

На правах рукописи

УДК 621.51/.54

Усс Александр Юрьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА И СОЗДАНИЕ ВИХРЕВОГО
СТРУЙНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ ГАЗА**

Специальность 05.04.06 – Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре вакуумной и компрессорной техники в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (национальном исследовательском университете)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Э5 «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана
Чернышев Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры 614 «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасность жизнедеятельности ЛА» ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)
Хаустов Александр Иванович

кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор отдела 12.01 АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»
Крутиков Алексей Александрович

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2022 г. в 14:30 на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5, стр.1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16
кандидат технических наук, доцент



О.В. Белова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время во многих областях практической деятельности человека широко используются запорно-регулирующие устройства (ЗРУ), предназначенные для управления параметрами рабочей среды (РС). ЗРУ в большинстве своем определяют надежность и безотказность работы пневмогидравлических систем, в составе которых они функционируют. Это объясняется, прежде всего, наличием в составе конструкции ЗРУ механически подвижных элементов, взаимодействующих с деталями и узлами конструкции. Такие элементы ЗРУ, как клапанные узлы, взаимодействуют с высокоскоростным потоком РС, под воздействием которого возможно частичное, а в некоторых случаях полное разрушение уплотнительного элемента. Использование существующих ЗРУ в пневмогидравлических системах, работающих с загрязненными, агрессивными и/или высокоэнергетическими РС (имеющими высокое давление и температуру) крайне затруднительно, а в некоторых случаях просто невозможно. Одним из вариантов повышения надежности работы ЗРУ является создания конструкций без подвижных элементов. В середине прошлого столетия в связи с активным развитием ракетно-космической и оборонной промышленности появились ЗРУ, принцип работы которых основан на газодинамических эффектах, таких как эффект Коанда, турбулизация потока РС и использовании вихревого течения РС. Технические средства, в которых для управления параметрами потока РС применены перечисленные процессы и эффекты, называют «Вихревые струйные устройства» (ВСУ). Вихревые струйные устройства представляют собой группу устройств: вихревые клапаны (открывающие или запирающие расход РС потока питания), вихревые дроссели (предназначенные для понижения давления РС), вихревые диоды (пропускающие РС в одном направлении и создающие гидравлическое сопротивление при прохождении РС в обратном направлении), и вихревые регулирующие устройства, выступающие в качестве исполнительного элемента в вихревых регуляторах давления или расхода РС. В данной работе под ВСУ подразумевается вихревое регулирующее устройство, предназначенное для управления расходом газа.

Актуальность разработки регулирующих устройств с применением принципа вихревого течения (ВТ) РС подтверждается множеством разработок подобных изделий в различных областях техники. Основными странами, где ведутся разработки ВСУ являются: Российская Федерация, Соединённые Штаты Америки, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии, Федеративная Республика Германия, Чешская Республика, Канада. ВСУ применяются для улучшения характеристик, а также для создания высоконадежных и компактных систем управления беспилотными и пилотируемыми летательными аппаратами как гражданского, так и специального назначения, которые могут выполнять свои функции при воздействии внешних факторов: перегрузок, вибраций, радиационных и электромагнитных воздействий. Анализ научно-технической литературы (НТЛ) подтвердил, что к перспективным областям применения ВСУ можно отнести ракетно-космическую и авиационную техни-

ку. В которых ВСУ применяются для управления тягой и вектором тяги силовых установок, управлением сервоприводом, системы наддува топливных баков, системы впрыска топлива в двигатели. В стендовом оборудовании перспективным является применение ВСУ для управления потоком газа в аэродинамических трубах. В ядерной энергетике ВСУ используются в основном в системах управления инертным газом, в системе аварийного охлаждения. В нефтегазовой отрасли ВСУ используются в системах ограничения притока нефти. Например, Норвежская фирма Turphonix создала регулирующую арматуру Turphoon® Valve System на основе вихревого течения РС, при этом проект стоимостью 12 млн. долларов оказался рентабельным. В жилищно-коммунальном хозяйстве (ЖКХ) и системах жизнеобеспечения ВСУ используются для управления сточными водами, в системах вентиляции. В гусеничных транспортных средствах и в технических средствах реабилитации ВСУ используются в системе активного демпфирования амортизаторов.

Основоположниками создания математических моделей (ММ) и методов расчета рабочих процессов, протекающих в рабочей полости (РП), а также внедрения ВСУ были Д.Ф. Хабарова, Е.К. Спиридонов, Л.А. Залманзон, И.В. Лебедев, В.Ф. Бугаенко, А.И. Эдельман, Д.Н. Попов. Из зарубежных исследователей и основоположников математических моделей можно выделить: Г.Г. Глетли, Р.Е. Бурса, Р.В. Уоррена, С.К. Тафта, П.А. Орнера, А.В. Рехтена, М. Шеделя. Предложенные ими ММ строились на ряде допущений: течение РС в ВК двухмерное, не учитывается влияние стенок РП, не учитывается вязкость РС, а также не учитывается взаимодействие и перемешивание потока управления (ПУ) с потоком питания (ПП). Рассмотренные ММ основаны на эмпирических зависимостях, которые на практике имеют ограниченную область применимости.

В связи с отсутствием методов расчета ВСУ, большинство из рассмотренных схем так и не было доведено до широкого практического применения. Существующие методы расчета, описанные в НТЛ, не позволяют определить необходимые для проектирования новых образцов ВСУ параметры рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ, такие как давление и расход РС потока управления, обеспечивающих запираение потока питания. С помощью известных методов невозможно определить: зависимость входных (давление и расход РС ПП) и выходных параметров РС (давление и расход РС на выходе) от параметров управления (давление и расход РС ПУ), влияние геометрии РП на изменение рабочего процесса, протекающего в РП ВСУ. Приведенные в НТЛ результаты сопоставления расчетно-теоретических с результатами экспериментальных значений параметров РС в РП ВСУ подтверждают необходимость дальнейшего развития методов расчета и создания ММ в приближении распределенных параметров РС, которая позволила бы рассчитывать и исследовать рабочий процесс, протекающий в РП ВСУ с учетом трения РС о стенки РП, а также вязкости и сжимаемости РС. Сложность газодинамических процессов, протекающих в РП ВСУ, не позволяет разработать их ММ в аналитическом виде, поэтому в работе с целью исследования рабочего процесса и верификации

ММ использованы численные и экспериментальные методы исследования рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ.

Целью работы является: разработать метод расчета и создать ВСУ для управления потоком газа.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Разработать классификацию рабочих полостей ВСУ, позволяющую на начальном этапе метода расчета ВСУ проводить обоснованный выбор, синтез новых рабочих полостей по конструктивным и функциональным признакам.

