



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

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 03.04.02

ООП/ОПОП Физика конденсированного состояния

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии

УДК 532.525.2:534

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	МахаметоваНазакятАршидиновна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ОФ	Лаптев Роман Сергеевич	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., профессор		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП/ОПОП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен применять фундаментальные знания в области физики для решения научно-исследовательских задач, а также владеть основами педагогики, необходимыми для осуществления преподавательской деятельности
ОПК(У)-2	Способен в сфере своей профессиональной деятельности организовывать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую деятельность для поиска, выработки и принятия решений в области физики
ОПК(У)-3	Способен применять знания в области информационных технологий, использовать современные компьютерные сети, программные продукты и ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (далее – сеть «Интернет») для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами профильной подготовки
ОПК(У)-4	Способен определять сферу внедрения результатов научных исследований в области своей профессиональной деятельности
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики конденсированного состояния и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта
ПК(У)-2	Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения задач в профессиональной области и применять результаты научных исследований в проектной деятельности.
ПК(У)-3	Способен планировать и проводить фундаментальные исследования по

	проектам в области ядерно-физических исследований, взаимодействия излучения с веществом, модернизации современных и создания новых методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел
ПК(У)-4	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научных исследований
ПК(У)-5	Способен методически грамотно строить планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать теоретические и практические разделы дисциплин в соответствии с утвержденными учебно-методическими пособиями при реализации программ бакалавриата в области физики
ПК(У)-6	Способен руководить научно-исследовательской деятельностью в профессиональной области обучающихся по программам бакалавриата



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

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.04.02 Физика

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП/ОПОП

_____ Лидер А.М.

(Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
ОБМ11	Махаметова Назакят Аршидиновна

Тема работы:

Экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 142-9/с от 22.05.2023

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</p>	<p>выходное сечение-свободный поток, протекающий из сопл квадратной и круглой формы</p>
<p>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке (аналитический обзор литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Литературный обзор – Материалы и методы – Результаты и их обсуждение – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение – Социальная ответственность – Заключение

<i>процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)</i>	
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Маланина Вероника Анатольевна, к.э.н., доцент
Социальная ответственность	Сечин Андрей Александрович, к.т.н., доцент
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
1.5.2 Результаты исследования струи прямоугольного сечения	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ОФ	Лаптев Роман Сергеевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	МахаметоваНазакятАршидиновна		

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.04.02 Физика
 Уровень образования магистратура
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2022/2023 учебного года)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Обучающийся:

Группа	ФИО
ОБМ11	МахаметоваНазакятАршидиновна

Тема работы:

Результаты исследования струи прямоугольного сечения
--

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.02.2023	Аналитический обзор литературы	
10.03.2023	Исследование средних характеристик свободной струи при наличии внешнего акустического воздействия;	
05.04.202	Исследование пульсационных характеристик свободной струи	
25.04.2023	Анализ результатов	
25.05.2023	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
25.05.2023	Социальная ответственность	
31.05.2023	Заключение	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ОФ	Лаптев Роман Сергеевич	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., профессор		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	МахаметоваНазакятАршидиновна		

РЕФЕРАТ

ПРЯМОУГОЛЬНОЕ СОПЛО, ТРЕХМЕРНЫЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОТОК, ВИХРЕВАЯ СТРУКТУРА, АКУСТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ВНЕШНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ.

Целью работы является подробное экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии.

Объектом исследования является выходное сечение, представляет собой свободный поток, вытекающий из сопла прямоугольной и круглой формы.

Предметом исследования является свободный поток, протекающий от сопла.

Актуальность работы. Турбулентные потоки играют важную роль в различных установках, используемых в теплоэнергетике, вентиляционной технике, реактивной технике и других областях науки.

ТҮЙІНДЕМЕ

ТІБҰРЫШТЫ САПТАМА, ҮШ ӨЛШЕМДІ ТУРБУЛЕНТТІ АҒЫС, АҒЫН ӘСЕРІ, АКУСТИКАЛЫҚ ӘСЕР, СЫРТҚЫ ӘСЕР.

Жұмыстың мақсаты - акустикалық әсер ету кезінде турбулентті еркін ағынды эксперименттік зерттеу.

Зерттеу нысаны шығыс қимасы тікбұрышты және дөңгелек пішінді саптамадан шығатын еркін ағын.

Зерттеу пәні - саптамадан ағып жатқан еркін ағын.

Жұмыстың өзектілігі. Турбулентті ағындар жылу энергетикасында, желдету техникасында, реактивті техникада және ғылымның басқа салаларында қолданылатын әртүрлі қондырғыларда маңызды рөл атқарады.

ABSTRACT

RECTANGULAR NOZZLE, THREE-DIMENSIONAL TURBULENT FLOW, VORTEX STRUCTURE, ACOUSTIC IMPACT, EXTERNAL IMPACT.

The purpose of this work is a detailed experimental study of turbulent free jet under acoustic impact.

The object of the study is the outlet section is a free flow flowing out of the nozzle of rectangular and circular shape.

The subject of the study is the free flow flowing from the nozzle.

Relevance of the work. Turbulent flow plays an important role in various installations used in heat and power engineering, ventilation engineering, jet engineering and other areas of science.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ	8
1 КРАТКИЙ ОБЗОР РАБОТ ОТНОСИТЕЛЬНО АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СВОБОДНЫХ ПОТОКОВ	9
1.1 Общая характеристика турбулентных потоков	9
1.2 Определяющие уравнения	12
1.3 Подробное описание численных исследований	14
1.4 Пограничное состояние	17
1.5 Результаты исследований и их обсуждение	18
1.5.1 Конфигурация потока в области исследования	18
1.5.2 Результаты исследования струи прямоугольного сечения	21
1.5.3 Изменение числа Рейнольдса	26
1.5.4 Влияние интенсивности турбулентности на входе	27
1.5.5 Тепловые характеристики	37
1.5.6 Сравнение различных соотношений сторон	40
1.6 Заключение по краткому обзору основной работы	44
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ	45
2.1 Экспериментальная установка для исследования аэродинамики свободной струи	45
2.2 Экспериментальная установка для исследования процесса теплопереноса свободной струи	47
2.3 Методика измерения динамических и тепловых характеристик свободной струи	49
2.3.1 Методы измерения аэродинамических характеристик свободной струи	49
2.3.2 Методика измерения тепловых характеристик	50

2.4	Визуализация струи	51
2.5	Измерение средней скорости и характеристик турбулентности	53
3		58
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	72
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	77
4.1	Введение в раздел	77
4.2	Анализ существующего рынка	
4.3	Анализ конкурентных технических решений	
4.4	Матрица SWOT	
4.5	Планирование управлением научно-техническим проектом	
4.5.1	Контрольные события проекта	
4.5.2	Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	95
4.6	Бюджет научно-технического исследования	105
4.7	Вывод по разделу	113
5	Социальная ответственность	114
5.1	Введение в раздел	114
5.2	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	1119
5.3	Производственная безопасность	123
5.3.1	Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электромаг- нитными полями	125
5.3.2	Опасные и вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде их характеризи- руемые повышенным уровнем и другими	128

	неблагоприятными характеристиками шума	
5.3.3	Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на месте нахождения работающего	129
5.4	Экологическая безопасность	131
5.5	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	132
5.6	Вывод по разделу	135
	Часть на английском языке	136

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

a, b – длина и ширина выходного среза сопла, м;

$\lambda = a/b$ – параметр соотношения сторон (удлинение) сопла;

C – степень сжатия сопла;

$P_{ст}$ – статическое давление, Па;

P_T – полное давление, Па;

$\frac{\rho U^2}{2}$ – динамическое давление, Па;

m – высота столба жидкости у манометра;

k – коэффициент изгиба манометра, кг·с/м²;

U – продольная составляющая скорости, м/с;

U_0 – скорость на выходном сечении сопла, м/с;

U_m – скорость на оси струи, м/с;

$\sqrt{U_m'^2}$ – продольная пульсация скорости на оси струи, м/с;

$\sqrt{U_0'^2}$ – продольная пульсация скорости на срезе сопла, м/с;

$\varepsilon_{m_0} = \frac{\sqrt{U_m'^2}}{U_0}$ – интенсивность (уровень) турбулентности на оси струи;

$Re = U \cdot d / \nu$ – число Рейнольдса;

$Sh = \frac{f \cdot b}{U_0}$ – число Струхала;

$d_{кр}$ – диаметр круглого сопла, м;

$y_{0.5}, z_{0.5}$ – поперечные координаты, где скорость равна половине максимальной ($U_m/2$), (0.5-условия во внешнем слое, где $U=0.5 \cdot U_m$), м;

ΔT – разность между температурой в какой-либо точке струи и температурой окружающей среды;

ΔT_0 – разность между температурой на начальном сечении струи и в окружающем пространстве;

ΔT_m – разность между температурой на оси струи и в окружающем пространстве;

$c_\mu - k$ – ϵ постоянная модели турбулентности;

$c_1 - k$ – ϵ постоянная модели турбулентности;

$c_2 - k$ – ϵ постоянная модели турбулентности;

D – эквивалентный диаметр струи круглого сечения, м;

I – интенсивность турбулентности;

k – Средняя кинетическая энергия турбулентности на единицу массы, $\text{м}^2\text{с}^{-2}$;

α – Тепловое рассеяние, $\text{м}^2\text{с}$;

α_t – Турбулентное рассеяние тепла, $\text{м}^2\text{с}$;

δ_{ij} – дельта Кронекера;

ϵ – Степень турбулентного рассеивания, $\text{м}^2\text{с}^{-3}$;

μ – Динамическая вязкость, $\text{Нс}\text{м}^{-2}$;

μ_t – Динамическая турбулентная вязкость, $\text{Нс}\text{м}^{-2}$;

ρ – Плотность, $\text{кг}\text{м}^{-3}$;

f – частота акустического воздействия, Гц;

δ – радиус внешней границы потока, м;

σ_k – Постоянная модели турбулентности для уравнения k ;

$\sigma_\epsilon - k - \epsilon$ Постоянная модели турбулентности;

u_i – Колебания скорости в направлении оси X , мс^{-1} ;

M – Момент, $\text{кг}\text{м}\text{с}^{-2}$;

v – Усредненная по времени составляющая вектора скорости в направлении оси Y , мс^{-1} ;

Pr_t – Турбулентное число Прандтля;

C_1 – на центральной линии потока;

In – на входе в плоскость потока;

Inf – при температуре окружающей среды;

Max –максимум.

L_x – Длина области вычислений в направлении оси $X, м$;

L_y – Длина области вычислений в направлении оси $Y, м$;

L_z – Длина области вычислений в направлении оси $Z, м$;

L_{yi} – Полудлина штуцера забора воздуха для вентиляции в направлении оси $Y, м$;

L_{zi} – Полудлина штуцера забора воздуха для вентиляции в направлении оси $Z, м$;

x – Декартова координата по длине потока в области вычислений, м;

y – Декартова координата по ширине потока в области вычислений, м.

z – Декартова координата по боковой длине области вычислений, м;

Индексы:

кр-круглый;

н-начальный;

э-эффективный;

з-зеленый;

к-красный;

ж-желтый;

с-синий;

0-значение параметра у кромки сопла;

m-осевой;

n – полный;

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы. Данная работа предназначена для подробного экспериментального исследования турбулентной свободной струи при акустическом воздействии.

Актуальность исследовательской работы. Актуальность данной исследовательской работы заключается в том, что турбулентные свободные струи широко применяются в различных отраслях промышленности, таких как авиационная, энергетическая, металлургическая и др. Однако, несмотря на широкое использование, механизмы образования и развития турбулентных структур в таких потоках до сих пор не до конца изучены.

Исследование воздействия акустических колебаний на турбулентную свободную струю является важным направлением в данной области, так как может привести к улучшению характеристик потока и повышению эффективности его использования в различных технологических процессах.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкции и режимов работы технических устройств, использующих турбулентные свободные струи, что в свою очередь может привести к экономическим выгодам и улучшению качества продукции.

Цель работы:

- экспериментальное исследование средних динамических характеристик свободного потока;
- исследование средних характеристик свободной струи при наличии внешнего акустического воздействия;
- исследование пульсационных характеристик свободной струи.

1 КРАТКИЙ ОБЗОР РАБОТ ОТНОСИТЕЛЬНО АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СВОБОДНЫХ ПОТОКОВ

1.1 Общая характеристика турбулентных потоков

Турбулентные потоки являются предметом экспериментов и численных расчётов в течение 40 лет. Свободные потоки представляют собой исходные данные для изучения физических свойств турбулентного потока среды, потому, что их используют для оценки физических моделей. Кроме этого, они представляют особый интерес для использования во многих технических разработках; вот некоторые примеры такого применения: двигатели внутреннего сгорания, двигательная установка, распылительная сушилка, лазерная обработка металла, смешивание химических реагентов, охлаждение лопаток и т.п..

Вскоре было обнаружено, что конфигурации осесимметричной струи значительно лучше по сравнению со своими аналогами в определенных аспектах. В частности, они способствуют смешиванию с обволакивающей жидкостью. В связи с наличием форм неустойчивости высшего порядка, осесимметричные струи более неустойчивые, чем струи круглого сечения. Первая экспериментальная работа была проведена в 1933 году, где изучались поля осредненных скоростей в струях прямоугольного сечения с изначальным соотношением сторон в поперечном сечении 1, 2, 5 и 10. Струи прямоугольного сечения исследовали в экспериментальном порядке Трентакосте и Сфорза, Сфорза и Крашенников и Рогальская. Раджаратнам объединил большинство аналитических решений и выводов, заключенных на основании проведенных экспериментов, полученных для изучения двумерных, трехмерных струй и струй круглого сечения. Это произошло во время, когда были достигнуты значительные результаты в численных исследованиях, поэтому особое внимание уделялось изучению особенностей плоских и осесимметричных струй, вот почему тогда было

проведены большинство исследований и в настоящее время появилась возможность пользоваться результатами этих исследований [1-12].

При этом по турбулентным трехмерным струям было проведено совсем незначительное количество исследований при помощи численного моделирования из-за высокой стоимости, связанной с такого рода моделированием.

За последнее время комплексное численное исследование было проведено Миллером и другими с подробной иллюстрацией явления перемены осей и скорости увлечения по различным струям некруглого сечения, включая струи овального сечения, прямоугольного сечения, а также треугольного сечения. Вильсон и Демурен создали конечно-разностную численную модель на основе трёхмерной струи прямоугольного сечения с соотношением сторон 2:1, используя три разные турбулентные состояния на входе в струю. Холдо и Симпсон провели анализ турбулентной струи прямоугольного сечения с соотношением сторон 10:1, используя модель турбулентного течения большого размера. Сравнение результатов экспериментов, проведенных Куинн и другими, с результатами работы Холдо и Симпсон, показало удовлетворительное совпадение по дальнему полю, но не показали начальное ускорение струи в направлении оси в пределах первоначальных пяти эквивалентных диаметров поля обтекания. Ремболд и другие провели исследования переходного процесса струи прямоугольного сечения с соотношением сторон $AR=5$ при помощи прямого численного моделирования (DNS) [13-16].

Модель DNS отличается высокой прогнозируемой точностью при низких числах Рейнольдса и высокой стоимостью вычислений. LES (моделирование методом крупных вихрей) может достигать больших чисел Рейнольдса, но также характеризуется высокой стоимостью вычислений. Однако, RANS (уравнения Навье–Стокса, осреднённые по Рейнольдсу) можно применять до высоких чисел Рейнольдса, которые невозможно достигнуть при использовании прямого численного моделирования (DNS).

