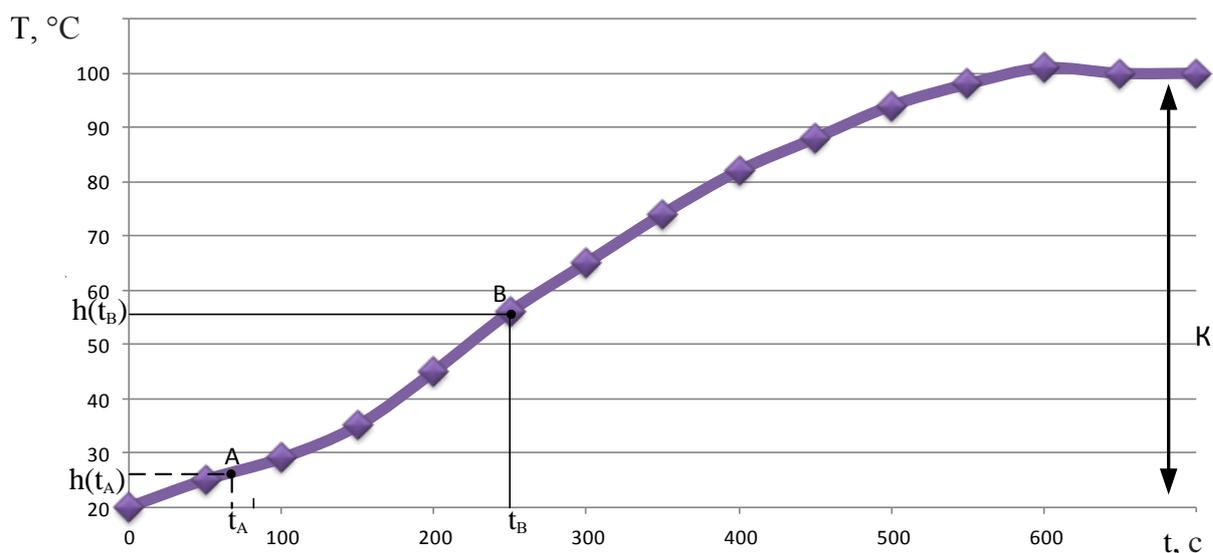


Рисунок 5.1.2 – Определение точек А и Б на кривой разгона

Для точности производится расчет по интерполяционному методу Ормана. Постоянная времени  $T$  и время запаздывания  $\tau$  вычисляются по формулам:

$$\tau = 0,5(3t_A - t_B), \quad (5.1.5)$$

$$T = 1,25(t_B - t_A). \quad (5.1.6)$$

Определяем значения  $t_A$  и  $t_B$  по кривой разгона и получаем:

$$\tau = 0,5(3 \cdot 90 - 250) = 10 \text{ с},$$

$$T = 1,25(250 - 90) = 200 \text{ с}.$$

Передаточная функция имеет вид:

$$W(P) = \frac{80}{(200P+1)} e^{-10P}, \quad (5.1.7)$$

## 5.2 Определение оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора

Структурная схема системы регулирования имеет вид:

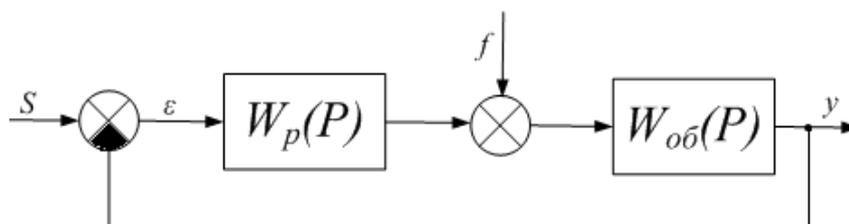


Рисунок 5.2.1 – Структурная схема системы регулирования

Требуемая степень затухания должна быть  $\psi = 0,8$ . Существует зависимость между степенью затухания переходных процессов в заданной системе регулирования  $\psi$  и степенью колебательности переходных процессов в заданной системе регулирования  $m$ , можно определить значение заданной степени колебательности  $m$  по форму

$$m = -\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(1 - \psi) = -\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(1 - 0,8) = 0,256. \quad (5.2.1)$$

Передаточная функция имеет вид:

$$W(P) = \frac{80}{(37P+1)} e^{-11,6P}. \quad (5.2.2)$$

Далее необходимо определить расширенные частотные характеристики объекта регулирования (таблица 5.2.1). Расширенные частотные характеристики какого-либо звена можно получить подстановкой в передаточную функцию этого звена  $W(P)$  оператора  $p = -m \cdot \omega + i \cdot \omega$  или  $p = -\eta + i \cdot \omega$ , в выражениях для оператора Лапласа, где  $\omega$  – частота,  $c^{-1}$ . Расчётные формулы метода обеспечивают получение границы заданной степени колебательности системы  $m$  в пространстве параметров настройки регулятора.

Используя программу MathCad, предварительно задав начальное значение частоты  $\omega = 0 \text{ c}^{-1}$  и шаг по частоте  $\Delta\omega = 0.0005 \text{ c}^{-1}$ , рассчитываются расширенные частотные характеристики объекта при изменении частоты до  $\omega = 0,01 \text{ c}^{-1}$ . Полученные расширенные частотные характеристики объекта представлены в таблице 17 в виде листинга расчета.