2. Разработать математическую модель течения РС внутри РП ВСУ, которая позволит определять распределение параметров РС (давления, температуры, плотности) РС во всем объеме расчетной области ВСУ, обеспечивающих изменение расхода ПП, вплоть до его запираания.

3. С использованием разработанной ММ течения РС внутри РП ВСУ провести расчетно-теоретические исследования. Получить распределения параметров РС (давления, скорости, температуры, плотности) во всем объеме РП ВСУ; определить параметры РС потока управления, обеспечивающие запираание потока питания.

4. Разработать экспериментальный стенд, создать экспериментальный образец ВСУ, методику проведения эксперимента, провести экспериментальные исследования изменения входных (давление и расход РС потока питания) и выходных (давление и расход РС на выходе из ВСУ) параметров РС от параметров РС потока управления (давление и расход потока управления). Провести верификацию ММ. Сформулировать метод расчета ВСУ.

5. Применить разработанный метод расчета ВСУ и математическую модель при проектировании ВСУ, проведении расчетно-теоретических и экспериментальных исследований параметров РС, протекающей в рабочих полостях ВСУ различных конфигураций.

6. Внедрить результаты работы.

Объектом исследования являются ВСУ, предназначенные для управления потоком газа.

Предметом исследования являются рабочие процессы, протекающие в РП ВСУ и определяющие их технические и эксплуатационные характеристики.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработана ММ течения РС в РП ВСУ в приближении распределённых параметров РС, применительно к созданной геометрии РП, позволяющая исследовать изменение давления, скорости, плотности и температуры РС во всем объеме РП ВСУ с целью определения функциональных параметров создаваемого устройства (такие как давление и расход РС потока управления обеспечивающих запираание потока питания), исследовать рабочие характеристики новых конструкций ВСУ, получать новые знания о рабочем процессе, протекающем внутри РП объекта исследования, проводить разработку новых образцов ВСУ в интерактивном режиме, а также повысить эффективность проектирования и сократить сроки их разработки.

2. Разработан метод расчета ВСУ, позволяющий: проектировать ВСУ на заданные газодинамические параметры; определять зависимость входных (давление и расход РС ПП) и выходных (давление и расход РС на выходе) параметров РС от параметров управления (давление и расход РС ПУ), а также от геометрических параметров РП ВСУ, который может быть использован при проектировании новых устройств, а также при модернизации и улучшения работы уже созданных.

3. Впервые получены результаты расчетно-теоретических исследований с использованием созданных метода расчета ВСУ и ММ рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ: распределение скорости, давления, плотности, температуры газа во всем объеме РП ВСУ, значение давления и расхода ПУ при которых обеспечивается запираение ПП.

Практическая ценность полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработана классификация ВСУ по конструктивным и функциональным признакам, позволяющая проводить синтез расчетной схемы ВСУ, генерировать новые технические решения, способствующая сокращению временных ресурсов на разработку нового устройства.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс, включающий в себя экспериментальный стенд и программное обеспечение, а также методику проведения экспериментального исследования. Проведены экспериментальные исследования характеристик и рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ, подтвердившие адекватность разработанной ММ течения РС в РП ВСУ.

3. Получены экспериментальные данные (номограммы зависимости расхода на выходе ВСУ от расхода управления при различных значениях давления питания и управления) которые могут быть использованы при создании новых ВСУ.

4. Создана методика определения газодинамических параметров (давление и расход) потока управления, при которых происходит запираение потока питания.

5. Разработанный стенд, методика проведения экспериментального исследования параметров рабочей среды, протекающей в РП ВСУ, а также результаты экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

6. Научные и практические результаты диссертационной работы внедрены в процессе проведения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работ при разработке активного гидропневмомодемпфера протеза коленного модуля в ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука».

7. Результаты диссертационной работы использованы в практической деятельности ООО НПФ «МКТ-АСДМ» (г. Курган) при разработке ЗРУ в виде: технических предложений по выполнению конструктивных схем, методик расчета и моделирования рабочих процессов гидропневмомеханических устройств и систем управления потоками; при разработке ЗРУ в системах регулирования пластового давления для нужд пожаротушения.

Достоверность полученных результатов экспериментальных исследований обеспечивается применением приборов, включенных в Государственный реестр средств измерения утвержденного типа. Достоверность результатов расчетно-теоретических исследований подтверждается использованием фундамен-

тальных законов физики, дифференциальных уравнений, прошедших верификацию (уравнение неразрывности, закон сохранения массы, закон сохранения количества движения, уравнение энергии), известных численных методов решения системы дифференциальных уравнений.

Теоретические исследования базируются на известных положениях в области расчетов пневматического оборудования, изложенных в работах И.Е. Идельчик, Л.Г. Лойцянский, Г.Н. Абрамович. Примененные подходы из теоретических основ рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ изложены в работах И.В. Лебедевым, Н.Н. Ивановым, В.Ф. Бугаенко, С.Л. Трескуновым, Г. Коуэном, Р.Т. Крониным. Достоверность результатов расчетно-теоретических исследований подтверждена результатами собственных экспериментальных исследований. Адекватность разработанной ММ подтверждена путем сравнения графиков зависимости расходов питания, управления и на выходе ВСУ от давления управления, графиков зависимости давления питания и на выходе ВСУ от давления управления, качественное представление распределения плотности внутри РП ВСУ, графиков распределения температуры вдоль радиуса ВК ВСУ, полученных в результате вычислительных и натурных экспериментов. Максимальное отклонение по расходу РС не превысило 14%, по давлению питания и на выходе не превысило 7%, по давлению управления не превысило 13%, по температуре не превысило 16%.

Положения, выносимые на защиту

Метод расчета ВСУ, а также ММ течения РС в РП ВСУ. Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований характеристик и рабочих процессов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 26 научных конференциях и конкурсах. Из особо значимых можно выделить: Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва 2014, 2016, 2017 гг.); Конкурс проектов в области информационных технологий «IT-прорыв» в энергетике (Москва 2017 г.); Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва 2015–2021 гг.); «Всероссийский инновационный конкурс» на базе НГТУ, (Новосибирск 2017 г.); Международная научно-техническая конференция молодежи ПАО «Транснефть», (Москва 2017 г.); Общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос», БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова (Санкт-Петербург 2018–2021 гг.); Всероссийская молодежная научно-практическая конференция и Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ «Орбита молодежи» (Санкт-Петербург 2019 г.); Конференция молодых учёных, «Фундаментальные и прикладные космические исследования», НОЦ ИКИ РАН (Москва 2019, 2021 гг.); Международная научно-техническая конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2019) (Москва 2019 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Ракетно-космические двигательные установки», (Москва, 2020 г.); Междуна-

родная конференция «Авиация и космонавтика», МАИ, (национальный исследовательский университет), (Москва 2020 г.); Академические чтения по космонавтике, МГТУ им. Н.Э. Баумана, (Москва 2021 г.); Международная научно-техническая конференция «Техники и технология нефтехимического и нефтегазового производства» «Oil and gas engineering», ФГБОУ ВО ОмГТУ, (Омск 2015–2021 гг.).