Целью настоящей научной работы является исследование двухпараметрической модели турбулентности в моделировании поля турбулентного потока в свободных струях, вытекающих из сопла прямоугольного сечения. В данном исследовании, мы использовали двухпараметрическое моделирование турбулентности для прогнозирования основных параметров потока, профилей скорости в ближней зоне, степень уменьшения скорости в дальней зоне. Берг и другие использовали 2 стандартные двухпараметрической модели турбулентности ($k-\varepsilon, k-\omega$) для моделирования потока, вытекающего из сопла прямоугольного сечения. При этом было обнаружено, что способ моделирования, основанный на модели $k-\varepsilon$, оказался самым оптимальным в прогнозировании уменьшения скорости вдоль центральной оси потока как в ближней, так и в дальней зоне изучения. Все результаты этих исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными. Однако, Берг и другие не рассматривали влияние чисел Рейнольдса, соотношение сторон и поле температур. В данной научной работе проведено исследование влияния чисел Рейнольдса в широком диапазоне Re . Следует отметить, что средой во всех случаях является воздух, при этом использовалась модель турбулентности $k-\varepsilon$, а также; проведено исследование полей скоростей и температур, проведен анализ влияния соотношения сторон на смешивание в струях с прямоугольным поперечным сечением. Исследование проводилось с соотношением сторон в диапазоне от 1:1 до 1:4. Число Рейнольдса, исходя из гидравлического диаметра на входе, принималось в диапазоне от 800 до 25600. Данная научная работа представляет исследование влияния условия во входном сечении потока на параметры струи прямоугольного сечения, вытекающей в пространство большей площади. Следует отметить, что также были проведены исследования поля температур.

Далее основные исследования проводятся по научной работе [17].

1.2 Определяющие уравнения

Определяющие уравнения представляют собой уравнения неразрывности, уравнения импульсов и уравнения постоянства энергии. Нижеприведенные допущения рассматриваются для моделирования потока: устойчивое состояние, неизменные параметры рабочей жидкости, несжимаемость, ньютоновская жидкость и отсутствие естественной конвекции.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i u_j}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j T}), \quad (3)$$

где, x_i – это Декартовы координатные направления ($x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$), u_i – это усреднённые по времени Декартовы составляющие вектора скорости с широко используемыми черточками, пропущенными для удобства ($u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w$), $\overline{u_i u_j}$ – это тензор турбулентных напряжений, p – это давление. Корреляция флуктуаций в масштабе скорость-температура, которая определяет диффузионный поток турбулентности ($\overline{u_j T}$), смоделирована при помощи приближения Буссинеска:

$$\overline{u_j T} = -\alpha_t \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right), \quad (4)$$

где термическая турбулентная диффузность определена как:

$$\alpha_t = \frac{c_\mu k^2}{Pr_t \varepsilon}. \quad (5)$$

Турбулентное число Прандтля, Pr_t , представляет собой постоянную величину в уравнении постоянства энергии, в большинстве простых турбулентных потоков, турбулентное число Прандтля принимается как порядок единицы.

Модель турбулентности, используемая для исследования в данной научной работе, характеризуется следующим: стандартная модель $k-\varepsilon$, разработанная Лаундером и Спалдингом. Модели динамической турбулентной вязкости предполагают, что для критериев Рейнольдса применяется следующее соотношение в уравнении.

$$\overline{\rho u_i u_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (6)$$

где μ_t — это динамическая турбулентная вязкость, δ_{ij} — дельта Кронекера, k — кинетическая энергия турбулентности на единицу массы. В модели $k-\varepsilon$, динамическая турбулентная вязкость рассчитана при помощи соотношения:

$$\mu_t = c_\mu \rho k^2, \quad (7)$$

где c_μ является постоянной величиной, а величины k и рассеяние ε , получены путем решения следующих уравнений переноса:

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k - \rho \varepsilon, \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + P_k + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 P_k - c_2 \rho \varepsilon). \quad (9)$$

Степень выработки кинетической энергии турбулентности определена при помощи следующей формулы:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (10)$$

1.3 Подробное описание численных исследований

Для решения системы уравнений использовался метод конечных объёмов с соответствующим переносом переменных. Поля осредненных давлений и скоростей рассчитаны при помощи алгоритма SIMPLEC. Для предотвращения колебаний барического поля использован метод интерполяции Рхи-Чоу. Схема разности второго порядка по Ван Леер принята для определения переходных значений в уравнениях импульсов и уравнениях постоянства энергии. Уравнения, приведенные к дискретному виду, решались по несколько раз при помощи линейного алгоритма метода прогонки [18, 19].

В связи с наличием высоких градиентов скорости вокруг центральной линии потока, для дискретизации области потока была использована неравномерная сетка размером 120 x 90 x 90. Структурированные, ортогональные координатные сетки разработаны для области решения, изображенной на рисунке 1. Как показано на рисунке 1, плоскость z - y , с равномерным шагом между узловыми точками, была использована в зоне входа ($0 \leq z \leq L_z$, $0 \leq y \leq L_y$) как в направлении оси z , так и в направлении оси y . За пределами зоны входа, в качестве коэффициента

расширения 1.06 была принята геометрически расширяющаяся сетка, в направлении оси z , так и в направлении оси y . Также в направлении осей, в качестве коэффициента расширения 1.06 была принята геометрически расширяющаяся сетка. Для проведения испытаний на автономность сетки использовались три расчётные сетки при помощи следующих распределений узловых пучностей в направлении осей z, y и x , соответственно : $50 \times 50 \times 80$ (грубая сетка), $70 \times 70 \times 100$ (сетка средней грубости) and $90 \times 90 \times 120$ (мелкая сетка). Максимальные разницы по скорости вдоль центральной линии (по оси x) между грубой и средней сетками и между средней и мелкой сетками составили соответственно 2и0.01%. Исходя из данных результатов, в данном исследовании была выбрана мелкая сетка при проведении всех расчетов. Эти расчеты были проведены при помощи модифицированного кода CALC-BFC. Решения были признаны сходящимися, когда максимальный остаток по всем уравнениям, приведенным к дискретному виду, составил не более, чем 10^{-4} [20].

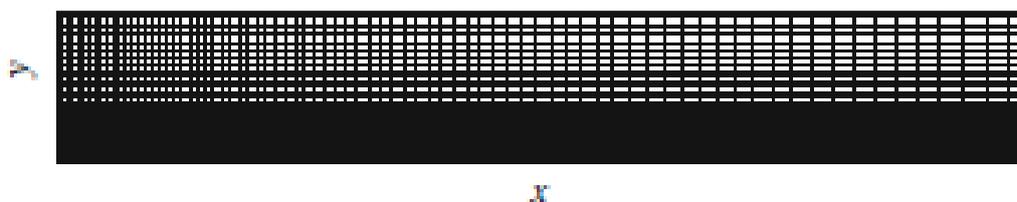
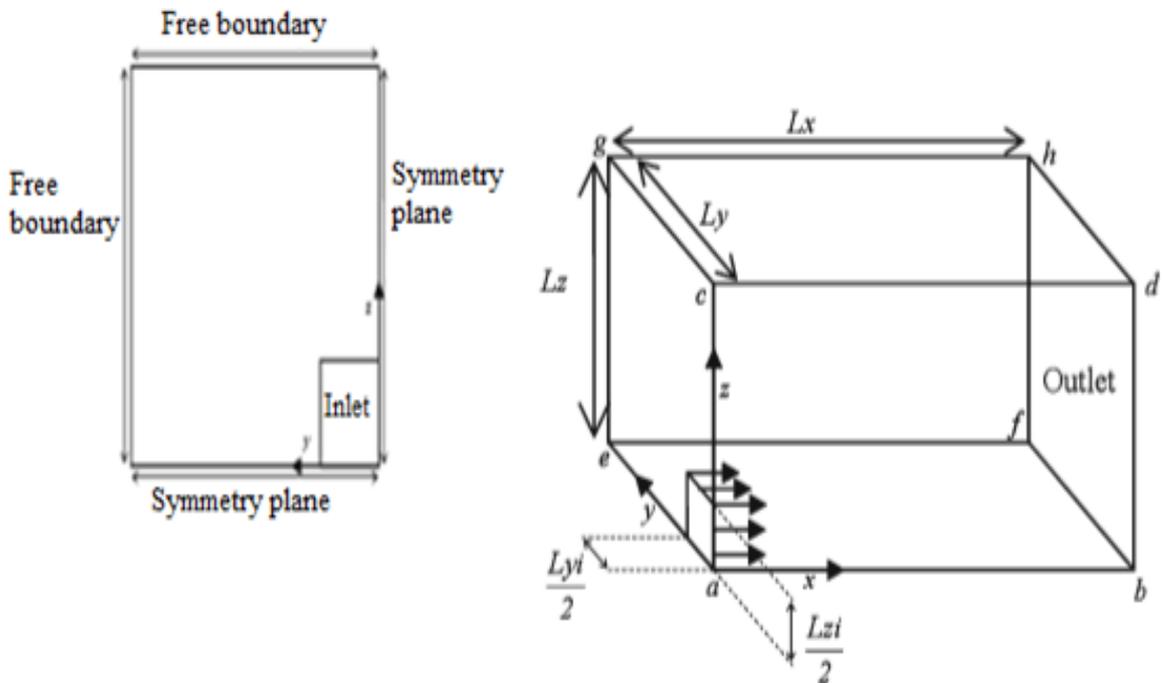


Рисунок 1–Сетка в плоскостях $x-y$

Рассматриваемые геометрические элементы, наряду с системой координат, изображены на рисунке 2. Турбулентная свободная струя выходит из вентиляционного отверстия прямоугольной формы размером $(2L_y \times 2L_z)$ в неподвижную окружающую среду. В данной работе, из-за симметрии, смоделирована только одна четверть зоны потока. Плоскости $z=0$ и $y=0$,

показанные на рисунке 2 являются плоскостями симметрии, в то время, как плоскость $x=0$ является сплошной стенкой, кроме площади вентиляции.



Freeboundary – свободная граница, Symmetryplane – плоскость симметрии,
Inlet - вход, Outlet – выход

Рисунок 2–Схемагеометрических элементов

Область вычислений была определена с размерами L_z , L_y и L_x в боковом направлении (z) в направлении поперек потока (y), и по потоку (x) соответственно. Поток истекает через открытую плоскость при $x=L_x$. Величины L_x в 100 раз больше гидравлического диаметра. Величины L_y и L_z , для приемлемых условий свободной границы, были выбраны в 20 раз длиннее гидравлического диаметра в направлении оси y и оси z . В пределах данной геометрической схемы, плоскости $e-a-b-f$ и $c-a-b-d$, являются плоскостями симметрии, а плоскость $b-d-h-f$ является точкой выхода с полностью сформированным пограничным состоянием. Плоскости $c-d-h-g$ и $e-f-h-$

являются плоскостями со свободной границей потока с постоянным давлением [21,22].

Входное сечение определено $x=0$ и состоит из двух зон: зона входа при $0 \leq y \leq L_y$, $0 \leq z \leq L_z$ и зона стены, определенная по остатку входного сечения. Значения числа Рейнольдса в данном численном исследовании приняты как:

$$Re = 800, 1600, 3200, 6400, 12800, 18000, 25600.$$

1.4 Пограничное состояние

Существует 5 различных видов границ, которые необходимо проанализировать: точка входа, стены, симметрия, точка выхода и граница увлечения (свободная граница потока).

Точка входа. В зоне входа, все переменные величины известны, при этом используются равномерная скорость и профиль температуры с двумя интенсивностями турбулентности ($I=0.05, I=0.01$). Энергия турбулентности на входе рассчитывается по формуле:

$$k_{in} = 1,5 I^2 u_{in}^2, \quad (11)$$

Степень рассеивания на входе рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{in} = (\rho c_\mu k^2) / (1,000 I \mu), \quad (12)$$

Стенка. $u=0, v=0$ (условие отсутствия скольжения), k, ε рассчитаны по пристеночной функции, у стенки приняты неизменные температурные условия (температура окружающей среды).

Симметрия. В плоскости симметрии, принимается нулевой нормальный градиент.

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \frac{\partial \omega}{\partial n} = 0, \frac{\partial k}{\partial n} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (13)$$

Точка выхода. На выходе потока, по осевому направлению принимается нулевой градиент.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0, \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad (14)$$

Внешняя граница увлечения (свободная граница потока).

Свободная граница потока вынесена подальше от входа в струю, чтобы давление было постоянным. При этом применены нулевые значения для k, ε , значение температуры принято считать температуру окружающего воздуха. При расчете поперечной составляющей скорости, параллельно или перпендикулярно свободной границе потока, принимается состояние нулевого градиента.

1.5 Результаты исследований и их обсуждение

1.5.1 Конфигурация потока в области исследования

Были получены и представлены на рассмотрение векторы скорости и вычислительные устройства для измерения потока. Векторы скорости в плоскости симметрии изображены на рисунке 3. На рисунке четко видно, что из-за возникновения пограничного слоя на границах потока, вторичный поток устремляется от свободных границ потока в сторону основного потока.

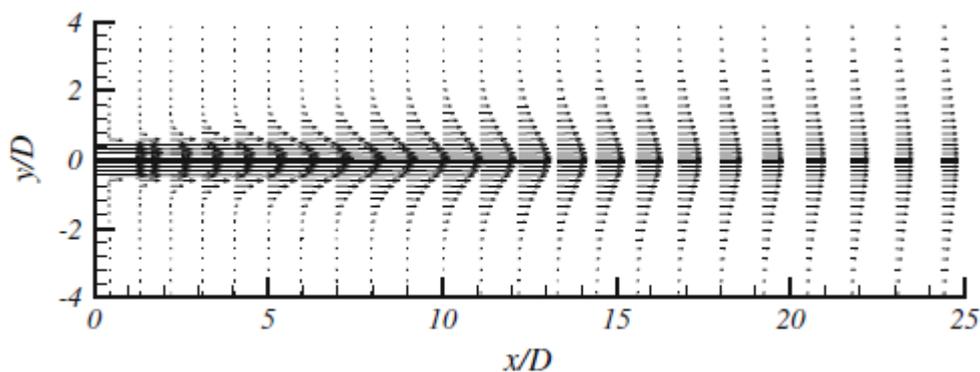


Рисунок 3—Векторы скорости в плоскости симметрии, $AR=1$

Контуры средней скорости потока в плоскости симметрии изображены на рисунке 4. Потенциальное ядро потока четко видно на рисунке 3.

Контуры поля скоростей показывают рассеяние потока под воздействием интенсивного сдвига пограничного слоя. Для дальнейшего изучения поля обтекания, необходимо провести анализ поля трансверсального потока. Следовательно, в некоторых местах вниз по потоку, используются поперечные срезы, под прямым углом к основному потоку.

Векторы скорости в этих местах показаны на рисунке 5. На поле видно, как происходит массовый перенос из области свободных границ в сторону основного потока. Из-за сильных касательных напряжений по границам потока, появляется другой поток, начинающийся от центральной линии потока и устремляющийся к его границам, который усиливает эффект размывания струи в бесконечную окружающую среду.