Таблица 17 – Расширенные частотные характеристики объекта регулирования

| Частота $\omega, \text{ c}^{-1}$ | $\text{Re}_{об}(m, \omega)$ | $\text{Im}_{об}(m, \omega)$ | $A_{об}(m, \omega)$ |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 0.0009                           | 82.70137                    | -16.70943                   | 84.373              |
| 0.005                            | 33.89549                    | -59.88591                   | 68.813              |
| 0.0091                           | 4.03674                     | -44.51612                   | 44.699              |
| 0.0132                           | -3.78204                    | -31.57467                   | 31.8                |
| 0.0173                           | -6.07224                    | -23.79757                   | 24.56               |

Продолжение таблицы 17

| Частота $\omega$ , $\text{с}^{-1}$ | $\text{Re}_{06}(m, \omega)$ | $\text{Im}_{06}(m, \omega)$ | $A_{06}(m, \omega)$ |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 0.0214                             | -6.78849                    | -18.85485                   | 20.04               |
| 0.0255                             | -6.97405                    | -15.47886                   | 16.977              |
| 0.0296                             | -6.96141                    | -13.03286                   | 14.776              |
| 0.0337                             | -6.87231                    | -11.17663                   | 13.12               |
| 0.0378                             | -6.75559                    | -9.71528                    | 11.833              |
| 0.0419                             | -6.63184                    | -8.53022                    | 10.805              |
| 0.046                              | -6.50976                    | -7.54549                    | 9.966               |
| 0.0501                             | -6.39282                    | -6.7104                     | 9.268               |
| 0.0542                             | -6.28205                    | -5.98987                    | 8.68                |
| 0.0583                             | -6.17742                    | -5.35893                    | 8.178               |
| 0.0624                             | -6.07837                    | -4.79932                    | 7.745               |
| 0.0665                             | -5.98417                    | -4.29741                    | 7.367               |
| 0.0706                             | -5.89406                    | -3.84283                    | 7.036               |
| 0.0747                             | -5.80727                    | -3.42756                    | 6.743               |
| 0.0788                             | -5.72311                    | -3.04531                    | 6.483               |
| 0.0829                             | -5.64094                    | -2.69109                    | 6.25                |
| 0.087                              | -5.5602                     | -2.36087                    | 6.041               |
| 0.0911                             | -5.48037                    | -2.05141                    | 5.852               |
| 0.0952                             | -5.40102                    | -1.76004                    | 5.681               |
| 0.0993                             | -5.32173                    | -1.48456                    | 5.525               |
| 0.1034                             | -5.24216                    | -1.22317                    | 5.383               |
| 0.1075                             | -5.162                      | -0.97434                    | 5.253               |
| 0.1116                             | -5.08097                    | -0.7368                     | 5.134               |
| 0.1157                             | -4.99882                    | -0.50948                    | 5.025               |
| 0.1198                             | -4.91536                    | -0.29148                    | 4.924               |
| 0.1239                             | -4.83038                    | -0.08203                    | 4.831               |
| 0.128                              | -4.74372                    | 0.11951                     | 4.745               |

Далее необходимо рассчитать параметры настройки ПИ-регулятора. ПИ-регулятор является наиболее распространенным на практике, который обладает следующими достоинствами:

- 1) обеспечивает нулевую статическую ошибку регулирования;
- 2) достаточно прост в настройке, т. к. настраиваются только два параметра, а именно коэффициент усиления  $K_p$  и постоянная интегрирования  $T_i$ , обеспечивает управление с минимально возможной среднеквадратичной ошибкой регулирования;
- 3) малая чувствительность к шумам в канале измерения (в отличии от ПИД-регулятора).

Параметры настройки ПИ-регулятора рассчитываются по форму

$$\frac{K_p}{T_u} = - \frac{\omega \cdot (m^2 + 1) \cdot Im_{o6}(m, \omega)}{A_{o6}^2(m, \omega)}, \quad (5.2.3)$$

$$K_p = - \frac{m \cdot Im_{o6}(m, \omega) + Re_{o6}(m, \omega)}{A_{o6}^2(m, \omega)}, \quad (5.2.4)$$

где  $T_u$  – постоянная интегрирования регулятора,

$K_p$  – коэффициент передачи регулятора.

Задав диапазон изменения частоты  $\omega = 0 \div 0,13 \text{ с}^{-1}$  с шагом  $\Delta\omega = 0,005 \text{ с}^{-1}$ , необходимо определить настройки регулятора  $\frac{K_p}{T_u}$  и  $K_p$  в заданном диапазоне частот. Полученные значения представлены в таблице 18 в виде листинга расчета.

Таблица 18 – Результаты расчёта настройки ПИ - регулятора

| $\omega, \text{ с}^{-1}$ | $K_p$      | $\frac{K_p}{T_u}$ |
|--------------------------|------------|-------------------|
| 0.0009                   | 0.0000024  | -0.01076          |
| 0.005                    | 0.00007171 | -0.00253          |
| 0.0091                   | 0.00022991 | 0.00613           |
| 0.0132                   | 0.00046735 | 0.01517           |
| 0.0173                   | 0.00077396 | 0.02451           |
| 0.0214                   | 0.00113933 | 0.03409           |
| 0.0255                   | 0.00155286 | 0.04385           |

Продолжение таблицы 18

| $\omega, \text{с}^{-1}$ | $K_p$             | $\frac{K_p}{T_u}$ |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| 0.0296                  | 0.00200374        | 0.05374           |
| 0.0337                  | 0.00248108        | 0.06368           |
| 0.0378                  | 0.00297398        | 0.07364           |
| 0.0419                  | 0.00347159        | 0.08355           |
| 0.046                   | 0.00396317        | 0.09336           |
| 0.0501                  | 0.00443814        | 0.10302           |
| 0.0542                  | 0.0048862         | 0.11248           |
| 0.0583                  | 0.00529731        | 0.12169           |
| 0.0624                  | 0.00566179        | 0.13063           |
| 0.0665                  | 0.00597036        | 0.13923           |
| 0.0706                  | 0.00621417        | 0.14746           |
| 0.0747                  | 0.00638488        | 0.1553            |
| <b>0.0788</b>           | <b>0.00647466</b> | <b>0.16269</b>    |
| 0.0829                  | 0.00647623        | 0.16962           |
| 0.087                   | 0.00638292        | 0.17606           |
| 0.0911                  | 0.00618868        | 0.18197           |
| 0.0952                  | 0.00588807        | 0.18734           |
| 0.0993                  | 0.00547637        | 0.19214           |
| 0.1034                  | 0.00494948        | 0.19636           |
| 0.1075                  | 0.00430404        | 0.19998           |
| 0.1116                  | 0.00353736        | 0.20299           |
| 0.1157                  | 0.00264748        | 0.20538           |
| 0.1198                  | 0.00163315        | 0.20713           |
| 0.1239                  | 0.00049383        | 0.20825           |
| 0.128                   | -0.00077034       | 0.20873           |