Экспериментальный образец ВСУ, экспериментальный стенд и результаты научной работы экспонировались на выставке: Всероссийская инновационная молодежная научно-инженерная выставка «Политехника» 2013, 2015–2017 гг.

Личный вклад автора заключается в разработке метода расчета ВСУ и ММ рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ, проведения расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, создании программно-аппаратного комплекса и методики проведения эксперимента, создании новой геометрии РП ВСУ с распределенной подачей питающего и управляющего потоков РС, а также с возможностью управления закруткой вихревого потока.

Научные работы. По материалам диссертации опубликовано 38 научных работ, в том числе 5 работ в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ по специальности 05.04.06 «Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы», 6 в изданиях, входящих в базу данных Scopus, общим объемом 22,541 п.л.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 169 страницах текста, включая 69 иллюстраций, 12 таблиц и приложение. Библиография насчитывает 120 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследования, сформулирована научная проблема, определены объект и предмет исследования.

В первой главе приведены общие сведения о состоянии вопроса исследования и разработки ВСУ. Проведен обзор областей применения данных устройств. Рассмотрены типовые схемы ВСУ: с сосредоточенной и распределенной по периферии ВК подачей РС, базовые схемы которых представлены на Рисунке 1, а также рассмотрен принцип их действия, преимущества и недостатки.

Основной принцип понижения расхода и давления в выходном патрубке ВСУ заключается во взаимодействии двух потоков: ПП с ПУ, образования ВТ РС и создании гидравлического сопротивления при вихревом движении РС от периферии вихревой камеры (ВК) к центру. В результате ВТ и создания поля центробежных сил, действующих на вращающуюся массу РС на периферии ВК создается повышенное давление РС, а в центре вихря – пониженное давление. Когда на периферии ВК давление РС становится равным давлению в канале питания (КП), расход из КП прекращается, такой эффект называется эффектом запираания ПП.

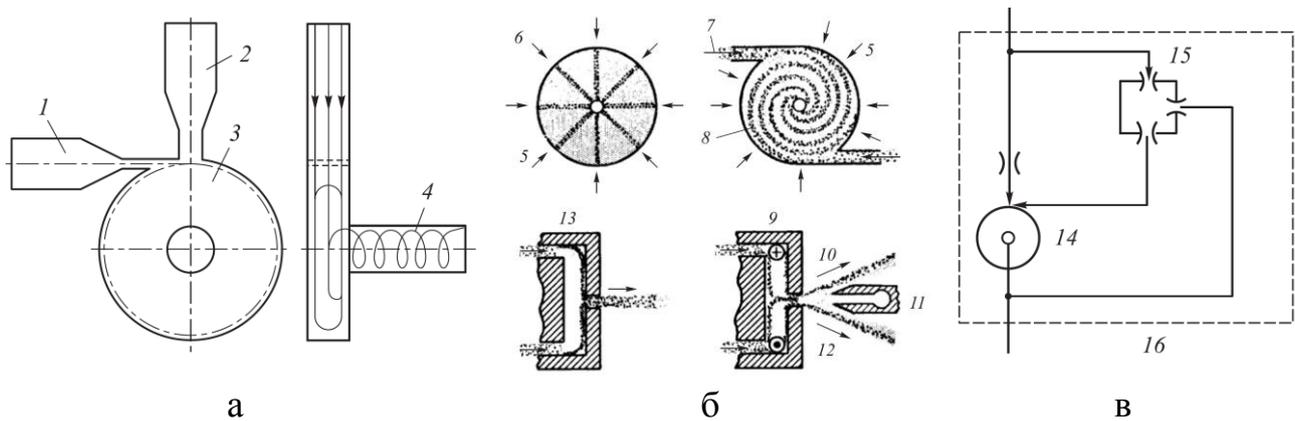


Рисунок 1. Схемы ВСУ с сосредоточенной подачей ПП и УП РС (а), ВСУ с распределенной по периферии ВК подачей ПП и сосредоточенной подачей УП РС (б) и применения ВСУ в вихревом регуляторе давления РС (в): 1 и 2 – канал управления и питания; 3 – ВК; 4 – выходной патрубок; 5 – ПП; 6 и 8 – радиальное и вихревое течение; 7 – УП; 9 и 13 – наличие и отсутствие вихревого течения; 10 и 11 – канал сброса и выхода; 12 – расфокусировка выходного потока; 14 – вихревой клапан; 15 – элемент сравнения; 16 – вихревой регулятор давления РС

Проведена статистка по публикационной активности НТЛ, подтверждающая современный интерес к разработке подобного рода устройств, выявлены ключевые отрасли, где наиболее широко используются ВСУ.

Проведен обзор и анализ методов расчета ВСУ и ММ рабочих процессов, протекающих в рабочей полости ВСУ в приближении сосредоточенных и распределенных параметров РС как для несжимаемых, так и сжимаемых РС и представлены определяющие их расчетные зависимости. Проведен обзор и выбор математического описания турбулентности потока РС. Проведен обзор и выбор метода решения ММ. Приведен обзор конструктивных исполнений ВСУ. Приведен обзор экспериментальных стендов и методов экспериментального исследования рабочих характеристик и рабочего процесса, протекающего в РП ВСУ, к которым можно отнести методы визуализации рабочего процесса, протекающего в РП ВСУ.

В результате анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке метода расчета ВСУ и математической модели рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ. С целью обоснованного выбора вариантов конструкции и новых схем разработана классификация существующих технических решений по конструктивным и функциональным признакам, которая позволяет проводить синтез расчетной схемы ВСУ, генерировать новые технические решения путем комбинации существующих элементов ВСУ. При помощи разработанной классификации для отработки ММ рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ предложена схема РП ВСУ, состоящая из вихревой камеры и патрубков питания, управления и выхода (Рисунок 2). Проведен оценочный гидравлический расчет, с использованием уравнения расхода, в частности зависимости Сен-Венана и Ванцеля, в результате которого

определены суммарные проходные сечения питающего и управляющего каналов и выходного патрубка. Проведен расчет геометрических параметров РП в соответствии с рассчитанными проходными сечениями каналов питания и управления, а также опираясь на накопленный опыт по данной теме из НТЛ.

Математическая модель рабочих процессов в РП ВСУ разработана со следующими допущениями:

- течение газа трехмерное;
- рабочее тело – идеальный газ;
- процесс установившийся;
- отсутствуют потенциальные поля (не учитывается влияние силы тяжести, действующие на вращающуюся массу РС);
- ньютоновская вязкая жидкость;
- не учитывается теплообмен между РС и корпусом ВСУ.