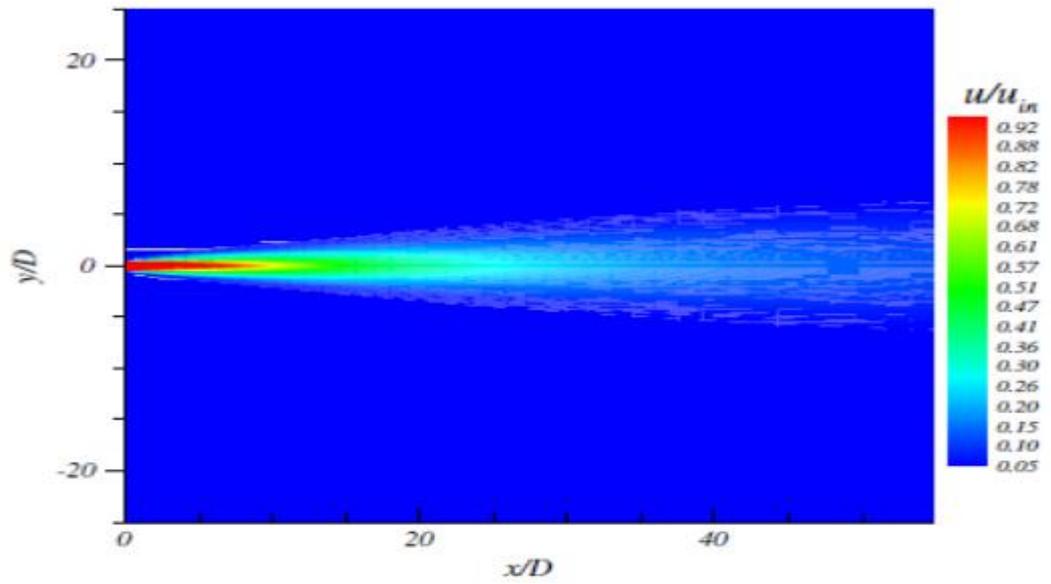
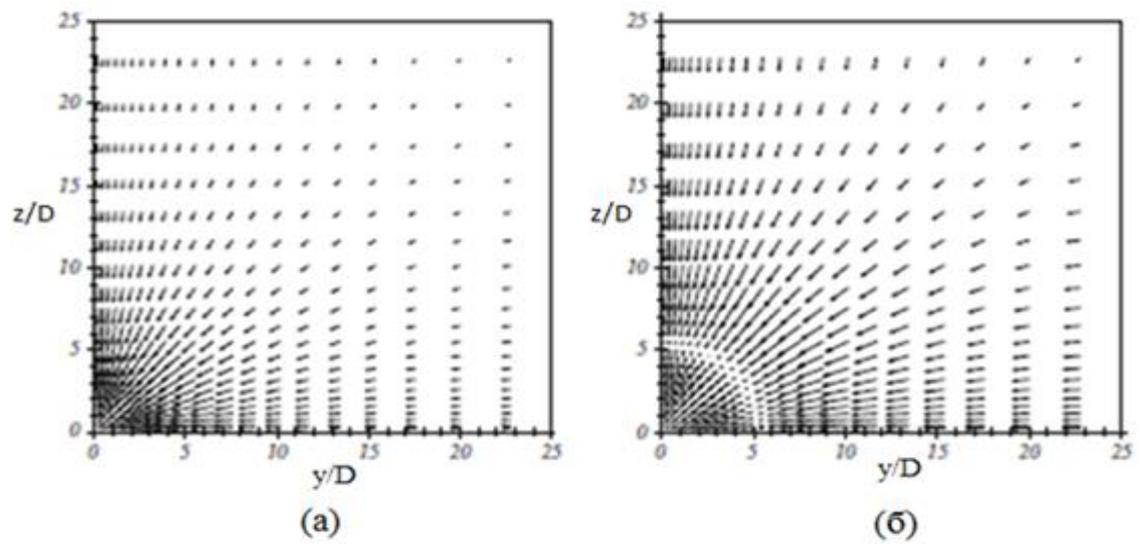
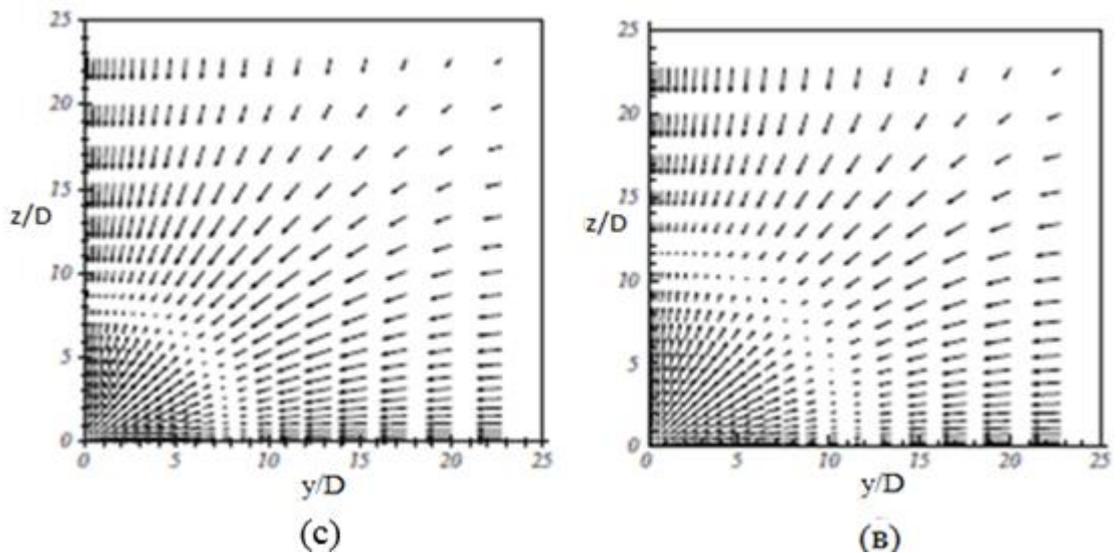


Рисунок 4—Контур скорости в плоскости симметрии, $AR=1$





а) $x/D= 20$, б) $x/D= 40$, с) $x/D= 60$, в) $x/D= 80$

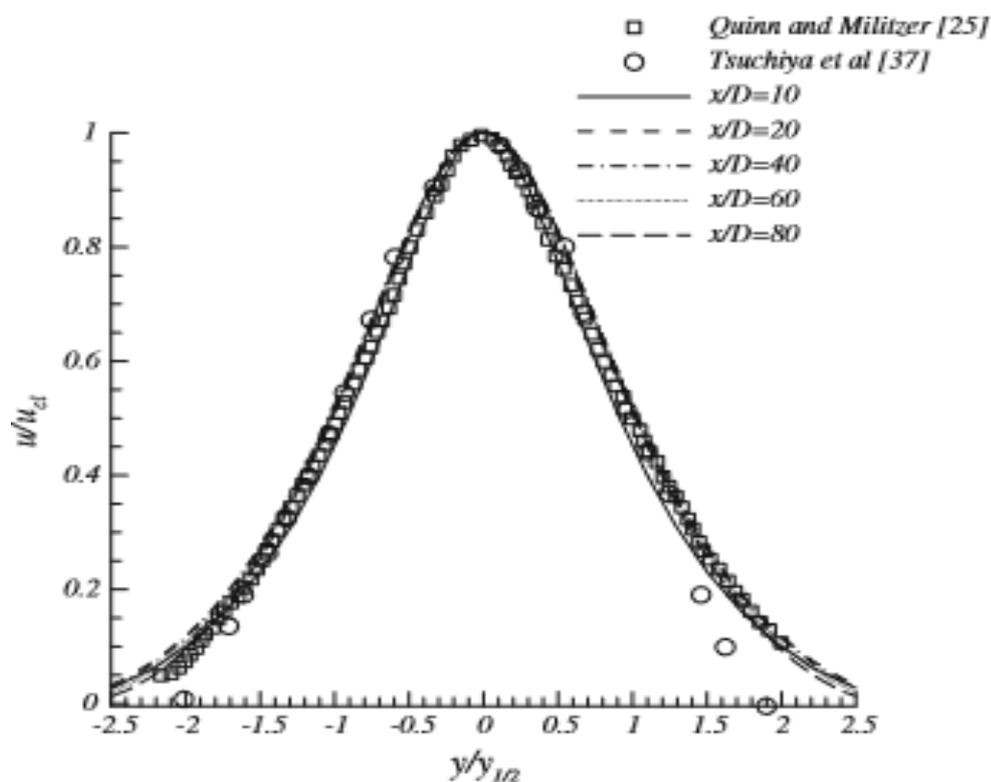
Рисунок 5—Поле обтекания в направлении поперек потока при значениях $x/D, AR= 1$

При этом скорость вторичного потока, текущего вдоль основного потока, будет уменьшаться. Двигаясь в направлении осей, струя прямоугольного сечения постепенно превращается в струю круглого сечения.

1.5.2 Результаты исследования струи прямоугольного сечения

На рисунке 6 изображены диаграммы нормализованной скорости при нескольких соотношениях x/D с полным принятием данного условия. Важно отметить, что решение методом подобия для расчета параметров потока основывается на данном условии. При этом следует понимать, что поток подобен сам себе в зоне полного развития после прохождения этой зоны. Исходя из имеющихся результатов, автомодельное распределение происходит после $x/D= 20$ при $I= 0.01$. Профили скорости нормализуются по отношению к локальной скорости по центральной линии потока, u_{cl} , в то время, как координата x , отсчитываемая в направлении потока, нормализуется по отношению D , а

поперечная координата y – по полуширине локального потока, $y_{1/2}$. Прогнозируемые продольные составляющие скорости показывают удовлетворительное совпадение с измерениями. Эта разница может быть отнесена к разнице в числе Re , поскольку экспериментальные данные были получены при другом числе Рейнольдса, которое превышало данное число Re . Это подтверждается Малстром и другими и Ми и другими сотрудниками, которые показали, что параметры потока изменяются по мере увеличения числа Re вплоть до достижения критического значения. В настоящей научной работе, те же самые результаты были получены при $I=0.05$ в дальней зоне, автомоделльное распределение появляется после того, как соотношение $x/D=10$ [23,24].

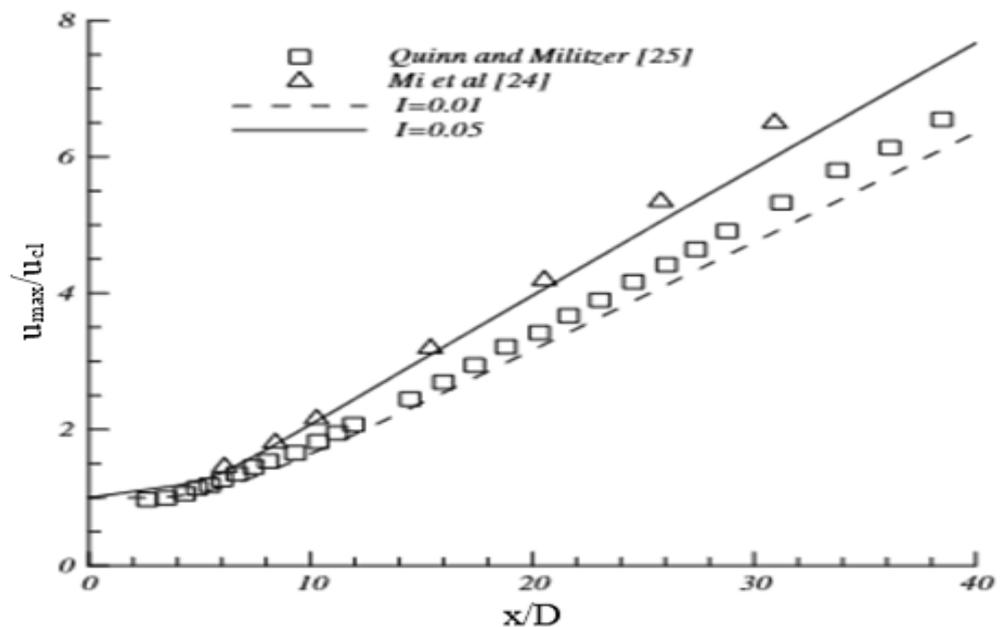


Quinn and Militzer (25) – КуинниМилитзер

Tsuchiya et al (37) – Цучия и другие

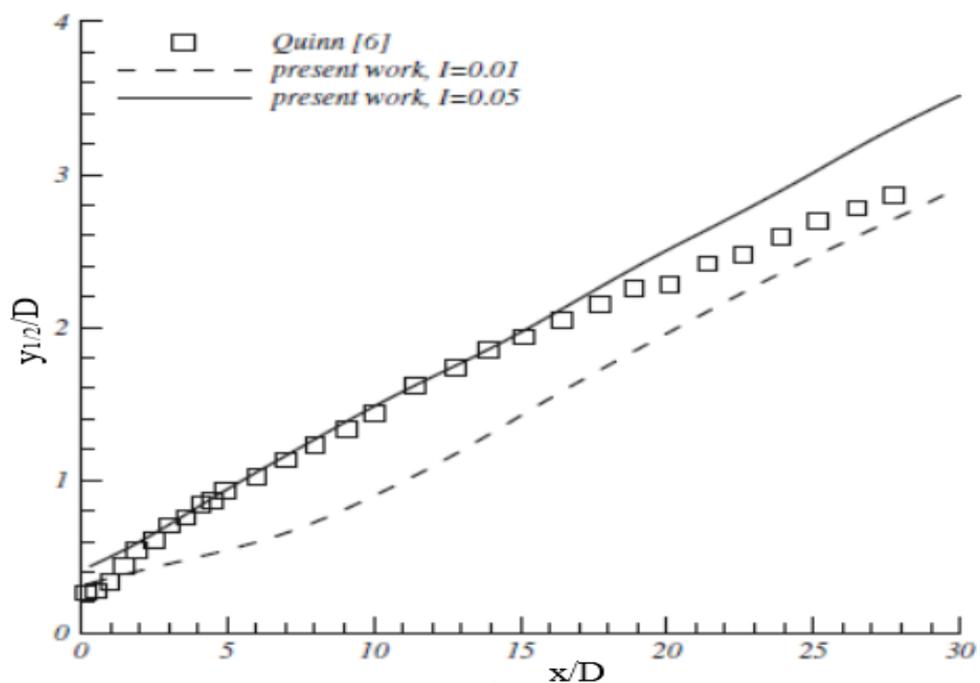
Рисунок 6 – Распределение средней величины w по вертикали, $AR=1$

На рисунке 7 демонстрируется сравнение ослабления потока в направлении по потоку по центральной линии скорости, u_c , при двух граничных условиях на входе, с измерениями, проведенными Куинн и Милтцер, а также Ми и другими сотрудниками. Рассматриваются два различных состояния границы входа потока. Из рисунка 7, видно, что развитие потока зависит от условий границы входа потока. На рисунке 8 изображено развитие потока в полуширину, $y_{1/2}$. $I=0.05$, с интенсивностью турбулентности на входе, что еще больше совпадает с проведенными измерениями [25].



Quinn and Miltzer (25) –Куинн и Милитцер, Ми и другие (24)

Рисунок 7–Сравнение падения скорости по центральной линии, AR= 1



Quinn (6) – Куинн, presentwork – данная научная работа

Рисунок 8–Распространение потока, AR= 2

На рисунке 9 изображена среднеарифметическая вертикальная или поперечная составляющая скорости, v , профили при $I=0.05$. После того, как $x/D > 10$, можно наблюдать тенденцию к автомодельному распределению. При рассмотрении другого условия границы входа потока, получены результаты для v , схожие с вышеописанными результатами. Но при $I=0.01$, автомодельное распределение появляется после того, как $x/D > 20$. Чем дальше от центра, тем величины v установятся более отрицательными, указывая на захват масс в поток. На границе области вычислений, величина v стремится к нулю. Профили w характеризуются сходным поведением.