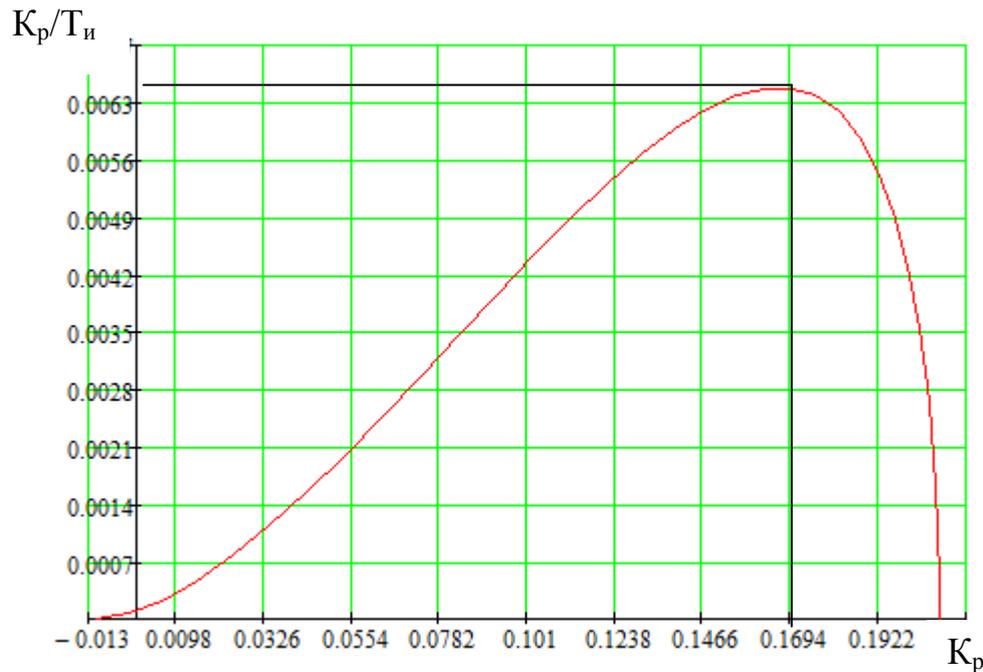


Рисунок 5.2.2 – Область параметров настройки ПИ – регулятора

В качестве критерия качества используется первая интегральная оценка. Минимальное значение этой оценки соответствует точке с максимальным значением соотношения  $K_p/T_i$  на линии заданного запаса устойчивости.

Из таблицы 18 определяем:

$$\max \left( \frac{K_p}{T_u} \right) = 0.00647466, \quad K_p = 0.16269, \quad \text{резонансная частота } \omega = 0.0788 \text{ с}^{-1}.$$

Определяем значение постоянной интегрирования:

$$T_u = \frac{K_p}{K_p/T_u} = 25,127. \quad (5.2.5)$$

Произведем оценку качества переходного процесса в замкнутой системе при возмущении, которое идет по каналу регулирующего воздействия.

Передаточная функция будет иметь вид:

$$W(P) = \frac{W_{об}(P) \cdot W_p(P)}{1 + W_{об}(P) \cdot W_p(P)}, \quad (5.2.6)$$

где  $W_p(P)$  – передаточная функция регулятора;

$W_{об}(P)$  – передаточная функция объекта.

Переходный процесс, протекающий в замкнутой системе по каналу задающего воздействия рассчитывается по методу трапеций. Чтобы рассчитать переходный процесс, необходимо определить вещественную частотную характеристику системы. На рисунке 5.2.3 представлен график вещественной частотной характеристики.

Переходная характеристика системы связана с вещественно частотной характеристикой системы выражением:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{Re(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d\omega, \quad (5.2.7)$$

где  $Re(\omega)$  – вещественная частотная характеристика системы;

$\omega$  – частота;

$t$  – продолжительность переходного процесса системы.

Для достижения точности в расчете в качестве верхнего предела интеграла применяется не бесконечность, а значение, при котором значение вещественной частотной характеристики системы стремится к 0. Из рисунка 10 определяем это значение.

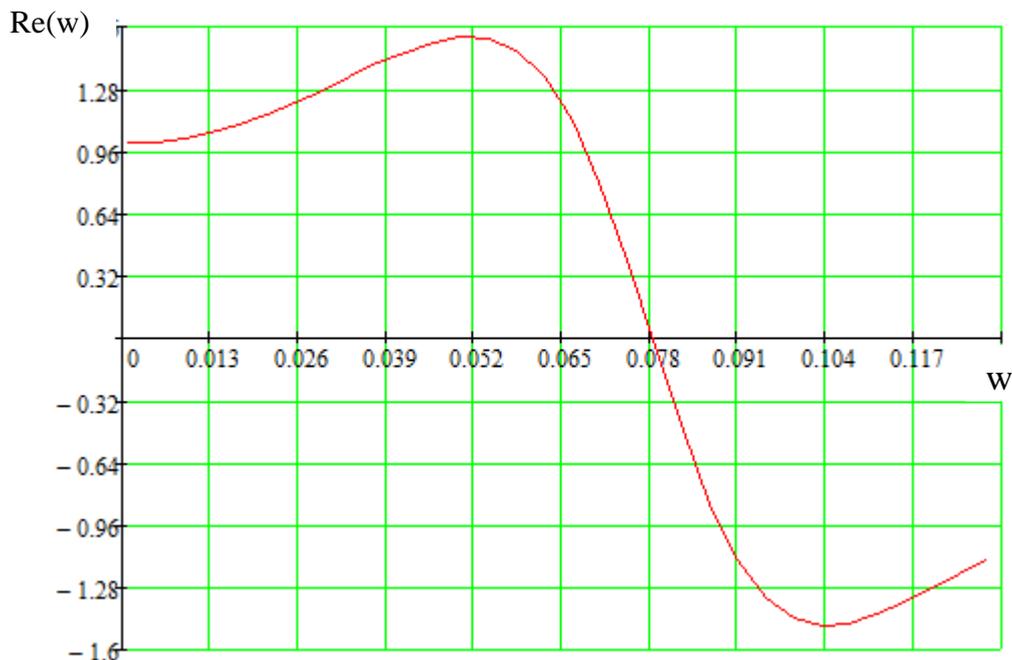


Рисунок 5.2.3 – Графическое представление вещественно частотной характеристики системы