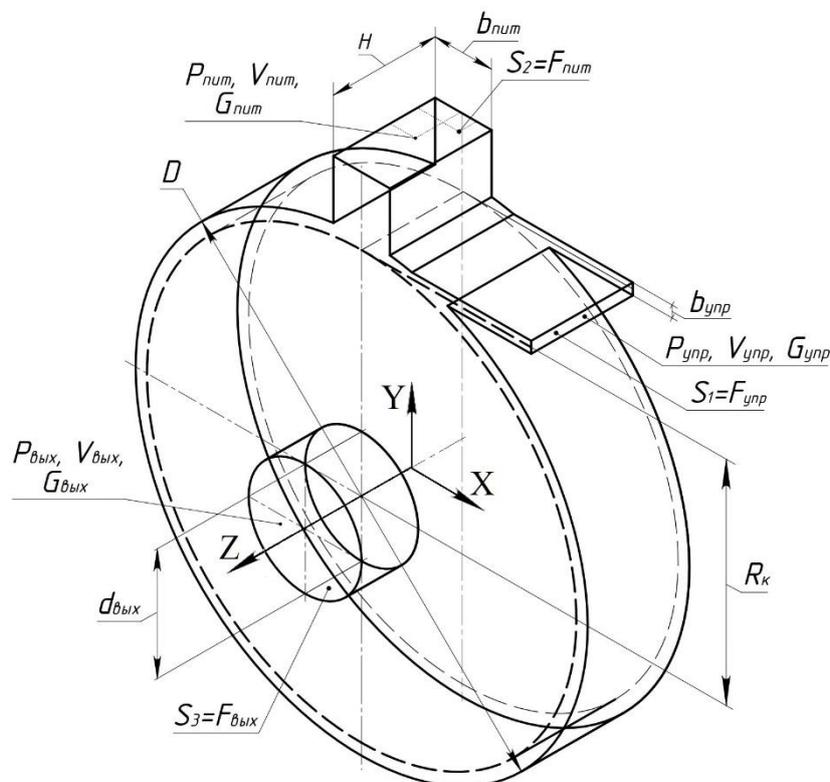


Рисунок 2. Объект исследования – рабочая полость ВСУ (расчетная область)

Основные расчетные зависимости:

Уравнение движения:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g_i,$$

где ρ – плотность; u_i – вектор скорости движения; t – время; τ_{ij} – тензор касательных напряжений; p – статическое давление; g_i – вектор ускорения свободного падения.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0.$$

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j h - \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_e,$$

где h – энтальпия; μ и μ_t – динамическая и турбулентная вязкость соответственно; Pr – число Прандтля; Pr_t – турбулентное число Прандтля.

Тензор касательных напряжений:

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \delta_{ij},$$

где k – кинетическая энергия турбулентности; δ_{ij} – символ Кронекера $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$

Составленная система дифференциальных уравнений дополняется моделью турбулентности, в частности в данной работе выбрана SST- $k\omega$ модель турбулентности:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = P - D + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \Gamma_\Phi) \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right] + A,$$

$$A = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j},$$

Условия однозначности:

Начальные условия: $t = 0 \mid p = p_{\text{атм}}; \vec{u} = 0.$

Граничные условия:

на входе в расчетную область: $p(\vec{R}) = p_{\text{п}}; \vec{R}(r, \theta_r, z, t) \in S_{12},$

на выходе из расчетной области: $p(\vec{R}) = p_{\text{вых}}; \vec{R}(r, \theta_r, z, t) \in S_3, \vec{u}(\vec{R}) \perp S_3,$

на внешних границах: $u_x(\vec{r}) = u_y(\vec{r}) = u_z(\vec{r}) = 0.$

Конечным условием расчета является: критерий среднеквадратической невязки $RMS \leq 10^{-5}.$

Разработанная ММ реализована при помощи лицензионного программного пакета ANSYS CFX. Расчет проводился для трех точек, расчетные параметры которых представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметры рабочей среды для трех расчетных точек

№ расчетной точки	$P_{\text{пит}}$ в сечение S_2 [кПа]	$P_{\text{упр}}$ в сечение S_1 [кПа]	$P_{\text{вых}}$ в сечение S_3 [кПа]
1	150	165	29
2		180	13
3		210	11

В результате численного расчета получено распределения скорости, давления, температуры и плотности РС во всем объеме расчетной области ВСУ, представленные на Рисунке 3.

Количественные значения массовых расходов и плотности РС, протекающей через патрубки питания, управления, выхода представлены в Таблице 2. Зная массовый расход и плотность РС вычислен объемный расход.

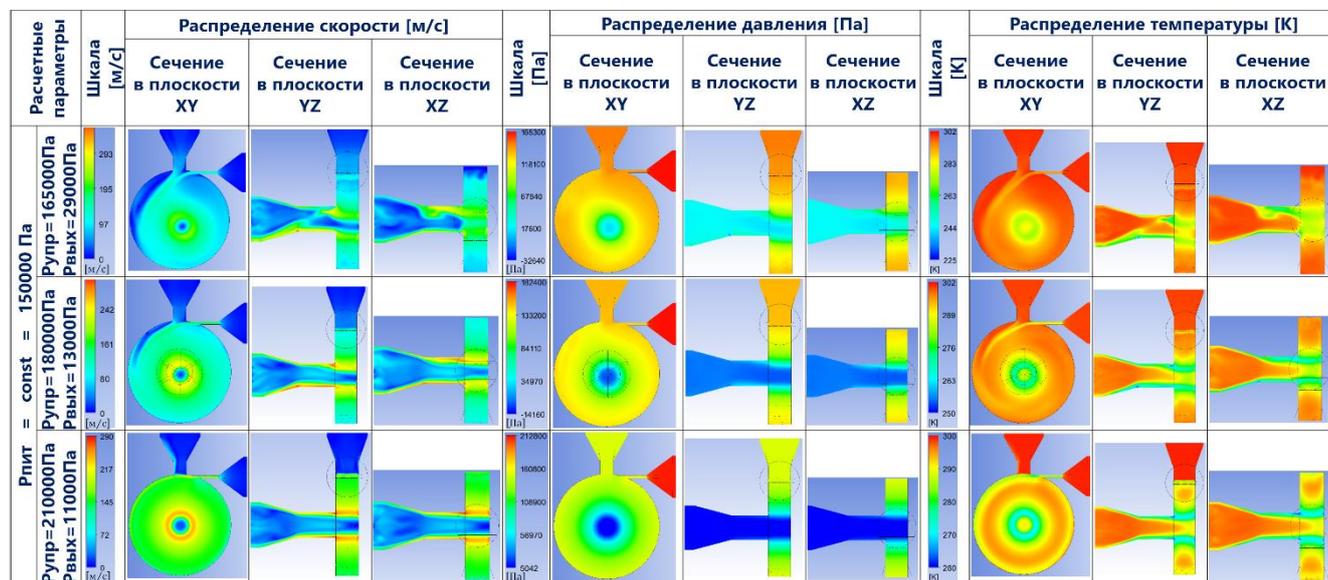


Рисунок 3. Результаты численного расчета: распределение давления, скорости и температуры РС во всем объеме расчетной области ВСУ