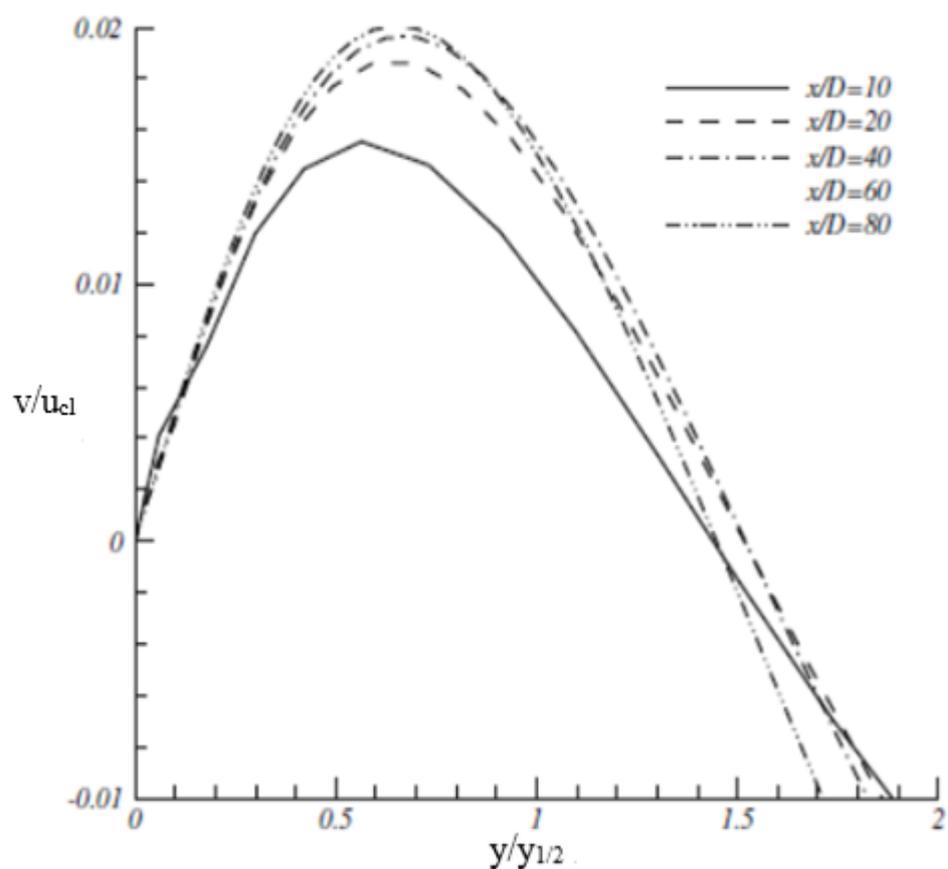


Рисунок 9—Распределение средней величины v при разных осевых место
расположениях, $AR=1$

Один из важных гипотетических допущений при принятии аналитического решения по вычислению двухмерных симметричных струй является постоянная импульса струи по направлению потока. Это гипотетическое допущение изображено на рисунке 10 для струи квадратного сечения, которое показывает, что для вариации нормализованного импульса в направлении координатной оси x , импульс следует считать постоянной величиной. Таким образом, этот рисунок подтверждает предположение о постоянном импульсе для струй со свободными границами в аналитических решениях.

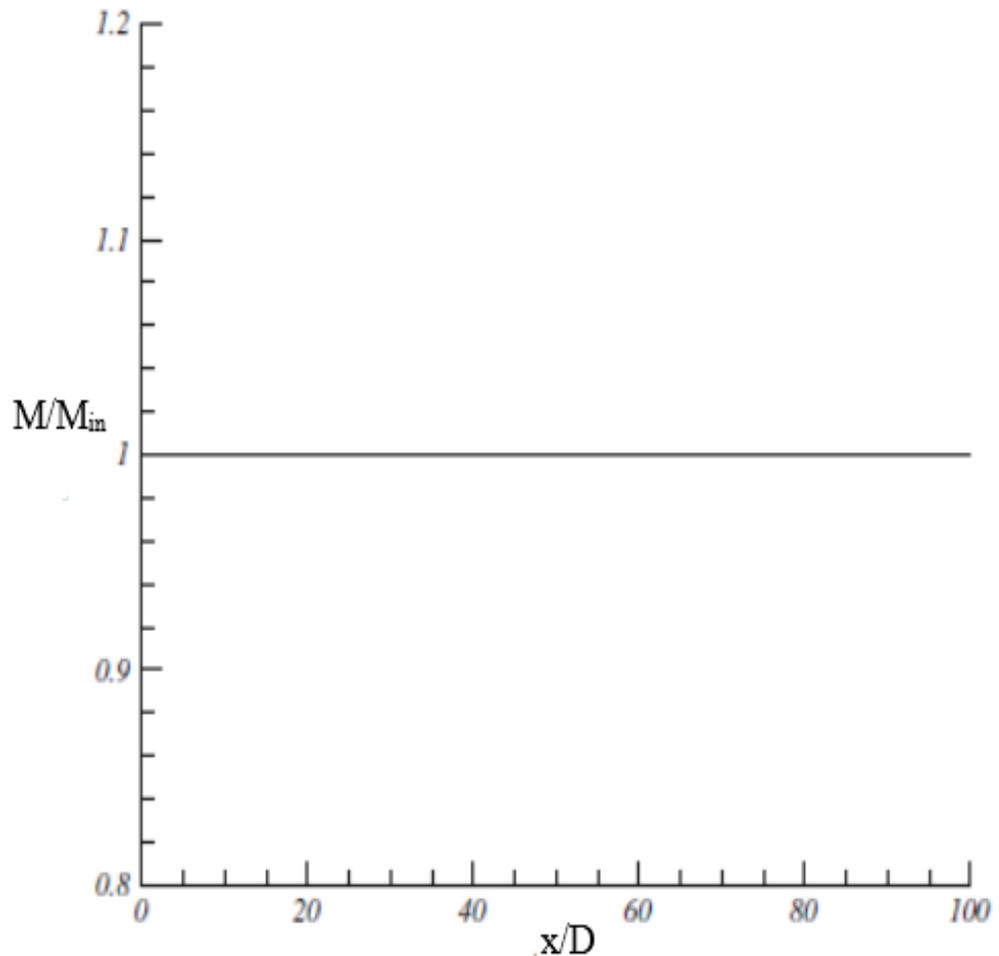


Рисунок 10–Нормализованный импульс в направлении координатной оси x

1.5.3 Изменение числа Рейнольдса

Кляйн и другие провели анализ плоского струйного потока при помощи прямого численного моделирования в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Результаты показали, что когда число $Re < 6000$, Re оказывает значительное влияние на развитие потока, но при этом поток приближается к состоянию сужения при больших числах Рейнольдса. Ми и другие и Малстром и другие также поддерживают эту идею внеосесимметричных струях[26].

В отношении влияния чисел Рейнольдса, исследователи отмечают, что поток сам по себе не является независимым от числа Рейнольдса, но

приближается к состоянию сужения при $Re=12800$, по крайней мере в той степени, насколько рассматривается в данной научной работе. Мы получили такую же степень изменения в отношении числа Рейнольдса при использовании двух различных параметров потока на входе при $Re > 12800$. Но когда число Рейнольдса равняется 800, модель $k-\varepsilon$ не согласовывается с результатами исследований Миллера и других. На рисунке 11 изображено схождение потока в месте ослабления по центральной линии при числах $Re > 12800$.

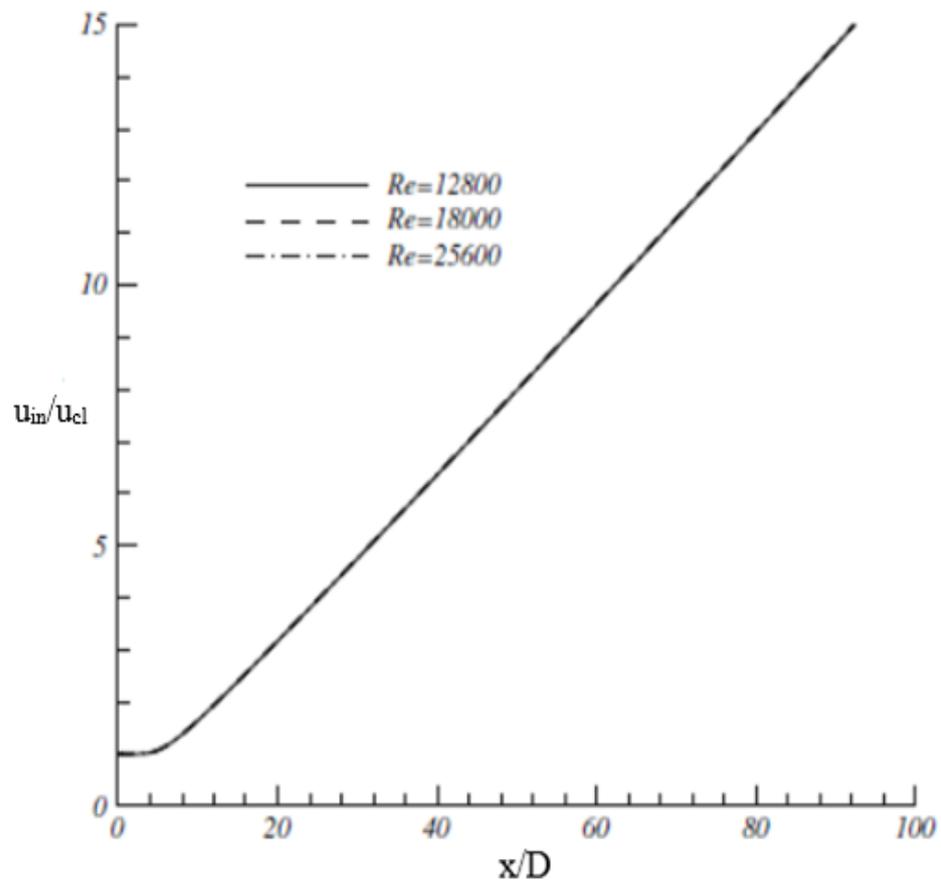


Рисунок 11—Падение скорости при различных числах Рейнольдса

1.5.4 Влияние интенсивности турбулентности на входе

В области входа, рассматривались два различных состояния интенсивность турбулентности на входе: $I=0.05$ или $I=0.01$. Было отмечено, что модель $k-\varepsilon$ при $I=0.01$ не согласуется с экспериментальными данными. Данная

интенсивность турбулентности предопределяет падение скорости потока по центральной линии, эволюцию полуширины струи и захват потоком, которые оказались меньше, чем измеренные значения в результатах экспериментов. При этом, такая же картина наблюдается на расстоянии, большем, чем ожидалось. А с другой стороны, в модели $k-\varepsilon$ при $I=0.05$, были получены результаты, которые, к счастью, совпали с результатами экспериментов. Но обе вышеупомянутые модели оказались неспособными предопределить истинные характеристики плоской струи при низких числах Рейнольдса. Также характер распространения и и при двух различных условиях на входе остался тем же самым в дальней зоне.

Как показано на рисунке 7, можно заметить разницу между результатами, которые удалось получить по итогам данной научной работы с базовыми условиями во входном сечении потока ($I=0.01$) и ранее проведенными экспериментальными исследованиями. Результаты отличаются друг от друга в основном из-за разной формы сопла, используемого при проведении экспериментов.

В экспериментальном исследовании, свободная струя может вытекать из трубы, из сопла, постепенно уменьшающим форму струи по направлению вверх по потоку от плоскости выходного сечения сопла или из отверстия с острыми краями. Конечно, эти три различные условия потока на выходе ведут к различным сценариям развития в направлении вниз по потоку от сопла или плоскости выходного сечения отверстия. В зависимости от требований к условиям эксплуатации, где используются струи, можно использовать одно из трех вышеописанных возможных условий потока на выходе [27].

В соответствии с ранее проведенными экспериментальными исследованиями, свободная струя, вытекающая из сопла со специально профилированной расширяющейся частью, имеет равномерный средний профиль скорости в направлении потока в плоскости выходного сечения, но отверстие с острыми краями характеризуется неоднородным средним

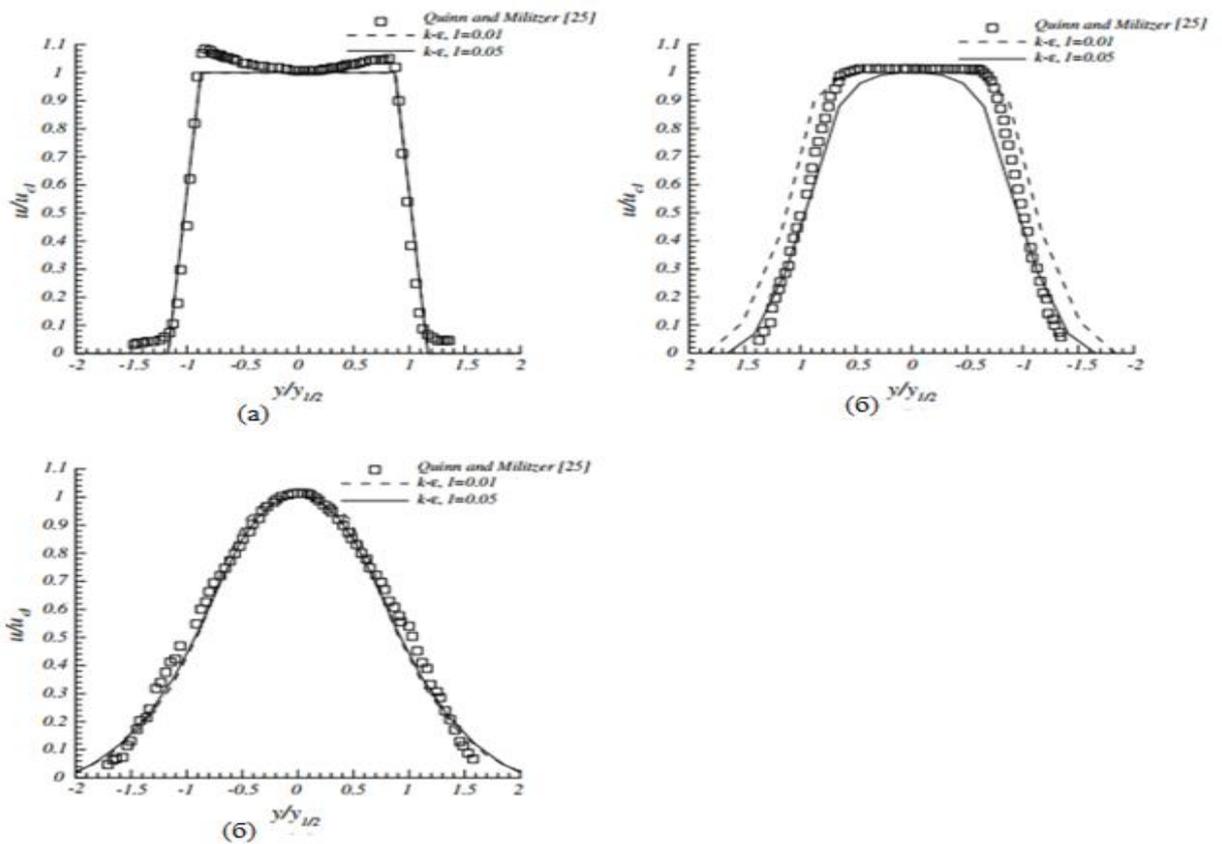
профилем скорости в направлении потока в плоскости выходного сечения. Эффект местного сужения потока, приводящий к ускорению струи по мере приближения к плоскости выходного сечения, четко прослеживается в струе, вытекающей из отверстия с острыми краями, но данный эффект отсутствует в струе из сопла со специально профилированной расширяющейся частью. Также средний профиль скорости в направлении потока из отверстия с острыми краями имеет очевидную седло видную форму, в то время, как профиль скорости потока, вытекающего из сопла со специально профилированной расширяющейся частью, отличается абсолютно плоской формой в ближней зоне наблюдения. Падение скорости по центральной линии потока, вытекающего из сопла с острыми краями намного превышает падение скорости потока, вытекающего из сопла со специально профилированной расширяющейся частью. При исследованиях множества неплоских и некруглых струй, использовались дроссельные пластины с острыми кромками в связи с простотой их расчета и изготовления[28].

В данной научной работе, рассматривались условия равномерной скорости и профиль интенсивности турбулентности в области входа в поток. Как видно, равномерный профиль скорости в области входа в поток, моделирует поток, вытекающий из сопла со специально профилированной расширяющейся частью, а не из сопла с острыми краями. Таким образом, разница между представленными результатами (исходя из базовой интенсивности турбулентности на входе, $I = 0.01$) и ранее проведенными экспериментами, возникает из-за сопла с острыми краями. В сопле со специально профилированной расширяющейся частью, u_{\max} находится непосредственно в области входа, а в сопле с острыми краями, из-за эффекта местного сужения потока, u_{\max} находится на значительном расстоянии от области входа.