Конечный вид уравнения для определения переходного процесса системы имеет вид:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{0,78} \frac{Re(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d\omega, \quad (5.2.8)$$

На рисунке 5.2.4 представлен переходный процесс замкнутой системы по каналу задающего воздействия. С помощью этого переходного процесса была произведена оценка качества регулирования. Данная оценка позволит сделать вывод о том, насколько система удовлетворяет предъявленным требованиям, при предъявленных к системе ограничениях.

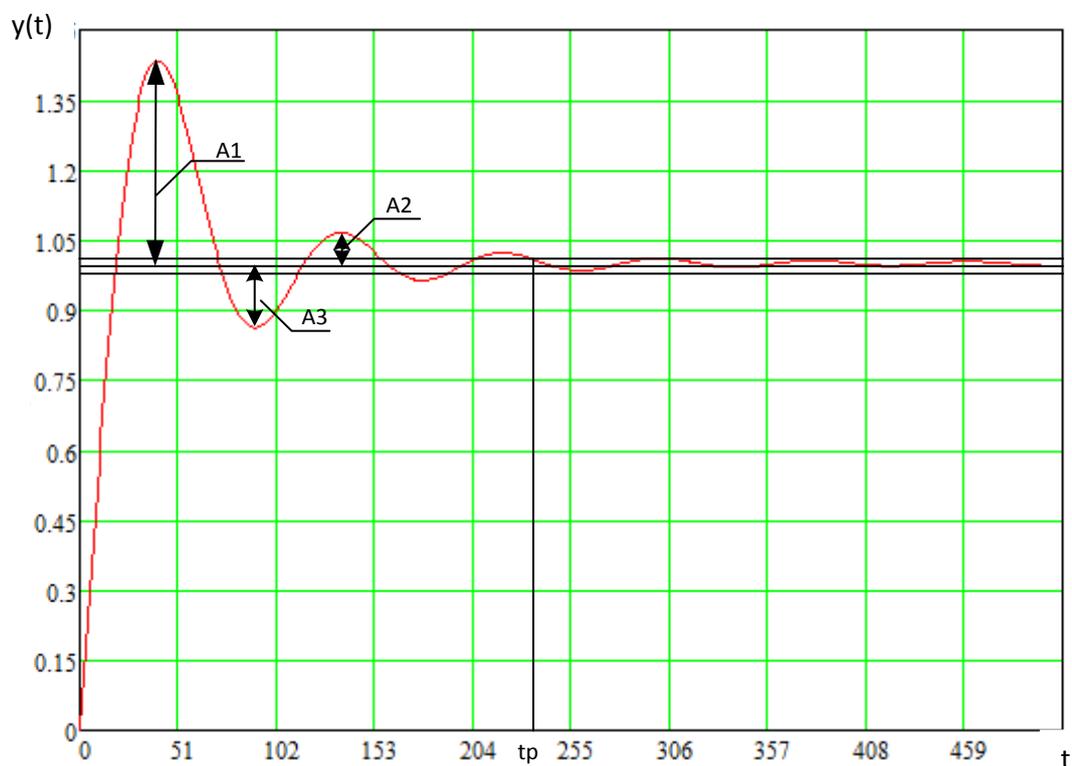


Рисунок 5.2.4- Переходный процесс в системе по каналу задающего воздействия

Используя график определяются прямые оценки качества:

а) максимальная динамическая ошибка:  $A_1=0,425$ ;

б) перерегулирование:  $\sigma = \frac{A_3}{A_1} \cdot 100\% = \frac{0,138}{0,425} \cdot 100\% = 32,47\%$ ,

где  $A_3 = 0,138$  - первое минимальное отклонение регулируемой величины;

в) динамический коэффициент регулирования  $R_{д}$ :

$$R_d = \frac{A_1 + y(\infty)}{K_{об}} \cdot 100\% = \frac{0,425 + 1}{80} \cdot 100\% = 1,78\%, \quad (5.2.9)$$

где  $K_{об} = 80$  - коэффициент передачи объекта;

г) степень затухания переходного процесса:

$$\psi = 1 - \frac{A_2}{A_1} = 1 - \frac{0,06}{0,425} = 0,86, \quad (5.2.10)$$

где  $A_2 = 0,06$  - второй максимальный выброс регулируемой величины;

д) статическая ошибка:  $\varepsilon_{СТ} = y(\infty) = 0$ ;

е) время регулирования:  $t_p = 232$  с.

## 6 Мнемосхема проекта

Мнемосхема представляет собой графическую информационную модель, условно отображающую функционально-техническую схему управляемого объекта и информацию о его состоянии в объеме, необходимом для выполнения оператором возложенных на него функций. Мнемосхемы реализуются с помощью разных типов средств отображения информации (дисплеи, стрелочные и цифровые индикаторы, проекционная техника и т. д.) и их комплексов. Широко используются на диспетчерских пунктах управления энергетическими объектами и системами, пунктах управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности.

К мнемосхемам предъявляют следующие требования.