Таблица 2

Расчетные значения массовых расходов и плотности

№ расчетной точки	$M_{\text{вых}}$ [кг/с]	$M_{\text{упр}}$ [кг/с]	$M_{\text{пит}}$ [кг/с]	$\rho_{\text{вых}}$ [кг/м ³]	$\rho_{\text{упр}}$ [кг/м ³]	$\rho_{\text{пит}}$ [кг/м ³]
1	0,012106	0,0033291	0,0076221	1,5223	3,1171	2,9389
2	0,0080646	0,0039705	0,0045072	1,3328	3,2934	2,9403
3	0,0043126	0,0034284	0,0004635	1,311	3,6465	2,941

Вычислены значения давлений на срезе подводящих патрубков и вычислены расчетные значения потерь давления при прохождении РС через патрубки питания, управления и выхода ВСУ.

В третьей главе описано создание методом аддитивных технологий экспериментального образца ВСУ, разработка программно-аппаратного комплекса, предложена методика и результаты экспериментальных исследований характеристик и рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ.

С целью проведения экспериментального исследования рабочих характеристик и рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ, а также для проведения испытаний различных конфигураций ВСУ, на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана создан программно-аппаратный ком-

плекс для исследования ВСУ, схема и внешний вид которого представлены на Рисунках 4 и 5 соответственно.

Программно-аппаратный комплекс включает в себя модуль исследования ВСУ и программное обеспечение (ПО), разработанное в пакете LabVIEW, предназначенное для интерактивного управления модулем и регистрации показаний с цифровых средств измерения.

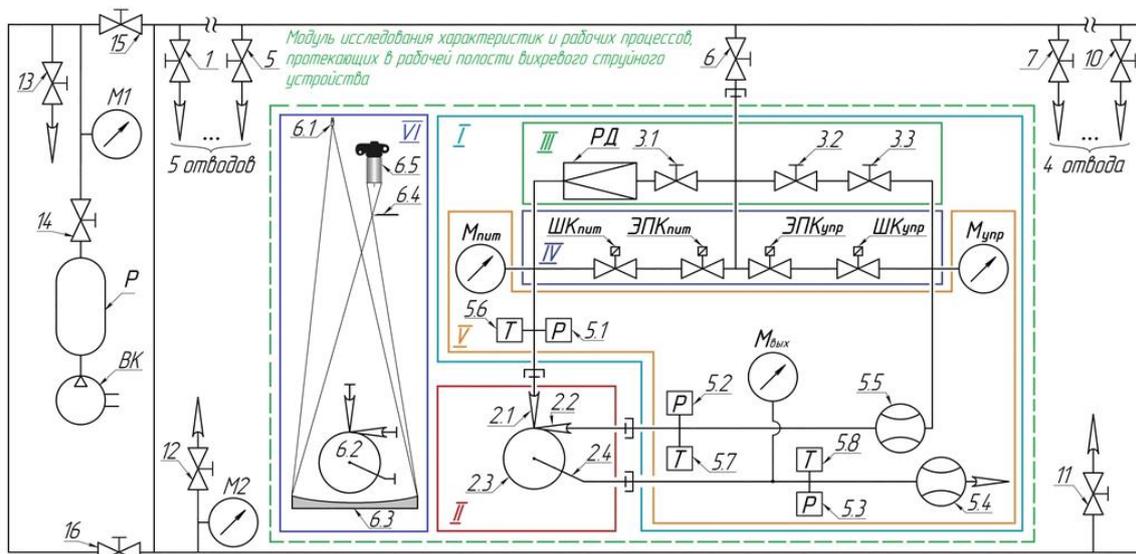


Рисунок 4. Схема стенда

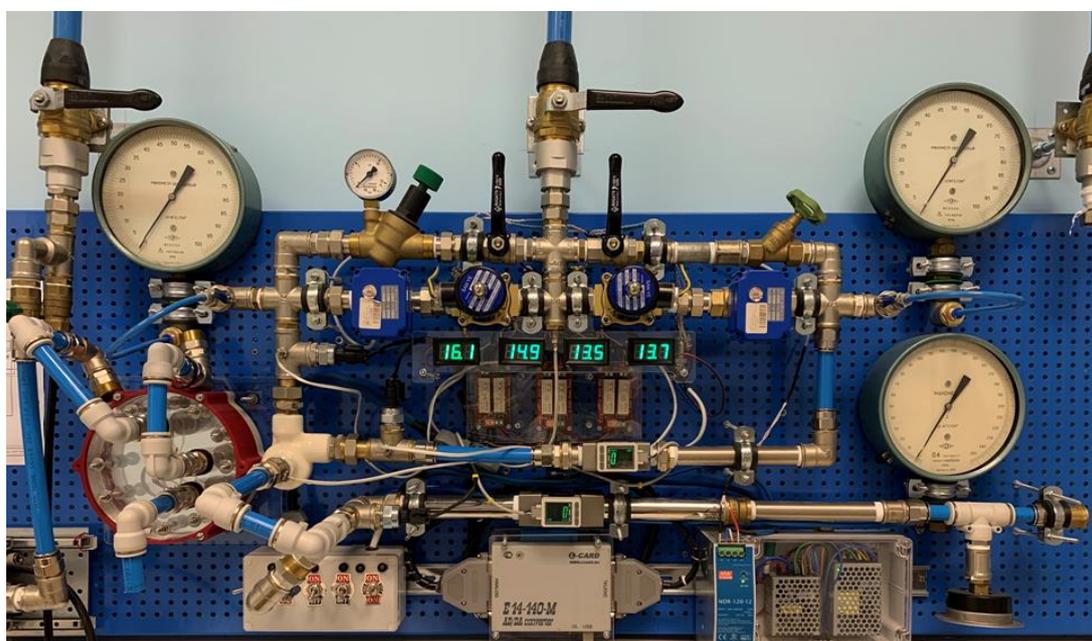


Рисунок 5. Внешний вид программно-аппаратного комплекса

Принципиально модуль исследования ВСУ состоит из: I – блок ЗРА и метрологических средств измерения, предназначенный для подачи РС с определенными параметрами (давлением и расходом) на объект исследования II; II – ВСУ (объект исследования); 2.1 – канал питания; 2.2 – канал управления; 2.3 – вихревая камера; 2.4 – выходной патрубок; III – линия ЗРА для ручного управления подачей РС на ВСУ; IV – линия ЗРА для автоматического управления