Одной из причин появления разницы между ранее проведенными экспериментами и представленными результатами, изображенными на рисунке 7 является наличие эффекта местного сужения потока, который

становится причиной другого места расположения u_{\max} . Эффект местного сужения потока четко отслеживается в проведенных экспериментах, в то время, как в данном научном исследовании этого эффекта не наблюдается, потому, что моделируется свободная струя, вытекающая из сопла со специально профилированной расширяющейся частью. Део и другие доказал, что струя, вытекающая из сопла со специально профилированной расширяющейся частью, отличается меньшей степенью падения скорости потока по сравнению со струей, вытекающей из сопла с острыми краями из-за разных условий потока на входе.

В некоторых исследованиях проводился анализ эффекта интенсивности турбулентности на входе. В соответствии с результатами настоящих и ранее проведенных исследований, с увеличением интенсивности турбулентности на входе, тем короче статическое ядро потока, тем длиннее становится центральная линия и рассеяние потока. При увеличении интенсивности турбулентности на входе, результаты исследований согласуются с экспериментальными данными, потому, что осредненная интенсивность турбулентности на входе в сопла с острыми краями превышает этот показатель, измеренный в центре входной зоны[29,30].



Quinn and Militzer (25) – Куинн и Милитцер

Рисунок 12—Профили скорости в направлении по потоку в центральной плоскости x —удля струи квадратного сечения. а) $x/D= 0.280$, б) $x/D= 1.121$,
 в) $x/D= 2.658$

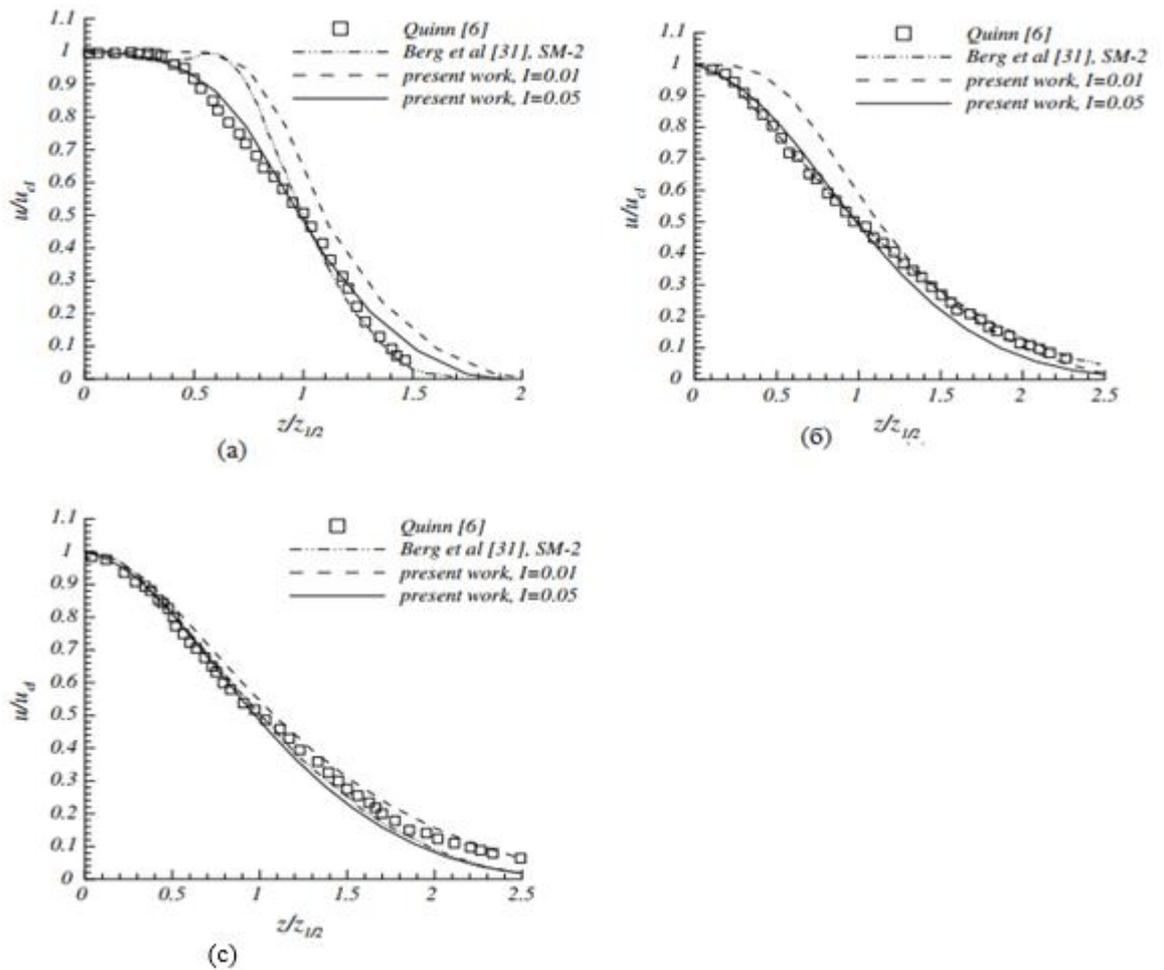
В экспериментах, проведенных Куинн и Милитцер, интенсивность турбулентности в центре плоскости выходного сечения сохранялась на уровне 0.5%. Но результаты, полученные при ранее проведенных исследованиях, показывают, что интенсивность турбулентности в области пограничного слоя может достигать величин, превышающих 0.5%. в 20, а тои в 30 раз. Основная идея в использовании большей интенсивности турбулентности в зоне входа состоит в том, что интенсивность турбулентности на входе в сопла с острыми краями имеет седло-видную форму, таким образом, осредненная интенсивность турбулентности на входе превышает величины, характерные для центральной зоны входа. На рисунке

12, изображена нормализованная скорость в ближней зоне сопла. Основная разница между результатами, полученными после проведения данного научного исследования и экспериментальными данными состоит в том, что профиль скорости, полученный в данном исследовании, имеет форму шляпы, в то время, как после проведения эксперимента, получился профиль скорости в форме вдавленного седла. Эффект интенсивности турбулентности на входе не проявляется в зонах, находящихся поблизости от сопла. На некотором расстоянии от сопла, высокая степень турбулентности на входе приводит к появлению более сжатого профиля скорости. Схожие результаты были получены Део и другими [31].

В данном исследовании использовался профиль равномерной скорости в зоне входа. Следовательно, эффект местного сужения потока исчезает в ближней зоне, а седло видный профиль скорости отсутствует в этой зоне. Вместо этих двух явлений в ближней зоне наблюдения, можно легко обнаружить профиль скорости в форме шляпы и область статического ядра потока, характеризуемых постоянной скоростью $u_{cl}/u_{in}=1$. Хотя по высоким степеням турбулентности невозможно точно спрогнозировать длину статического ядра, недавние исследования статического ядра согласуются с экспериментальными данными.

Для сравнения с результатами, полученными при создании модели $k-\varepsilon$, результаты данного научного исследования сравнили с результатами, полученными группой Берга. На рисунке 13, на основе данных, полученных группой Берга, кривая SM-1 является результатом расчета модели $k-\varepsilon$ с профилем равномерной скорости в зоне входа и кривая SM-2 является результатом расчета модели $k-\varepsilon$ модель с профилем скорости в зоне входа, который согласуется с экспериментальными данными, полученными Куинн. В обеих схемах, за степень турбулентности принимается значение $I=0.005$. Итоги работы, проведенной Бергом и другими (SM-2) хорошо согласуются при сравнении величин $I=0.01$ и $I=0.005$, потому, что в экспериментах, проведенных Куинн, использовалось сопло с острыми краями. Из-за

использования сопла с острыми краями, профиль скорости в зоне входа получился неравномерным, отсюда, как и предполагалось результаты работы, проведенной Бергом и другими (SM-2) больше совпадают с экспериментальными данными, полученными Куинн по сравнению с равномерным потоком с величинами $I=0.01$ и $I=0.005$.



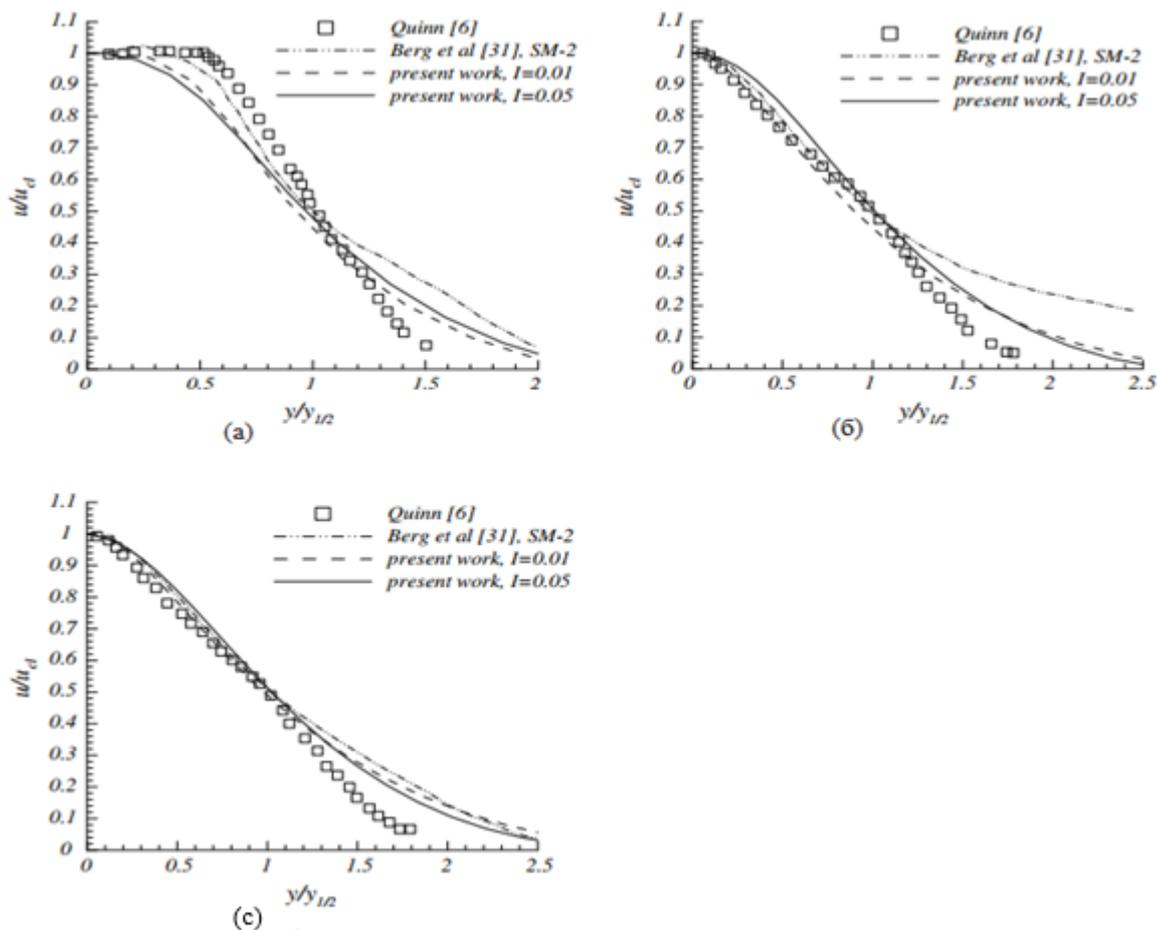
Quinn (6) – Куинн

Berg et al (31) –Берг и другие

Presentwork – представленная работа

Рисунок 13–Профили скорости в направлении по потоку в центральной плоскости $x-z$. а) $x/D= 2$, б) $x/D= 5$, с) $x/D= 10$

На рисунке 13 и 14 показан нормализованный профиль скорости в двух плоскостях. Результаты экспериментов показывают, что профиль скорости по всей длине прямоугольника не имеет форму седла, но результаты работы, проведенной группой Берга (SM-2) предопределяют появление седловидного профиля поблизости от сопла (Рис. 13а). Как видно из рисунка 13б, с, а также рисунка 14с, нет никакой разницы между результатами, полученными в данном исследовании и результатами работы, полученными Бергом и другими (SM-2). При повышении степени турбулентности, нельзя спрогнозировать седловидный профиль в непосредственной близости от сопла, как показано на рисунке 14а. Также, результаты данного исследования при $I = 0.05$ показывают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, приведенными на рисунке 14б, в отличие от результатов, полученных группой Берга (SM-2).



Quinn [6] – Куинн,
 Bergetal [31],SM-2 – Берг и другие,
 Presentwork, I=0.01- представленная работа
 а) $x/D= 2$, б) $x/D= 5$, с) $x/D= 10$

Рисунок 14–Профили скорости в направлении по потоку в центральной плоскости x – y

На рисунке 15показано развитие потока в полуширину, $y_{1/2}$. $I= 0.05$, степень турбулентности потока на входе больше совпадает с измеренными величинами. Рассеивание струи является одной из ее важных характеристик, зависящей от условий на входе. Как видно из рисунка 15, выводы, сделанные

в представленной работе при $I=0.05$ показывают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, полученными Куинн. При сравнении результатов работы, проведенной группой Берга (SM-2) с выводами, сделанными в представленной работе при $I=0.05$, увеличение степени интенсивности турбулентности в зоне входа или использование седловидного профиля интенсивности турбулентности, является таким же важным техническим решением, как и использование профиля, согласующегося с экспериментальными данными. Но преследование цели согласования профиля с каждым экспериментом для прогнозирования характеристик потока неэффективно. Другими словами, в каждом случае придется рассчитывать новый профиль. Использование более высоких степеней турбулентности является общепринятым способом прогнозирования любых видов потока.

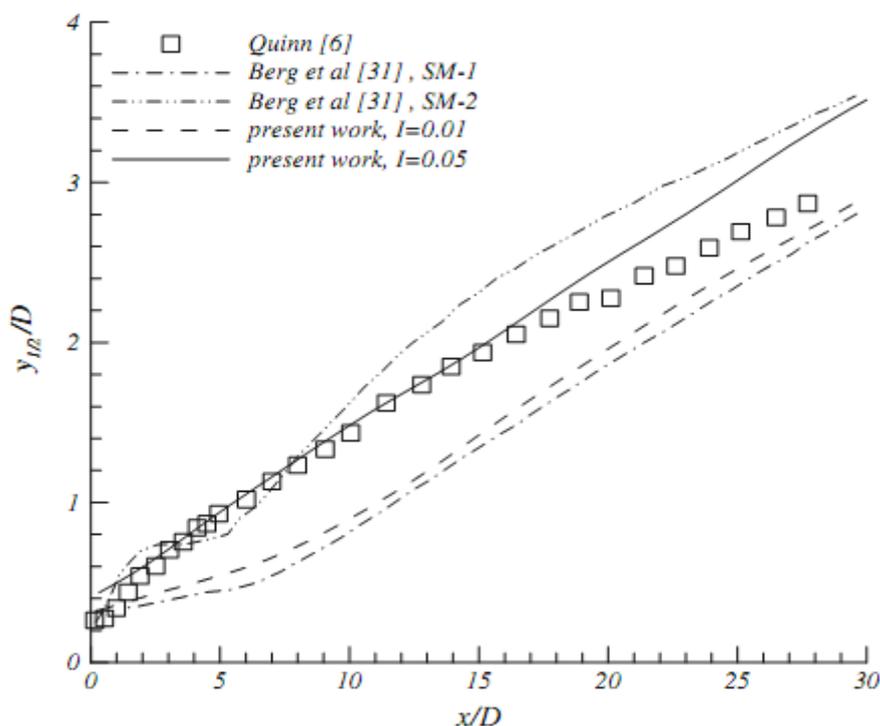


Рисунок 15—Картина распространения струи, соотношение сторон $AR=2$

1.5.5 Тепловые характеристики

Граничные условия по температуре, а также по скорости, определены в Части 3. Температура стенки и зоны свободной границы потока равняется температуре окружающего воздуха. В плоскости симметрии, для расчетов принят нулевой нормальный градиент, а в выходном сечении вдоль осевого направления принят нулевой градиент. В зоне входа рассматривается профиль равномерно распределенной температуры. Разница между температурой на входе и температурой окружающего воздуха составляет 40°С, что позволяет не учитывать гидростатический эффект.