- 1) Мнемосхема должна содержать только те элементы, которые необходимы оператору для контроля и управления объектом.
- 2) Отдельные элементы или группы элементов, наиболее существенные для контроля и управления объектом, на мнемосхеме должны выделяться размерами, формой, цветом или др. способами.
- 3) При компоновке должно быть обеспечено пространственное соответствие между расположением элементов на мнемосхеме и расположением органов управления на пульте управления.
- 4) Допускается размещение на поле мнемосхемы приборов контроля и органов управления, которые при этом не должны закрывать от оператора другие элементы. При компоновке должны учитываться привычные ассоциации оператора.
- 5) Соединительные линии на мнемосхеме должны быть сплошными, простой конфигурации, минимальной длины и иметь наименьшее число пересечений.
- 6) Следует избегать большого числа параллельных линий,

расположенных рядом. Форма и размеры панелей мнемосхемы должны обеспечивать оператору однозначное зрительное восприятие всех необходимых ему информационных элементов.

В соответствии с вышеизложенными требованиями была разработана мнемосхема системы контроля и управления параметрами циркуляционного контура. На основе результатов экспериментальных исследований, приведенных в разделе 2 данной работы, можно рассчитать силу аэродинамического сопротивления, действующую на объект обтекания, при различных значениях скорости воздушного потока, различных значениях плотности обтекаемого материала и формы объекта в контуре. Результаты позволили определить точное значение набегающего на объект воздуха, которое используется при расчете в мнемосхеме. Также на разработанной мнемосхеме присутствует индикатор работы системы и показывающие окна измеряемых температуры и скорости воздушного потока. Разработанная мнемосхема приведена на рисунке 6.1.

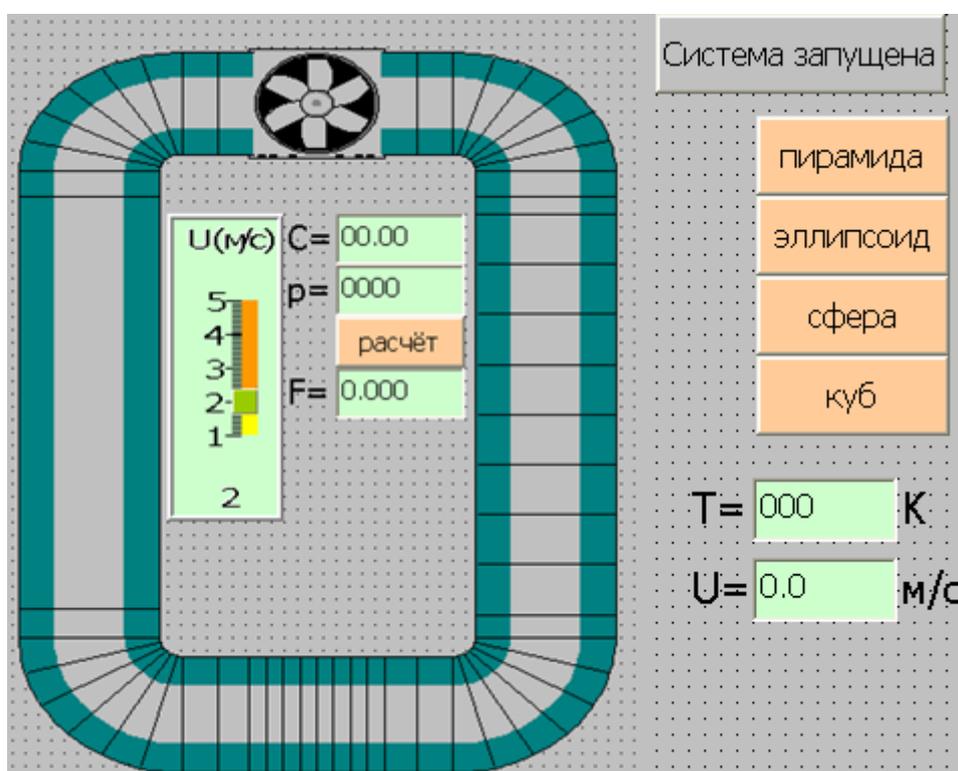


Рисунок 6.1 – Мнемосхема системы контроля и управления параметрами циркуляционного контура

На данной мнемосхеме условно изображен циркуляционный контур. Мнемосхема используется для расчета силы аэродинамического сопротивления, действующей на объект обтекания. Для осуществления расчета необходимо задать значения: скорость воздушного потока, обтекающего фигуру, плотность материала, из которого состоит объект. Также, на выбор предоставляется четыре типа фигуры объекта: пирамидальная, эллипсоидальная, сферическая и кубическая. Для данных вариантов автоматически вносится в условие расчета соответствующий коэффициент аэродинамического сопротивления  $C$ . Если требуется произвести расчет для другого типа фигуры, то значение  $C$  можно внести вручную в соответствующее поле. Примеры расчета для различных фигур представлены на рисунках 6.2 и 6.3.

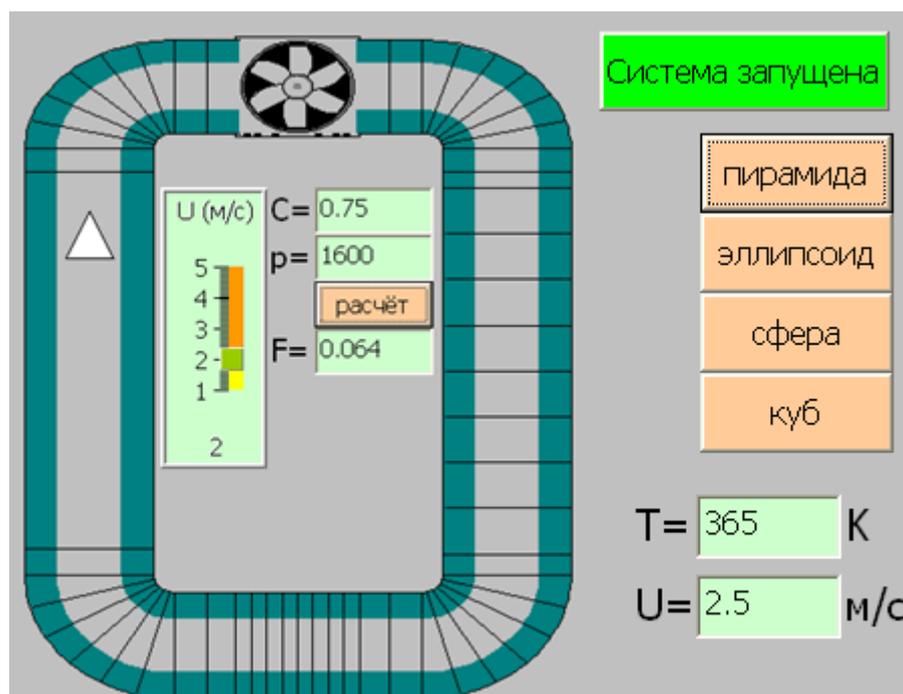


Рисунок 6.2 – Мнемосхема системы контроля и управления параметрами циркуляционного контура, при пирамидальной форме обтекаемой частицы, скорости воздушного потока 2,5 м/с и плотности материала  $1600 \text{ кг/м}^3$