подачей РС на ВСУ; V – метрологические средства измерения; VI – модуль для исследования рабочего процесса, протекающего в РП ВСУ при помощи Шлирен-метода; ВК – винтовой компрессор; 1..5, 7..10, 11,12 – запорные шаровые краны на пневмопроводах; 6 – отсечной кран модуля исследования ВСУ; 13 – шаровой кран для сброса РС в атмосферу и опорожнения пневмосети; 14 – отсечной кран после ресивера винтового компрессора; 15, 16 – поворотные заслонки для отсечения части пневмосети; 3.1 и 3.2 – запорные шаровые краны для отсекания РС в каналах питания и управления; РД – мембранный регулятор давления для поддержания постоянного давления РС в канале питания; 3.3 – регулирующий вентиль для управления расходом и давлением РС в канале управления; ЭПК_{пит}, ЭПК_{упр} – запорные электропневмоклапаны для интерактивного отсекания РС в канале питания и управления; ШК_{пит}, ШК_{упр} – шаровые краны с электроприводом для интерактивного управлением расходом и давлением РС в каналах питания и управления; М_{пит}, М_{упр} – манометры для измерения давления РС в каналах питания и управления; 5.1, 5.2, 5.3 – датчики давления (PSE530-M5-L (SMC)); 5.4, 5.5 – расходомеры (PFMB7202-F06-E и PFMB7102-F04-C соответственно).

Преобразование аналогового сигнала с датчиков давления (ДД) и расхода (ДР) в цифровой и передача сигнала на персональный компьютер (ПК) реализуются при помощи аналогово-цифрового преобразователь напряжения ELCARD E14-140-M.

С целью определения значения давления РС ПУ, при котором происходит запираение ПП, в данной работе разработана методика определения экспериментального значения давления РС ПУ, при котором происходит запираение ПП, а также методика проведения экспериментальных исследований рабочих характеристик ВСУ.

Представление о характеристике ВСУ дает связь его входных и выходных параметров $Q_{вх}$, $Q_{вых}$ и $P_{вх}$, $P_{вых}$ с параметрами ПУ $Q_{упр}$ и $P_{упр}$ при поддержании постоянного давления в канале питания $P_{пит} = const$. Обеспечение данных параметров достигается следующим образом. Давление газа в канале питания поддерживается постоянным при помощи мембранного регулятора РД. Давление управления $M_{упр}$ изменяется при помощи плавного открытия/закрытия вентиля 3.3. Расходы на выходе и в канале управления ВСУ контролируется расходомерами 5.4, 5.4. Массовый расход питания вычислен как $M_{пит} = M_{вых} - M_{упр}$, при этом массовые расходы питания, управления и выхода пересчитаны через объемные расходы, давление и температуру РС.

В результате проведения экспериментальных исследований построены характеристики ВСУ, построены номограммы, при помощи которых определены значения параметров ПУ, при которых происходит запираение ПП. Запираение потока питания при давлении $P_{пит} = 0,2$ МПа происходит при давлении управления $P_{упр} = 0,425$ МПа.

Построены характеристики ВСУ, отражающие зависимости параметров питания, управления и на выходе ВСУ в режиме реального времени по которым подтверждено обеспечение запираения ПП.

С целью сопоставления результатов численного исследования с результатами экспериментального все параметры РС приведены к значениям в сечении сопел питания, управления и выходного патрубков ВСУ. Для этого при помощи дополнительного численного исследования вычислены потери давления при прохождении РС через патрубки экспериментального стенда с учетом реальной геометрии патрубков. С учетом вычисленных потерь давления произведен пересчет результатов численного и экспериментального исследования для трех значений давления управления расчетных и соответствующих им экспериментальных точек, исходные значения которых представлены в Таблицах 1 и 2, после чего проведено сопоставление результатов численного с результатами экспериментального исследования, которое представлено на Рисунке 6.