Уравнение автомодельности для расчета полей температур и скоростей тесно связано с плоской струей [32].

$$\frac{T - T_{\text{inf}}}{T_{cl} - T_{\text{inf}}} = \left(\frac{u}{u_{cl}} \right)^{\text{Pr}t}, \quad (15)$$

Также, при создании $k-\varepsilon$ модели, мы имеем дело со схожими безразмерными профилями температур и скоростей в полностью развитой зоне под влиянием турбулентного числа Прандтля. Например, нормализованная скорость и температура при соотношении $x/D = 80$ показаны на рисунке 15. При использовании аналитического решения получаются те же результаты для плоской струи. На рисунке 15, величина $yt_{1/2}$ – это полуширина тепловой локальной струи.

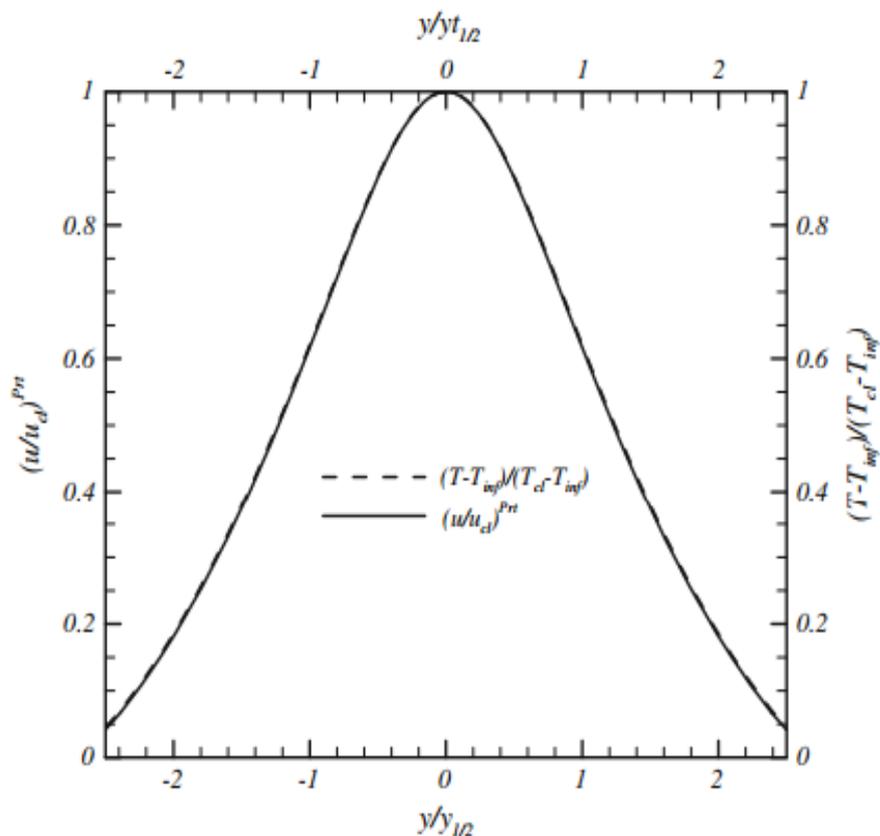


Рисунок 16–Нормализованные значения температуры и скорости при соотношении $x/D=80$ с учетом влияния числа Прандтля

Было установлено, что на расстоянии от выходного сечения сопла, поля температур и скоростей ведут себя одинаково. Было обнаружено, что диффузия массы и тепла происходит гораздо быстрее, чем распространяется импульс. Иначе говоря, профиль температуры оказался шире профиля скорости, поэтому распространение поля температуры происходит в большей степени по сравнению с полем скорости. Также, длина статического ядра зоны температуры короче длины статического ядра зоны скорости. В случае незначительной разницы по температуре, считается, что поле температуры будет вести себя также, как и любое пассивное поле скалярных величин[33].

Обнаружено, что падение температуры по центральной линии будет происходить также, как и падение скорости; ближе к точке истечения струи находится зона статического ядра, где $T_c/T_{in} = 1$, здесь начинается падение

температуры по центральной линии. На рисунке 16 и 17 приводится подробная информация, описывающая сравнение характеристик полей температур и скоростей.

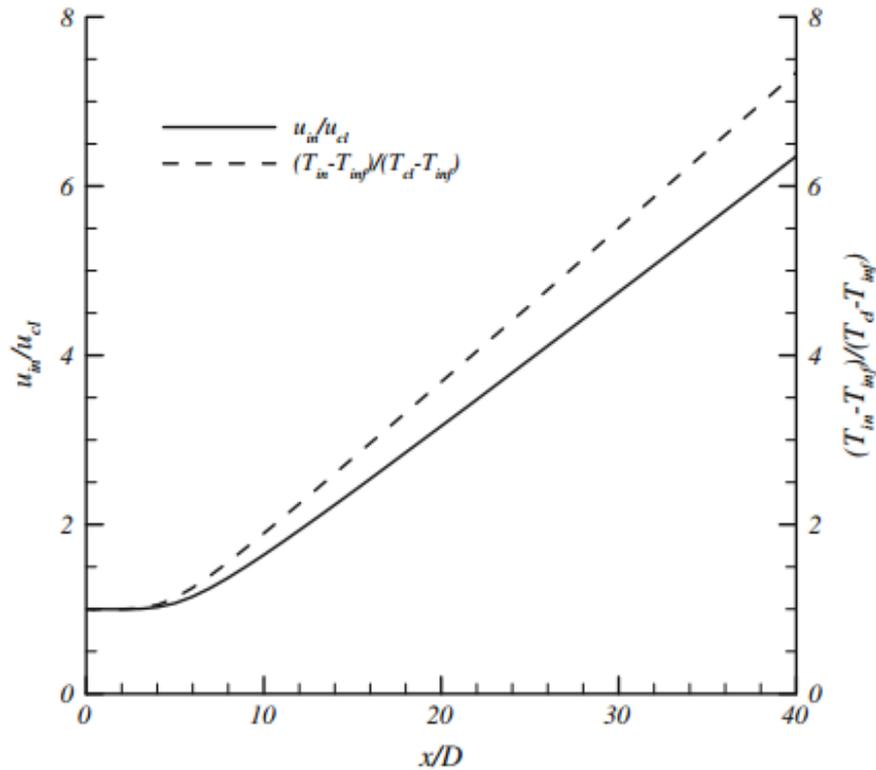


Рисунок 17—Падение температуры и скорости по центральной линии, соотношение сторон $AR=1$

В результате множества экспериментальных исследований было установлено, что даже для простых потоков нет универсальных значений Pr_t . Как отмечено в работе, применение переменного турбулентного числа Прандтля не изменяет последствия смешивающихся струй. Парк и другие использовали число $Pr_t=0.9$ для моделирования смешивающихся плоских струй. Хабли и другие использовали число $Pr_t=0.95$ для моделирования свободной осесимметричной струи. Поп сравнил профили скорости и температуры в автомодельной зоне плоской спутной струи с турбулентным числом Прандтля, заданным на значение $Pr_t=0.7$, и пришел к выводу, что

результаты измерений согласуются с экспериментальными данными. Во всех ранее проведенных исследованиях свойств струи, турбулентное число Прандтля принималось как число, меньше единицы. Поэтому, в представленном вашему вниманию исследовании, за турбулентное число Прандтля было принято значение $Pr_t = 0.72$. На рисунке 15 изображено влияние турбулентного числа Прандтля. При изменении значения турбулентного числа Прандтля, кривая, изображенная на рисунке 15, не изменяется. Также профили скорости и температуры попадают на одиночную кривую в зоне автомодельного распределения. С увеличением значений турбулентного числа Прандтля, в зоне температуры наблюдается увеличение длины статического ядра, уменьшается рассеяние и степень падения температуры по центральной линии [34-37].

1.5.6 Сравнение различных соотношений сторон

В данном разделе, мы приводим сравнение характеристик потока в струях прямоугольного сечения с соотношением сторон $AR = 1-4$. На рисунке 18 изображено падение нормализованной скорости по центральной линии струи при различных соотношениях сторон. В соответствии с рисунком 18, степень падения нормализованной скорости при соотношении сторон $AR = 1$ выше по сравнению с другими пропорциями. Ми и другие приводит доказательства, что увеличение степени падения скорости по центральной линии тесно связано с нарастающим эффектом смешивания турбулентных струй.

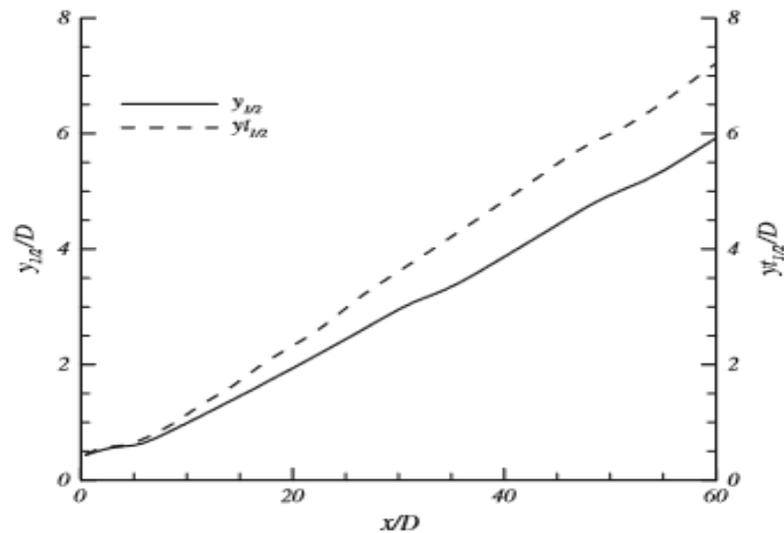


Рисунок 18—Распространение поля температур и скорости в направлении координатной оси y , соотношение сторон $AR = 1$

Также, было сделано сравнение степени увлечения потоком по направлению координатной оси. Увлечение потоком показывает эффективность перемешивания в струе. На рисунке 14 изображены скорости увлечения потоком, исходя из расчета соотношения нормализованного чистого притока массы $(Q - Q_{in})/Q_{in}$ при различных соотношениях сторон AR , где Q_{in} – это расход вещества из струи прямоугольного сечения, а Q – это суммарный расход вещества в точке расположения величины x в направлении по потоку. На Рис. 19, изображена струя с соотношением сторон, равным единице, характеризующаяся большей степенью увлечения потоком из окружающей среды в струю. При этом увеличение соотношения сторон приводит к уменьшению скорости увлечения. Следовательно, можно утверждать, что степень увлечения потоком при соотношении сторон $AR=1$ оказывается большим по сравнению с другими соотношениями, и что соотношение сторон $AR=1$ является более эффективным по сравнению с другими соотношениями.

На рисунке 20 изображено распространение струи в направлении координатных осей u_{iz} -при различных соотношениях сторон AR . Как видно

из этого рисунка, картины распространения струи в дальнем поле при различных соотношениях сторон почти одинаковы. (рис. 21).