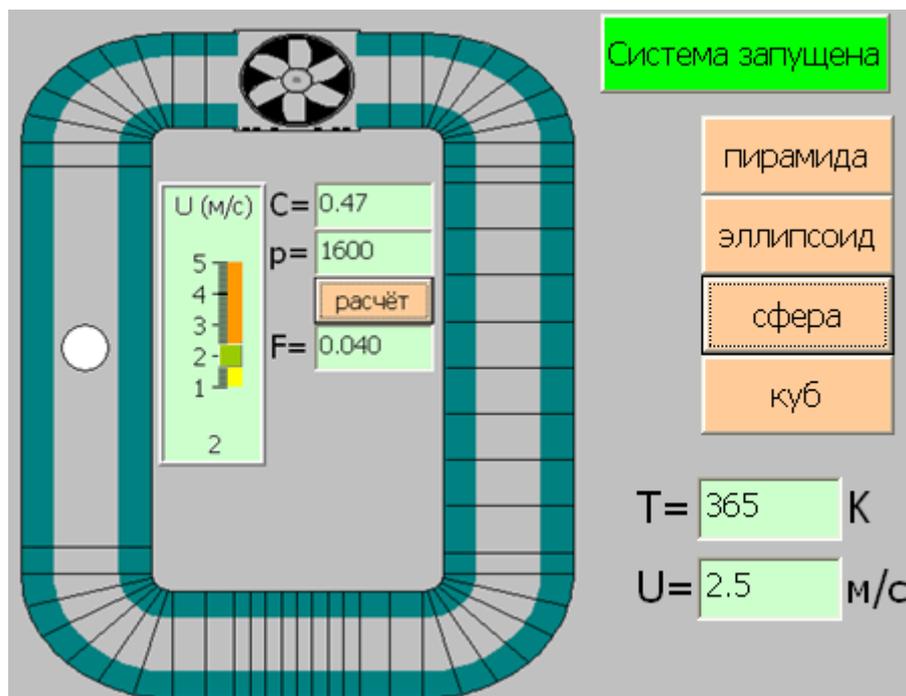


Рисунок 6.3 – Мнемосхема системы контроля и управления параметрами циркуляционного контура, при сферической форме обтекаемой частицы, скорости воздушного потока 2,5 м/с и плотности материала 1600 кг/м<sup>3</sup>

В данном разделе работы была произведена разработка мнемосхемы системы контроля и управления параметрами циркуляционного контура.

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

Студенту:

|               |                              |
|---------------|------------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                   |
| 5Б3В          | Осмоловская Мария Михайловна |

|                            |             |                                  |                                |
|----------------------------|-------------|----------------------------------|--------------------------------|
| <b>Институт</b>            | <b>ЭНИН</b> | <b>Кафедра</b>                   | <b>АТП</b>                     |
| <b>Уровень образования</b> | Бакалавриат | <b>Направление/специальность</b> | Теплоэнергетика и теплотехника |

|   |  |
|---|--|
| <b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>   |  |
| 1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> | <i>Тариф на электроэнергию 2,36 руб.</i>     |
| 2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>                                  | <i>Отчисление в социальные фонды 30 %</i>    |
| <b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>   |  |
| 1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>   | <i>Перечень работ и оценка их выполнения</i> |
| 2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>  | <i>Смета затрат на проект</i>                |
| 3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>          | <i>Смета затрат на оборудование</i>          |
| <b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>  |  |
| 1. <i>График проведения НИ</i>  |  |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|---|--|

**Задание выдал консультант:**

|   |                              |                               |                |             |
|---|------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b>                          | <b>ФИО</b>                   | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Старший преподаватель кафедры менеджмента | Кузьмина Наталия Геннадьевна |                               |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |                              |                |             |
|---------------|------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                   | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 5Б3В          | Осмоловская Мария Михайловна |                |             |

## 7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью написания данного раздела выпускной квалификационной работы является расчет разработки автоматизированной системы контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом диагностики быстропротекающих процессов.

Для выполнения данной цели необходимо:

- 1) составить перечень работ и оценить время их выполнения;
- 2) составить смету затрат на проект;
- 3) составить смету затрат на оборудование и монтажные работы для реализации проекта.

### 7.1 Перечень работ и оценка времени выполнения

В таблице 19 представлены все виды выполняемых работ и время, затраченное на их выполнение.

Таблица 19 – Перечень работ и сроки их выполнения

| Наименование работ  | Количество исполнителей | Продолжительность, дни |
|---|-------------------------|------------------------|
| Получение задания   | Научный руководитель;   | 1                      |
|   | Инженер                 | 1                      |
| Обзор мировой литературы, связанной с обтеканием тел и оптическими методами диагностики                       | Инженер                 | 9                      |
| Проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение процессов обтекания тел воздушным потоком | Научный руководитель;   | 5                      |
|   | Инженер                 | 27                     |
| Анализ результатов исследования   | Инженер                 | 6                      |

Продолжение таблицы 19

|   |                       |    |
|---|-----------------------|----|
| Разработка функциональной и структурной схем, подбор оборудования                   | Инженер               | 15 |
| Разработка щита управления САУ  | Научный руководитель; | 4  |
|   | Инженер               | 13 |
| Разработка схемы взаимодействия уровней управления                                  | Инженер               | 1  |
| Проектирование мнемосхемы   | Инженер               | 10 |
| Написание раздела «Социальная ответственность»                                      | Инженер               | 6  |
| Написание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» | Инженер               | 6  |
| Оформление пояснительной записки ВКР  | Инженер               | 11 |
| Итого   | Инженер               | 94 |
|   | Научный руководитель  | 10 |

По данным таблицы 19 построен график проведения работ, представленный на рисунке 7.1.