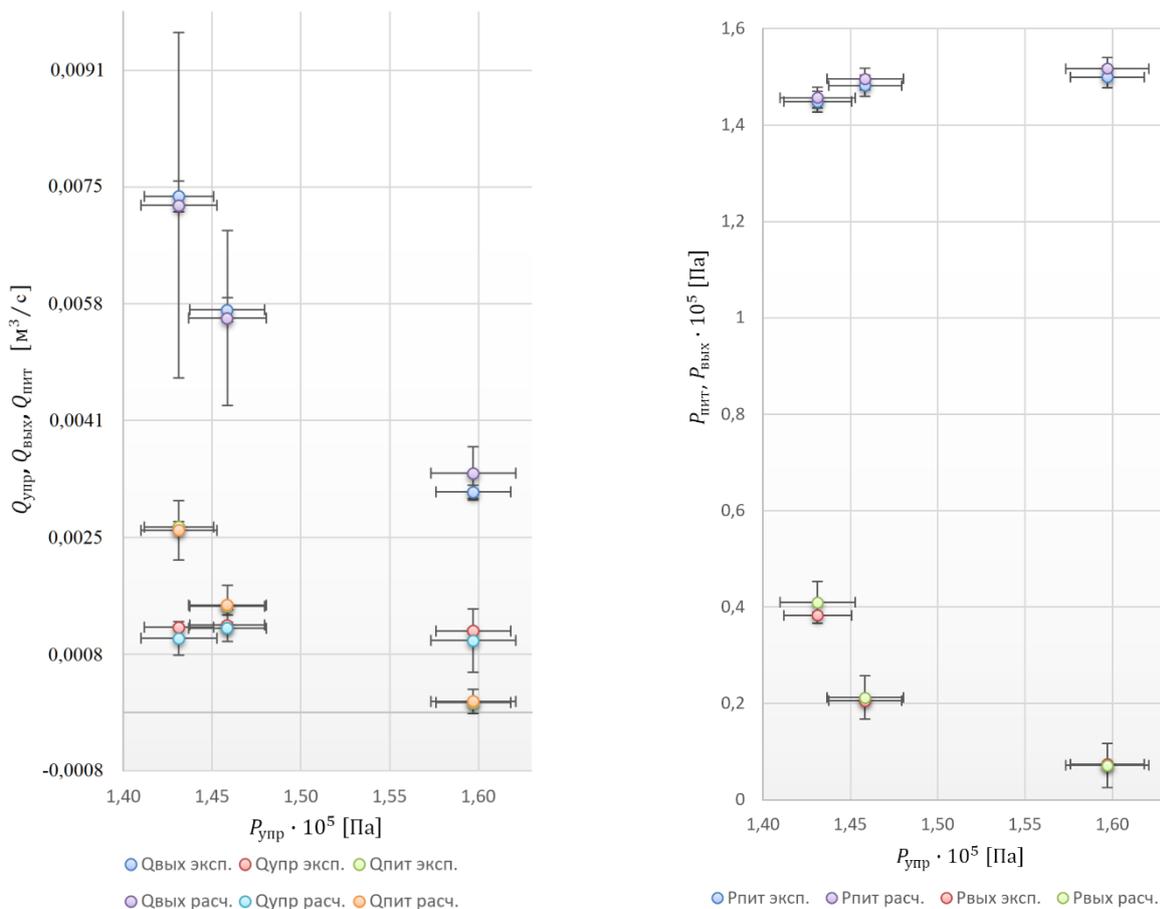


Рисунок 6. Сравнение экспериментальных значений с расчетными данными

В результате сопоставления значений экспериментальных данных, со значениями, полученными в результате численного моделирования подтверждено, что максимальное отклонение по расходу РС не превышает 14%, по давлению питания и на выходе не превышает 7%, по давлению управления не превышает 13%, что подтверждает адекватность составленной ММ и правомочность ее дальнейшего использования при расчете подобных конфигураций ВСУ. Верификация ММ проведена для среднеинтегральных параметров РС, значения которых вычислены на границах расчетной области объекта исследования.

Для верификации параметров РС, внутри РП ВСУ проведено экспериментальное исследование рабочего процесса, протекающего в РП ВСУ при помощи: Шлирен-метода оптической визуализации (Рисунок 7, а) и метода инфракрасной термографии (Рисунок 7, в).

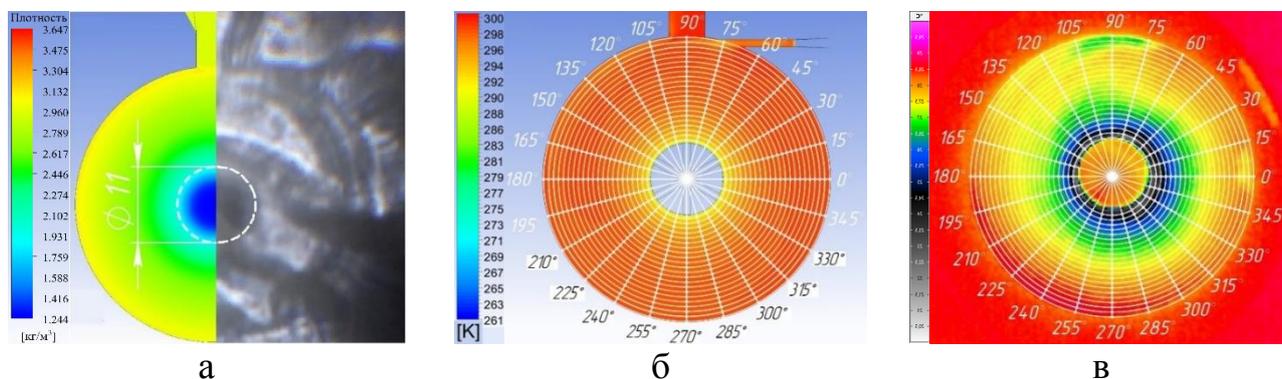


Рисунок 7. Результаты визуализации рабочего процесса внутри РП ВСУ: а – распределение плотности, полученное при помощи Шлирен-метода, б – результат численного моделирования распределения поля температур на торцевой стенке РП ВСУ, в – результат экспериментального исследования распределения поля температур на торцевой стенке рабочей полости ВСУ

Качественное сопоставление области разрежения в центре вихревого течения, полученной при численном моделировании рабочего процесса, протекающего в РП ВСУ с областью разрежения, полученной в при экспериментальном исследовании рабочего процесса в РП ВСУ представлено на Рисунке 7, а, что позволило сделать заключение об адекватности ММ.

Для верификации результатов численного моделирования течения рабочего процесса, протекающего внутри РП ВСУ выбрана расчетная точка со следующими параметрами РС: $P_{пит} = 0,15$ МПа, $P_{упр} = 0,21$ МПа, $P_{вых} = 0,011$ МПа.

На Рисунке 8 представлен результат исследования распределения температуры на торцевой стенке РП вдоль радиуса ВК.

Максимальный перепад температур, образующийся в ВК не превышает 9°C. Среднее отклонение ε расчетных от экспериментальных значений температуры вдоль радиусов составляет 5%, максимальное отклонение не превышает 16%. Это может быть объяснено наличием теплообмена между РС и стенками РП ВСУ.

На основе проведенных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований параметров рабочих процессов и разработки конструкций ВСУ предложен метод расчета ВСУ, позволяющий проектировать ВСУ на заданные газодинамические параметры РС, исследовать рабочие процессы, протекающие в различных конфигурациях РП ВСУ, позволяющий выявлять зависимость входных и выходных параметров РС от параметров управления и геометрических параметров РП ВСУ. Метод расчета ВСУ формализован в виде блок-схемы.