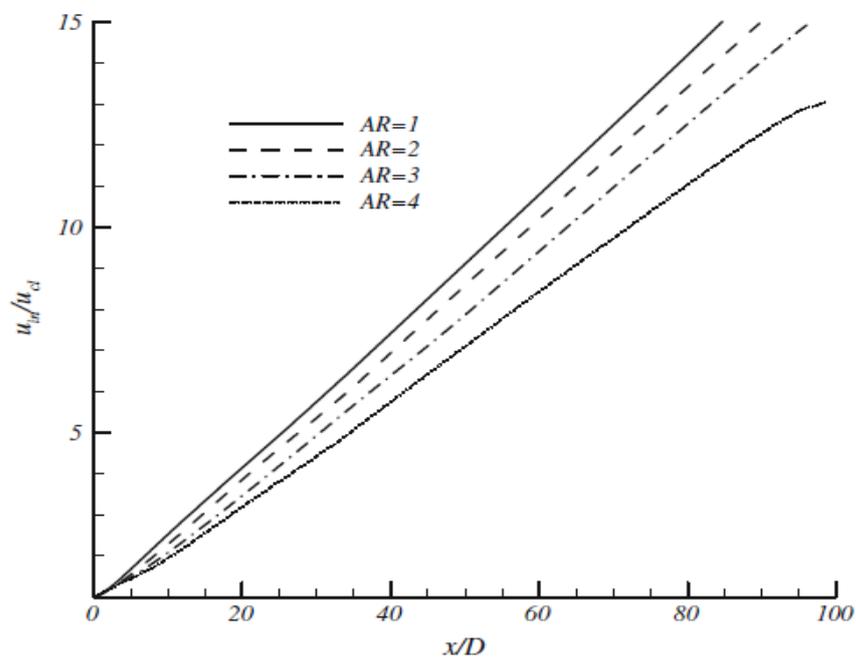


Рисунок 19—Падение нормализованной скорости по центральной линии

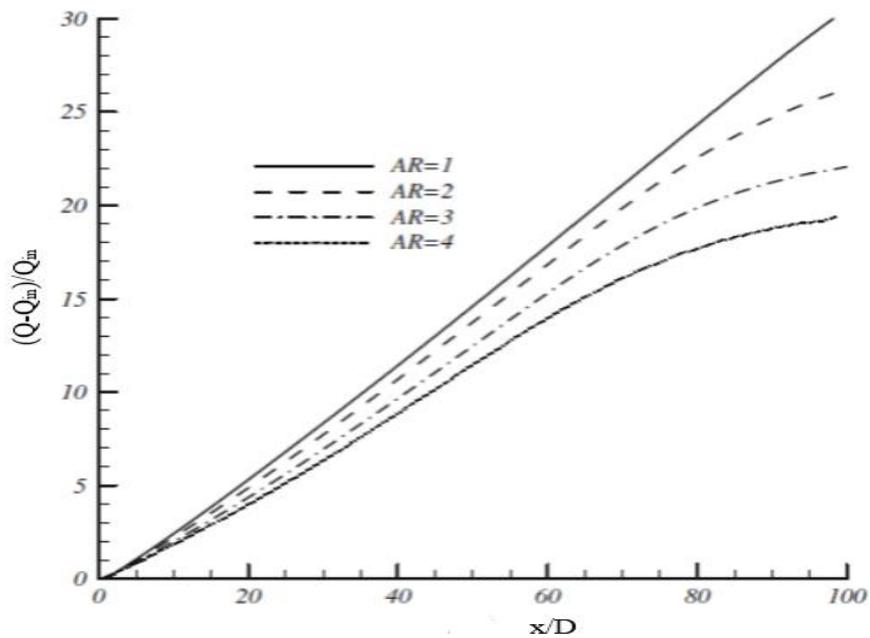


Рисунок 20—Увлечение потоком

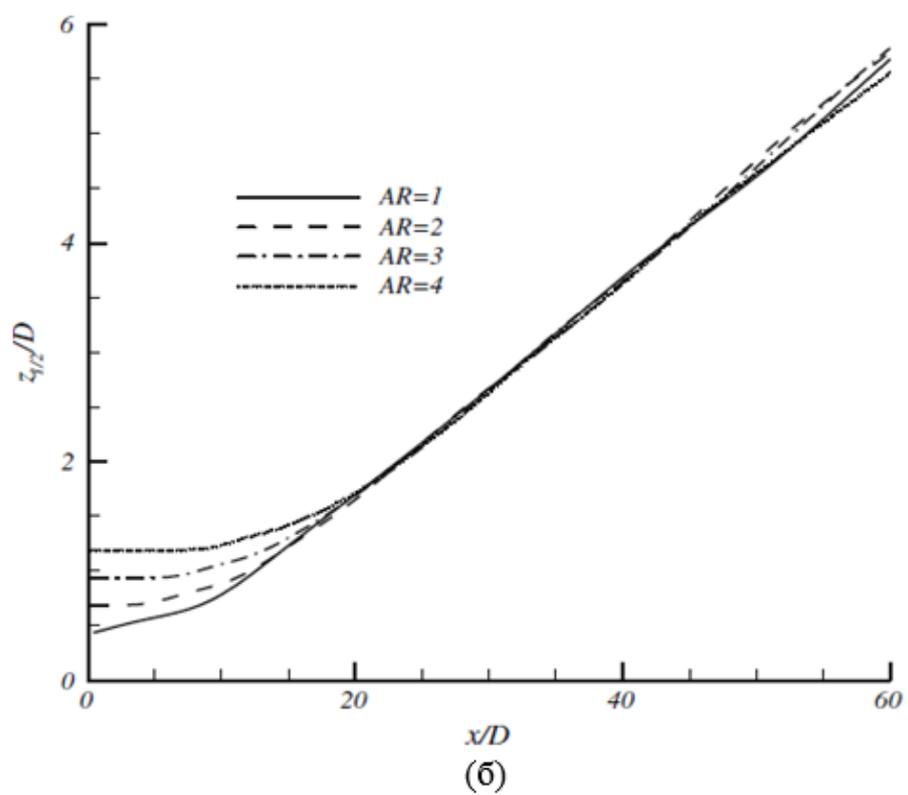
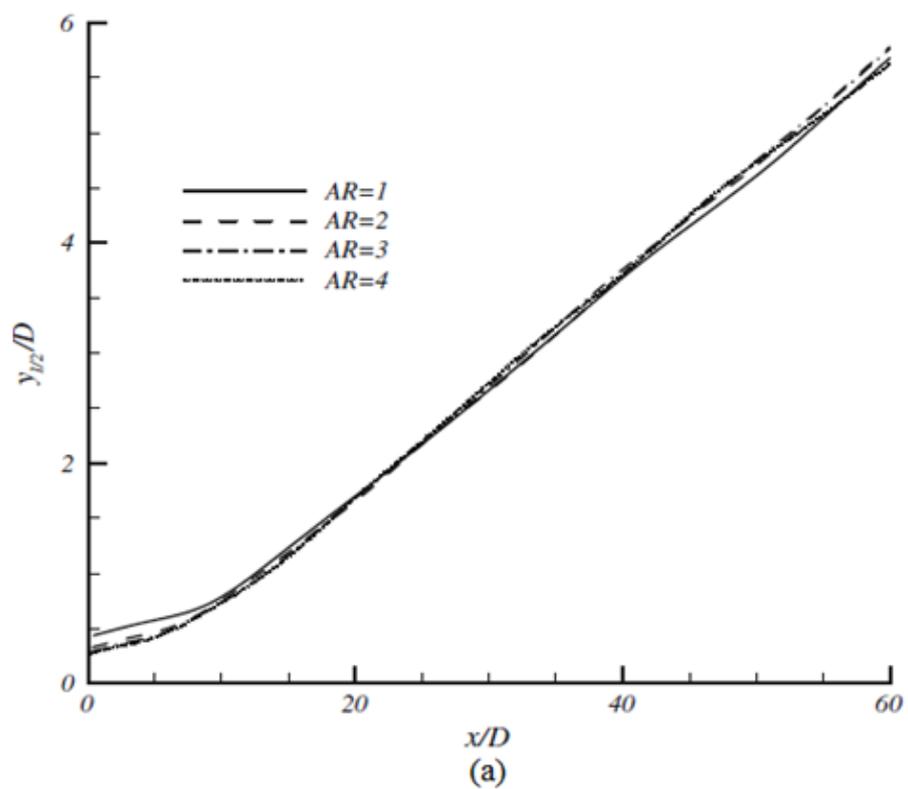


Рисунок 21–Картина распространения, а в направлении координатной оси
 б в направлении координатной оси z

1.6 Заключение по краткому обзору основной работы

В данной работе описывается численное исследование текучей среды и тепловые свойства турбулентной струи прямоугольного сечения с соотношением сторон $AR=1-4$. Представлены поля скоростей и температур. Также, проведен анализ влияния числа Рейнольдса на степень смешивания струй прямоугольного сечения. Влияние на эволюцию развития струи определено при числах $Re < 12800$. Кроме этого, при высоких числах Рейнольдса струя стремится к сужению.

При исследовании зоны входа, рассматривались две различные степени турбулентности: $I=0.05$ и $I=0.01$. Моделирование показало, что результаты измерения поля скоростей совпадают с экспериментальными данными, за степень турбулентности набегающего потока принимается значение $I=0.05$. По результатам исследования обеих степеней турбулентности набегающего потока, оказалось невозможным спрогнозировать параметры струи прямоугольного сечения при малых числах Рейнольдса.

Также, уравнения автомодельности для расчета полей температуры и скорости тесно связаны друг с другом. При сравнении степени увлечения потоком, при соотношении сторон, равным единице, получается большая степень увлечения потоком из окружающей среды в струю, по сравнению с другими соотношениями, следовательно, соотношение сторон $AR=1$ является более эффективным при смешивании. В дальнем поле наблюдения, все струи, подвергшиеся исследованию, сошлись в струю круглого сечения. Разницу в характере распространения струи в дальнем поле наблюдения не удалось определить, при всех соотношениях сторон AR , все струи имеют примерно одинаковый характер распространения.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

2.1 Экспериментальная установка для исследования аэродинамики свободной струй

Опыт проводился с помощью оборудования, показанного на рисунке 22.

Воздух, выходящий из вентилятора (1), через виброгасящий переход (2) поступает в камеру покоя (3), затем через (4) и (5) решетки вытекает из сопла (6) с выходным профилем прямоугольной формы.

Корневая часть струи располагалась в рабочей части теневого прибора ИАБ-451, оборудованного так, что можно было наблюдать теневую мгновенную картину течения.

Воздействие на поток осуществлялось с помощью динамики мощностью 50 Вт (7), фронтально размещенного на исходном участке потока в успокоительной камере.

Отзвукового генератора (13) к динамику подается синусоидальный сигнал, в связи с чем в исходном изображении струи образуются синусоидальные колебания скорости на выбранной частоте.

Для измерения динамического давления и средней скорости течения в сопле применялись трубка Пито и микроманометр марки ММН-240 (9). Микроманометр позволяет измерять даже малые скорости с точностью до 3%. Интенсивность турбулентности ε_0 течения на выходе из сопла, оцениваемая по пульсации его продольной скорости, составляла 0.025-0.27%.

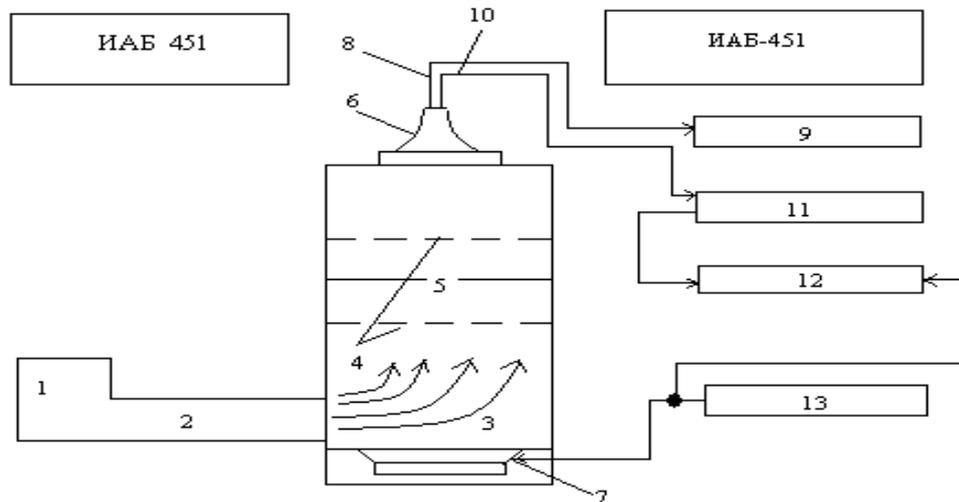
В работе использовалась система термоанемометрического блока. Он состоит из двухканальной термоанемометрической системы с линейной выходной сигнальной скоростью, преобразователя температуры, блок фазовой выборки (16).

Перемещение трубки Пито и датчиков по трем осям симметрии сопла осуществлялось с помощью трехмерного координатника.

Для формирования струи применялось круглоесопло, спрофилированное по формуле Витошинского, которое имело высоту, равную $90 \cdot 10^{-3}$ м, и поджатие, близкое к 10.

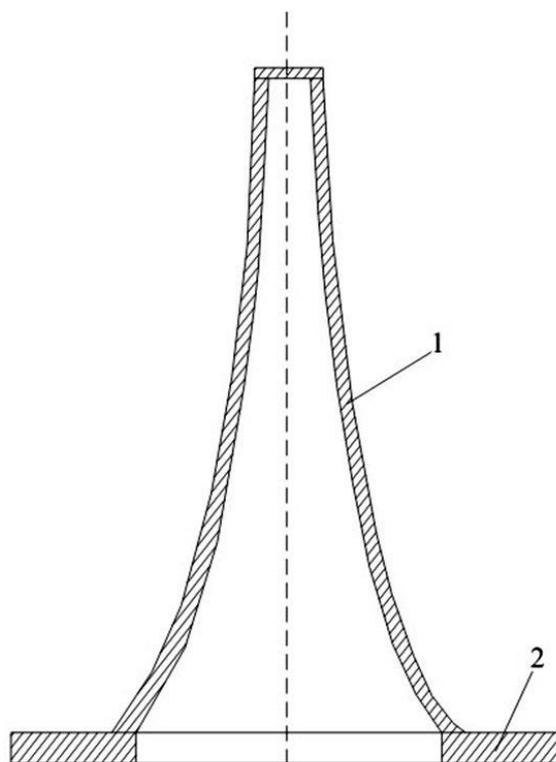
А также, в работе использовались сопла прямоугольной формы с выходным сечением. При этом площадь среза выхода сопла было примерно равной площади круглого сопла диаметром $d_{кр} = 22.57 \cdot 10^{-3}$ м. Поэтому эффективный диаметр сопла $d_{эфф}$ был приблизительно такой же, как диаметр круглого сопла.

$$\text{Здесь } d_{эфф} = 2\sqrt{a \cdot v / \pi} .$$



1-вентилятор; 2-виброгасящий переход; 3-успокоительная камера; 4-выравнивающие сетки; 5- нагреваемая сетка; 6-сопло; 7-динамик; 8-трубка Пито; 9-микроманометр; 10- датчик; 11- система термоанемометрического блока типа СТМ-02; 12- блок фазовой выборки; 13- звуковой генератор

Рисунок 22–Схема экспериментальной установки



1- стенка сопла; 2 –стойка сопла

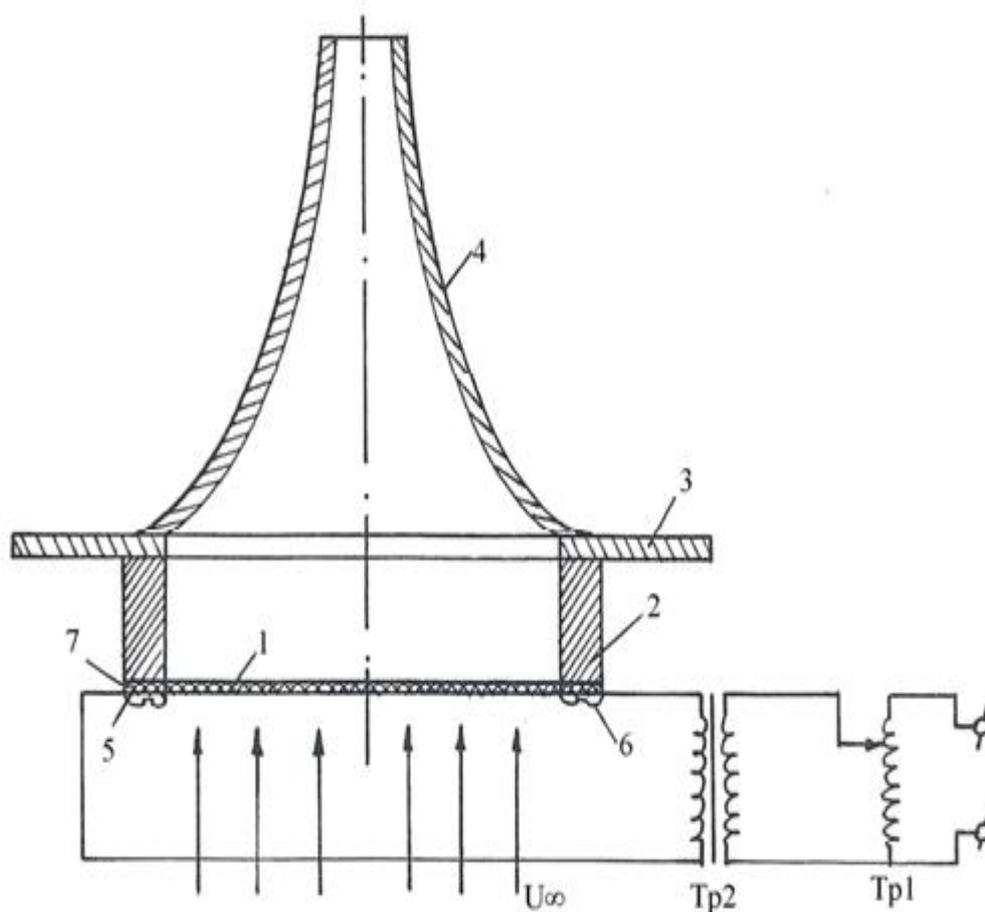
Рисунок 23–Конструкция круглого сопла выходного сечения

2.2 Экспериментальная установка для исследования процесса теплопереноса свободной струи

Экспериментальная установка для исследования теплопереноса в свободной струе представлена на рисунке 24. Воздух поступает сопло с помощью турбулизующих сеток. При входном сечении сопла нагревается с помощью нагревателя. В работе используются сменные сопла, необходимые для исследования динамических характеристик (рисунок 22).

Подогреватель состоит из измельченной никелевой решетки (1). Напряжение, задаваемое из трансформатора тока, регулировалось автотрансформатором типа ЛАТР. Нагревательная сетка электрически изолируется от сопло с помощью текстолитового держателя (2). В исходном сечении струи возникали трудности при получении одинаковых профилей

температуры. Они, были устранены с помощью контактных зажимов (5), которые находятся рядом друг с другом.



1 – нагревательная сетка; 2 – держатель текстолита; 3 – подставка для поддержания соплы в успокоительной камере; 4 – сопло; 5 – контактный зажим; 6 – болт; 7 – оловянный контактный слой; TR1 – ЛАТР; TR2 – трансформатор тока

Рисунок 24—Экспериментальная установка для нагрева струи

2.3 Методика измерения динамических и тепловых характеристик свободной струи

2.3.1 Методы измерения аэродинамических характеристик свободной струи

Из-за отсутствия статического давления в свободной струе опыт приводить по измерению динамического давления. Для измерения этого давления и скорости использовались две различные измерительные насадки. От одного калибра (x / b), для определения значения средней скорости в закрепленной точке применяется трубка Пито с диаметром выходного отверстия 0,8 мм.

Учитывая пограничный слой, образующийся на внутренних боковых поверхностях сопла, при определении профиля давления в изображении сопла использовались плоские микротрубки с торцами из тонкостенного материала. Такая конструкция насадки позволяет измерять с высокой точностью локальное давление в пограничном слое. Размер передней части микротрубки составляет 0,3 мм 1,5 мм, а толщина стенки составляет 0,05 мм.