Диаграмма Гантта – это популярный тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации плана, графика работ по какому-либо проекту. Является одним из методов планирования проектов. Используется в приложениях по управлению проектами.

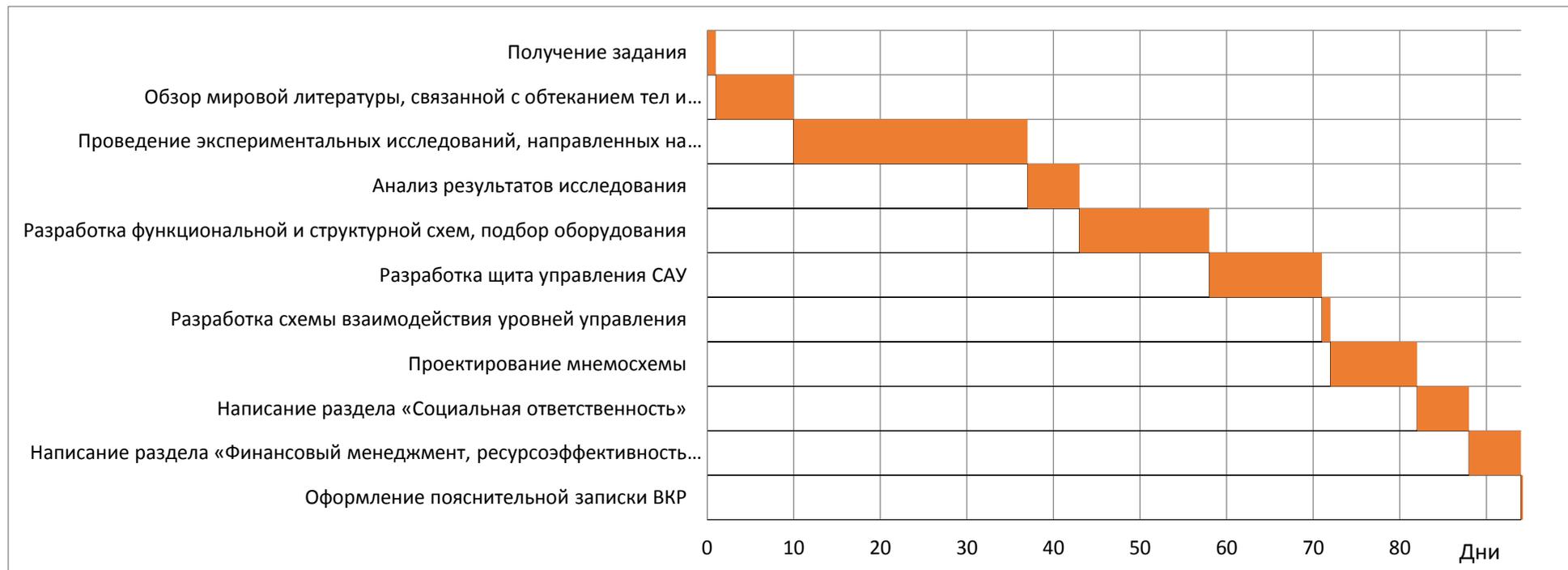


Рисунок 7.1 – График проведения НИ

## 7.2 Смета затрат на проект

Затраты на выполнение проекта рассчитываются в рублях по формуле:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{с.о}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{накл}}, \quad (7.1)$$

где  $K_{\text{мат}}$ - материальные затраты;

$K_{\text{ам}}$ -амортизация компьютерной техники;

$K_{\text{з/пл}}$ - затраты на заработную плату;

$K_{\text{с.о}}$ - затраты на социальные нужды;

$K_{\text{пр}}$ - прочие затраты;

$K_{\text{накл}}$ - накладные расходы.

### 7.2.1 Материальные затраты

Под материальными затратами понимается величина денежных средств, потраченных на канцелярские товары. Величину затрат принимаем 1000 руб.

### 7.2.2 Затраты на амортизацию

Амортизация оборудования – постепенный перенос стоимости основной части финансов организации и ее активов нематериального значения по уровню их морального и физического износа на итоговую цену выпускаемых товаров.

Амортизация компьютерной техники рассчитывается в руб./год как:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \quad (7.2)$$

где  $T_{\text{исп.кт}}$ - время использования компьютерной техники;

$T_{\text{кал}}$ - календарное время;

$C_{\text{кт}}$ - цена компьютерной техники;

$T_{\text{сл}}$ - срок службы компьютерной техники.

$$K_{\text{ам}} = \frac{94}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1773,58 \text{ руб./год.}$$

### 7.2.3 Затраты на заработную плату

Заработная плата – это вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также выплаты компенсационного и стимулирующего характера.

Затраты на заработную плату рассчитываются в рублях как:

$$K_{з/пл} = ЗП_{инж}^{\phi} + ЗП_{нр}^{\phi}, \quad (7.3)$$

где  $ЗП_{инж}^{\phi}$  - фактическая заработная плата инженера;

$ЗП_{нр}^{\phi}$  - заработная плата научного руководителя.

Месячный оклад:

$$ЗП_{инж}^M = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.};$$

$$ЗП_{нр}^M = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 26300 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 37609 \text{ руб.},$$

где  $ЗП_{инж}^M$  – месячная заработная плата инженера;

$ЗП_{нр}^M$  – месячная заработная плата научного руководителя;

$ЗП_0$  – месячный оклад (инженер 17000 руб., научный руководитель 26300 руб.);

$K_1$  – коэффициент, учитывающий отпуск, равен 1,1 (10%);

$K_2$  – районный коэффициент равен 1,3 (10%).