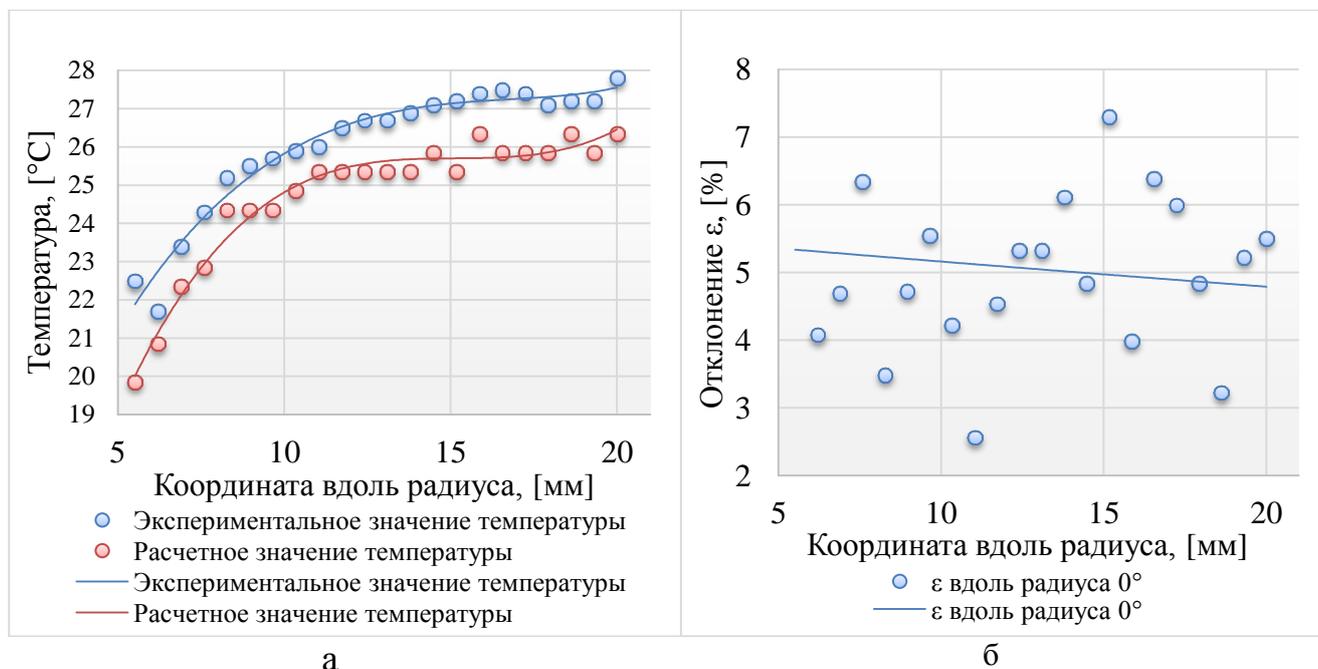


Рисунок 8. Результат исследования распределения температуры вдоль радиуса ВК: а – сопоставление расчетного с экспериментальным значением температуры вдоль радиуса ВК 0° ; б – отклонение ε [%] распределения значения температуры расчетного от экспериментального вдоль радиуса ВК 0°

Четвертая глава посвящена проведению расчетно-теоретических исследований параметров РС, протекающей внутри рабочих полостей ВСУ с использованием разработанного метода расчета ВСУ.

Проведено обоснование и создана новая геометрии РП и экспериментальный образец ВСУ, который позволяет снизить значение давления РС потока управления, обеспечивающего запирающие ПП. Проведена серия экспериментальных исследований, подтвердивших работоспособность конструкции.

При помощи разработанного метода расчета ВСУ проведены расчетно-теоретические исследования параметров рабочей среды, протекающей в рабочих полостях:

- с торообразной ВК и распределенной по периферии ВК подачей ПП и ПУ РС;

- с распределенной по периферии ВК подачей ПП и ПУ РС, а также с регулировкой закрутки ПП и ПУ РС, которая позволяет дискретно переключать ПП либо в тангенциальном, либо в осевом направлении, таким образом, создавая или устраняя закрутку потока в ВК, что позволяет получить определенный расход и давление на выходе из ВСУ;

- ВСУ, предназначенного для управления газореактивным приводом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана классификация по конструктивным и функциональным признакам, позволяющая проводить синтез новых РП ВСУ.

2. Разработан метод расчета ВСУ и ММ течения рабочей среды в рабочей полости ВСУ.

3. Разработан и изготовлен экспериментальный образец ВСУ, программно-аппаратный комплекс, методика проведения эксперимента, проведена верификация ММ рабочих процессов, протекающих в РП ВСУ как по среднеинтегральным параметрам РС на границах расчетной области, так и по параметрам РС внутри РП ВСУ. Максимальное отклонение расчетных от экспериментальных данных по расходу РС не превысило 14%, по давлению питания и на выходе не превысило 7%, по давлению управления не превысило 13%, по температуре не превысило 16%. Запирание потока питания при поддержании постоянного давления питания $P_{\text{пит}} = 0,2$ МПа происходит при давлении управления $P_{\text{упр}} = 0,425$ МПа.

4. Проведены расчетно-теоретические исследования параметров РС, протекающей внутри рабочих полостей ВСУ:

- с распределенной по периферии ВК подачей ПП и ПУ РС;
- РП ВСУ с возможностью управления закруткой ПП и ПУ;
- РП ВСУ, предназначенной для управления тягой газореактивного привода.

5. Результаты диссертационной работы внедрены в процессе проведения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы при разработке активного гидropневмомодемпфера протеза коленного модуля в ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука».

6. Разработанный стенд внедрен в практику учебного процесса в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

7. Результаты диссертационной работы использованы в практической деятельности ООО НПФ «МКТ-АСДМ» (г. Курган) при разработке ЗРУ в виде: технических предложений по выполнению конструктивных схем, методик расчета и моделирования рабочих процессов гидropневмомеханических устройств и систем управления потоками; при разработке ЗРУ в системах регулирования пластового давления для нужд пожаротушения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Усс А.Ю., Чернышев А.В. Классификация вихревых струйных устройств, предназначенных для управления потоком газа в пневмогидравлических системах // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 7. С. 43-58. (2 п.л. / 1,5 п.л.).

2. Разработка стенда для визуализации и экспериментального исследования рабочего процесса в вихревом струйном устройстве / А.Ю. Усс [и др.] // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 3. С. 45-55. (1,375 п.л. / 1,1 п.л.).

3. Усс А.Ю., Чернышев А.В. Применение вихревого струйного устройства при разработке активных гидropневомодемпферов, используемых в технических средствах реабилитации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2021. № 1 (136). С. 185-204. (1,25 п.л. / 1 п.л.).

4. Усс А.Ю., Чернышев А.В., Пугачук А.С. Проектирование газореактивного привода с системой управления тягой при помощи вихревого клапана // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 2. С. 47-58. (1,5 п.л. / 1,2 п.л.).

5. Усс А.Ю., Пугачук А.С., Чернышев А.В. Разработка регулирующей арматуры с использованием принципа вихревого течения рабочей среды // Научно-технический сборник вести газовой науки. № 2 (44). 2020. С. 215-221. (0,875 п.л. / 0,7 п.л.).

6. Uss A.Yu., Chernyshev A.V. The development of the vortex gas pressure regulator // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152. P. 380-388. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.718> (1,125 п.л. / 0,9 п.л.).

7. Uss A.Yu., Chernyshyov A.V., Krylov V.I. Development of gas pressure vortex regulator // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876. Issue 1. No. 020025. 10 p. <https://doi.org/10.1063/1.4998845> (1,25 п.л. / 1 п.л.).

8. Uss A.Yu., Chernyshev A.V., Atamasov N.V. Development of the calculation method and designing of a vortex jet device for gas flow regulation purposes // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. Issue 1. No. 030028. 10 p. <https://doi.org/10.1063/1.5122078> (1,25 п.л. / 1 п.л.).

9. The development of a stand for visualizing and studying the gas flow in the flow cavity of a vortex jet device / A.Yu Uss. [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2285. Issue 1. No. 030011. 11 p. <https://doi.org/10.1063/5.0026796> (1,375 п.л. / 1,1 п.л.).

10. Uss A., Pugachuk A., Chernyshov A. Development and application of vortex control valves in pneumahydraulic systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 779. Issue 1. No. 012040. 9 p. [doi:10.1088/1757-899X/779/1/012040](https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012040) (1,125 п.л. / 0,9 п.л.).

11. Uss A.Yu., Chernyshyov A.V., Pugachuk A.S. Application of additive technologies in the development of a vortex valve to control the thrust of a gas-jet drive // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2412. Issue 1. No. 030022. 11 p. <https://doi.org/10.1063/5.0075069> (1,375 п.л. / 1,2 п.л.).