Фактическая заработная плата рассчитывается в рублях:

$$ЗП_{\phi} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n^{\phi}, \quad (7.4)$$

где  $ЗП_{мес}$  – месячная заработная плата;

21 – среднее число рабочих дней в месяце;

$n^{\phi}$  – фактическое число дней в проекте.

Инженер:  $ЗП_{инж}^{\phi} = \frac{17000}{21} \cdot 94 = 76095,24 \text{ руб.}$

Научный руководитель:  $ЗП_{нр}^{\phi} = \frac{26300}{21} \cdot 9 = 11271,42 \text{ руб.}$

$$K_{з/пл} = 76095,24 + 11271,42 = 87366,66 \text{ руб.}$$

#### 7.2.4 Затраты на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды – обязательные отчисления по нормам, установленным законодательством государственного социального страхования в Фонд социального страхования РФ, Пенсионный фонд РФ, фонды обязательного медицинского страхования от затрат на оплату труда работников по элементу «Затраты на оплату труда» (кроме тех видов оплаты, на которые страховые взносы не начисляются).

Плательщиками страховых взносов являются:

- 1) организации;
- 2) индивидуальные предприниматели;
- 3) физические лица.

Затраты на социальные нужды принимаются как 30 % от затрат на заработную плату.

$$K_{\text{соц/н}} = K_{\text{з/пл}} \cdot 0,3, \quad (7.5)$$

$$K_{\text{соц/н}} = 87366,66 \cdot 0,3 = 26209,99 \text{ руб.}$$

#### 7.2.5 Прочие затраты

Прочие затраты принимаются как 10 % от суммы материальных затрат, амортизационных отчислений, затрат на заработную плату и затрат на социальные нужды.

$$K_{\text{пр}} = (K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{соц/н}}) \cdot 0,1, \quad (7.6)$$

$$\begin{aligned} K_{\text{пр}} &= (1000 + 1773,58 + 87366,66 + 26209,99) \cdot 0,1 = \\ &= 11635,02 \text{ руб.} \end{aligned}$$

#### 7.2.6 Накладные расходы

Накладные расходы – расходы на хозяйственное обслуживание лаборатории и управление процессом экспериментов, являющиеся дополнительными к основным затратам и наряду с ними включаемые в издержки производства.

Накладные расходы принимаются в размере 200 % от затрат на заработную плату.

$$K_{\text{накл}} = K_{\text{з/пл}} \quad (7.7)$$

$$K_{\text{накл}} = 87366,66 \cdot 2 = 174733,32 \text{ руб.}$$

В таблице 20 представлена смета затрат на проект.

Таблица 20 – Смета затрат на проект

| Элементы затрат                  | Стоимость, руб. |
|----------------------------------|-----------------|
| Материальные затраты             | 1000            |
| Амортизация компьютерной техники | 1773,58         |
| Затраты на заработную плату      | 87366,66        |
| Затраты на социальные нужды      | 26209,99        |
| Прочие затраты                   | 11635,02        |
| Накладные расходы                | 174733,32       |
| Итого                            | 302718,57       |

### 7.3 Смета затрат на оборудование и монтажные работы

В таблице 21 представлен перечень используемого оборудования в проекте и его стоимость.

Таблица 21 – Затраты на оборудование

| Наименование                      | Стоимость, руб. | Кол-во, шт. |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|
| ПЛК63 ОВЕН                        | 12390           | 1           |
| Нихромовая проволока 1 м          | 1295            | 1           |
| VENTS (ТТ 125)                    | 1440            | 1           |
| Датчики температуры (ТП-1388)     | 1556            | 2           |
| Нормирующий преобразователь НПП-1 | 3363            | 2           |
| Анемометр LA-14680                | 4860            | 1           |

Продолжение таблицы 21

|                              |       |    |
|------------------------------|-------|----|
| Регулятор скорости SB033     | 3600  | 2  |
| Регулятор напряжения PQT-160 | 26000 | 1  |
| Провод ПВС 1x1,0             | 80    | 1  |
| Провод КРВГ 4x1              | 256   | 1  |
| Провод КРВГ 9x1              | 400   | 1  |
| Провод АКРВБГ 4x2.5          | 1500  | 1  |
| Компьютер                    | 25000 | 1  |
| Датчик движения ИЕК ДД 009   | 450   | 1  |
| Концевой выключатель         | 90    | 2  |
| Итого                        | 65869 | 18 |

Затраты на монтажные работы, транспортировку и демонтаж оборудования составляют 20 % от суммы затрат на технические средства и рассчитываются в рублях:

$$I_{\text{монт}} = 0,2 \cdot I_{\text{обор}}, \quad (7.8)$$

где  $I_{\text{обор}}$  - затраты на оборудование;

$$I_{\text{монт}} = 0,2 \cdot 65869 = 13173,8 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты на оборудование, монтажные работы и транспортировку:

$$I_{\text{итог}} = I_{\text{обор}} + I_{\text{монт}} = 65869 + 13173,8 = 79042,8 \text{ руб.}$$

В данном разделе выпускной квалификационной работы был проведен расчет проекта по созданию автоматизированной системы контроля и управления экспериментальным лазерным комплексом диагностики быстропротекающих процессов. В ходе выполнения были решены следующие задачи:

- 1) составлен перечень работ, произведена оценка сроков их выполнения;
- 2) составлена смета затрат на проект;
- 3) составлена смета затрат на оборудование и монтажные работы для реализации проекта;

Несмотря на достаточно высокие затраты для реализации данного проекта, такие как монтаж и покупка технических средств, автоматизация комплекса является очень целесообразной задачей. Так как повышается эффективность проведения экспериментов, снижается время настройки оборудования и, как следствие, появляется возможность проводить больше экспериментов и обучать большее количество студентов работе на данном лабораторном стенде.