По показаниям манометра получим выражение для скорости из условий равновесия давления в манометре и полного давления в струе, то есть

$$\frac{\rho U^2}{2} + P_{cm} = P_T, \quad (16)$$

Отсюда

$$U = \sqrt{\frac{2(P_T - P_{cm})\xi}{\rho}}, \quad (17)$$

где, ξ – тарировочный коэффициент, $\rho = \rho_0 \frac{B \cdot T_0}{B_0 \cdot T}$ – плотность воздуха при

эксперименте $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$, $B_0 = 101325 \text{ Па}$, $T_0 = 273 \text{ К}$;

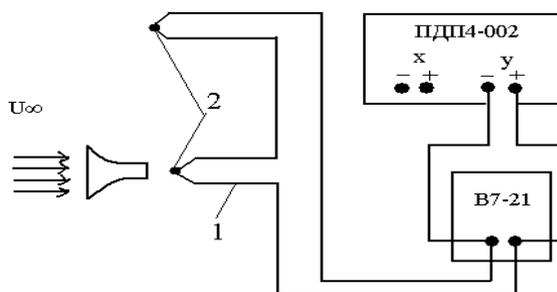
B и T – давление (барометрическое давление) и абсолютная температура в соответствии с условиями практики.

$P_{ст} = 0$ учитываем и после ряда преобразований получаем такое выражение:

$$U = 4,27 \sqrt{k \cdot m} . \quad (18)$$

2.3.2 Методика измерения тепловых характеристик

Для измерения распределения температуры струи использовалась медьконстантановая термопара (рисунок 25), «горячий» спай которой размещался в потоке, а другой, так называемый «холодный» спай, находился при комнатной температуре. ЭДС термопары измерялась цифровым вольтметром. Сигнал от термопары подавался также на двухкоординатный самописец ПДП4-002, где производились непрерывные записи изменения температуры вдоль оси струи и в поперечных сечениях. Для этого термопара предварительно градуируется [39].



1 – термопара; 2 – узлы термопара

Рисунок 25–Схема включения установки для измерения распределения температуры

2.4 Визуализация струи

Для получения наглядного рисунка представляете течения используется теневой инструмент ИАБ-451.

Визуальным наблюдением с помощью оптических приборов картины истечения из сопла подогретой струи установлено, что в зоне смешения турбулентной струи образуются периодические крупномасштабные вихри, которые с удалением от среза сопла непрерывно деформируются. Для контроля полей течения в первичных и переходных отделениях потока и предварительного получения информации о пространственной структуре организованного движения используется первый из трех методов. Второй и третий методы позволяют точно определить место вихревых фокусов.

Для получения информации о динамике когерентных структур использовался теневой метод цветной визуализации. При этом цветная теневая картина течения снимается с помощью цветных диафрагм, размещенных в освещенной части теневого инструмента ИАБ-451. Такой метод позволяет получить наглядную картину пространственной деформации вихревого в первичных и переменных отделениях свободной струи, в области повторения формы поперечного профиля.

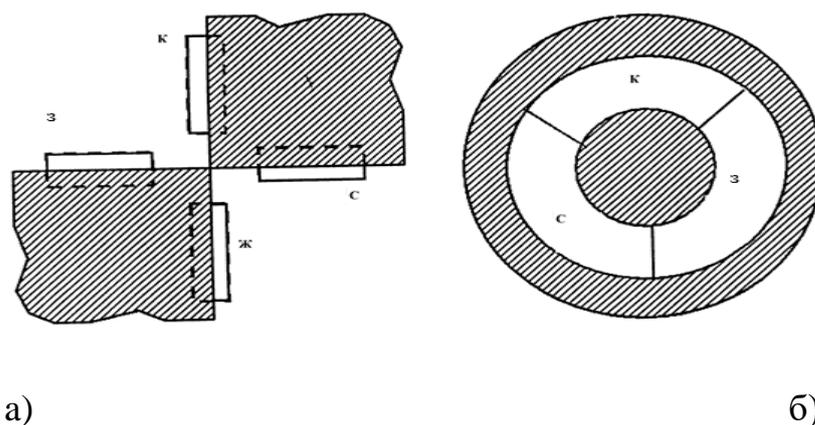
В диагностике потока жидкости и газа особо выгодны цветные теневые методы. Можно отметить следующие основные преимущества цветных методов от черно-белых. 1. Цветное изображение по сравнению с черно-белым не соприкасается с изображениями непрозрачных тел, находящихся на пространстве прибора (это особенно важно в диагностике пограничных слоев); 2. Цветные теневые методы связаны с кино съемкой очень важны для понимания сложных процессов, которые ясно видны только при цветном цвете. Свидетельством этого явления является кинофильм, снятый в ходе исследования распространения пламени в электрическом поле [40-42].

Для того, чтобы использовать цветные теневые методы в целях измерения, то есть получить исходные данные для расчета распределения плотности, необходимо иметь определенный подход. На наш взгляд,

использование цветных теневых методов для таких целей не требуется. Сложность и низкая точность измерения приводят к тому, чтобы потратить больше времени и силы; проведение таких измерений не оправдывает себя, когда в современном мире существует возможность получения высококачественных интерферограмм. Конечно, с помощью цветных теневых изображений можно оценить угол отклонения лучей, сравнивая цвета визуально. Это дает правильную информацию о течении.

В данной работе этот метод выполняет функцию входной диафрагмы трехсекторный световой фильтр (красный, синий, зеленый) (рис.26), который имеет непрозрачный диск, фокусирующий центральную зону светового фильтра. Функция диафрагмы визуализации выполняет круглое отверстие. Метод реализован на теневом приборе ИАБ-451.

По нашей исследованной работе лучшие цвета из методов цветной визуализации получают при использовании трехзвенных диафрагм с красным, зеленым и синим фильтрами. При замене фонового света на белый свет информация о направлении градиента температуры дает промежуточные и основные цвета.



а) метод крестообразных отверстий; б) трехсекторный светофильтрный метод

Рисунок 26–Входные и визуализационные диафрагмы векторного цветного
теневого метода

2.5 Измерение средней скорости и характеристик турбулентности

Измерения средней скорости потока осуществлялись с помощью трубки Пито и микроманометра ММН-240, а также разработанной сотрудниками НИИЭТФ при КазНУ им. аль-Фараби термоанемометрической аппаратурой, которая использовалась для измерения пульсационных характеристик скорости струи и мгновенного поля скорости.

На основе измерения средних и пульсационных составляющих скорости получен принцип автоматического поддержания температуры датчика, подключенного к плечу моста термоанемометра постоянного тока.

При отсутствии потока нагреваем нити датчика до определенной температуры и приведем мост в равновесие, затем вводим нить в поток, тогда он дает какое-либо количество тепла и изменяется его сопротивление. Возникший разбаланс напряжения моста усиливается через усилитель обратной связи (УОС). Сигнал разбаланса передается усилителю мощности (УМ). Затем ток, проходящий через шнур, передается на начало моста при условии увеличения. При этом температура и сопротивление нити восстанавливаются и мост переходит в балансовое состояние. Таким образом, ток моста функционально связан со скоростью потока. На рисунке 27, \bar{E} - вольтметр постоянного напряжения для измерения усредненной скорости, $\sqrt{e^{.2}}$ - вольтметр среднеквадратических значений, измеряющих пульсационную скорость. Значения, определяющие турбулентность потока, имеют статистический характер, то есть пульсируются в каждой точке.

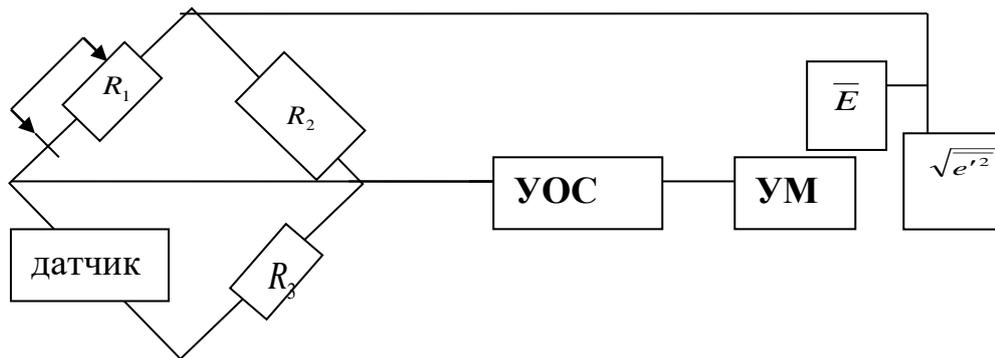


Рисунок 27–Блок-схема термоанемометра постоянного тока

Пульсационные величины: это скорость, давление, температура, плотность и другие параметры струи. Приведем методику измерения пульсации скорости. В случае теплового баланса между нитями термоанемометра и окружающей средой, двигающейся со скоростью U , выполняется следующее соотношение:

$$E^2 = E_0^2 + B\sqrt{U}, \quad (19)$$

здесь E_0 - выходное напряжение термоанемометра при отсутствии потока, E – напряжение при наличии потока, B – постоянный коэффициент.

Для исследования термоанемометра постоянной температуры применяются тарировочные трубы, термоанемометры, характеристики его конструкции, указания по эксплуатации и датчик с позолоченной вольфрамовой ниткой. При помощи специального устройства датчик устанавливается таким образом, чтобы чувствительный элемент (нити) к выходу тарировочной трубы был приблизительно к центру потока.

Коэффициенты E_0 и B в потоке скорости определяется из практики при тарировке термоанемометра (рисунок 28). Экстраполяция опытной кривой дает квадрат начального значения выходного напряжения до пересечения с

осью E^2 , то есть ставится на выражение (19). Как видно из графика, $B = \operatorname{tg} \varphi$. В зависимости от параметров нити (диаметр, длина, т. д.) для каждого датчика такие графики строятся отдельно.

Скорость турбулентного потока классифицируется на два составляющих – усредненные и пульсационные:

$$u = \bar{u} + u' , \quad u' \ll \bar{u} . \quad (20)$$

В соответствии с ними обозначим составляющие выходного напряжения усилителя через E и e' :

$$E = \bar{E} + e' , \quad e' \ll \bar{E} . \quad (21)$$

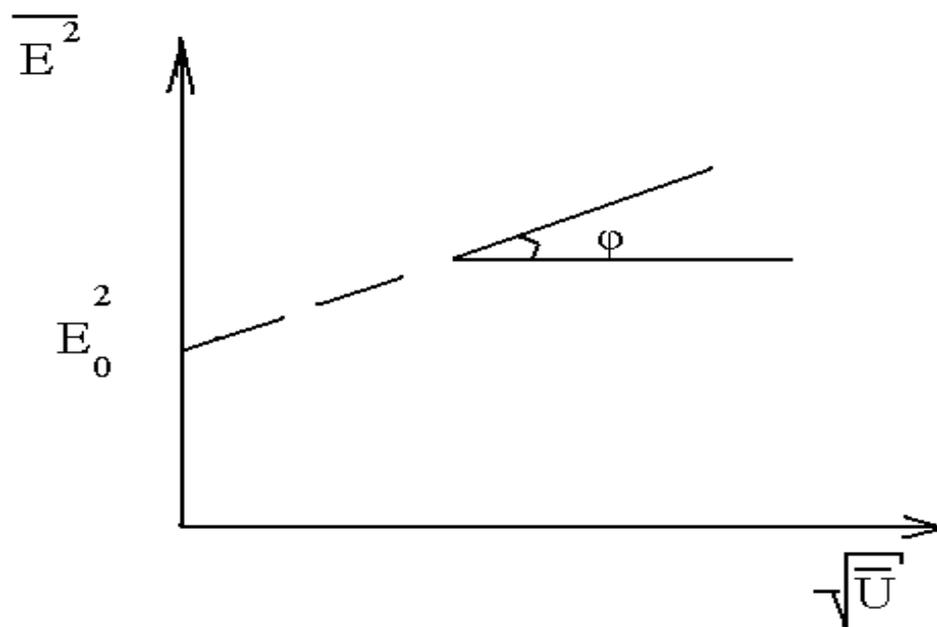


Рисунок 28—Тарировочный график термоанемометра постоянной температуры

Подставив полученное выражение в уравнение (19), получим:

$$\left(\bar{E} + e'\right)^2 = E_0^2 + B\sqrt{\bar{u} + u'}. \quad (22)$$

Мы решаем это уравнение относительно скорости без учета значений малых величин:

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{\bar{u}'^2}}{\bar{u}} = \frac{4\bar{E}\sqrt{e'^2}}{E^2 - E_0^2}, \quad (23)$$

здесь, \bar{u} – скорость в любой точке сечения, величина ε_u называется относительной интенсивностью турбулентности. Профили относительных средних скоростей можно измерить с помощью термоанемометра постоянной температуры, для этого используем выражению (19) :

$$B\sqrt{\bar{u}} = \bar{E}^2 - E_0^2; \quad B\sqrt{u_m} = E_m^2 - E_0^2; \quad (24)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left(\frac{\bar{E}^2 - E_0^2}{E_m^2 - E_0^2} \right)^2, \quad (25)$$

здесь u_m – осевая скорость.

Интенсивность турбулентности на оси струи:

$$\varepsilon_m = \frac{4\bar{E}(\bar{E}^2 - E_0^2)\sqrt{e'^2}}{(E_m^2 - E_0^2)^2}. \quad (26)$$

С помощью формул (19) и (20) получаем выражение для интенсивности пульсации скорости:

$$\frac{\overline{u}}{u_0} = \left(\frac{\overline{E^2} - E_0^2}{\overline{E_6^2} - E_0^2} \right)^2,$$

$$\varepsilon_6 = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{u_0} = \frac{4\overline{E}\sqrt{\overline{e'^2}}}{\overline{E^2} - E_0^2} \cdot \frac{(\overline{E^2} - E_0^2)^2}{(\overline{E_6^2} - E_0^2)^2} = \frac{4\overline{E}(\overline{E^2} - E_0^2)\sqrt{\overline{e'^2}}}{(\overline{E_6^2} - E_0^2)^2}. \quad (27)$$

3. Экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования динамических свойств трехмерных турбулентных потоков, а также влияния низкочастотного акустического воздействия на эти потоки, их пространственное развитие и вихревую структуру.

В экспериментах использовались сопла с соотношением сторон:

$\lambda=1,00; 2,66; 5,07; 7,61; 11,00; 16,00; 25,25$ и для сравнения круглое сопло с эффективным диаметром круга равно площади выходного сечения прямоугольного сопла. Для проведения экспериментов были использованы сопла с различными соотношениями сторон, включая специально спроектированные прямоугольные носики. Основные измерения были проведены для сопла с соотношением сторон $\lambda=2,66$.

В процессе эксперимента скорость потока изменялась в диапазоне от 2,78 до 20 метров в секунду. Основные измерения были проведены при скорости $U_0 = 6$ м/с выхода из сопла, которая соответствовала числу Рейнольдса $Re \sim 0,97 \cdot 10^4$, рассчитанному на основе эффективного диаметра.

Чтобы изменить поток, использовался глушитель, установленный в передней части сопла на выходе из седативной камеры. Эксперименты проводились как в условиях отсутствия внешнего воздействия, так и при наличии эффекта, который соответствует числу Струхаля:

$$Sh = \frac{f_b \cdot b}{U_0} = \frac{f_a \cdot a}{U_0} = \frac{f_{d_s} \cdot d_s}{U_0} = 0,48 \quad (28)$$

Где f_b, f_a и f_{d_s} - расчетные частоты на коротких и длинных сторонах сопла и эффективный диаметр этих сопел.

Как уже отмечалось, основные критерии воздействия на поток были изучены при $\lambda=2,66$. Для того же сопла было проведено измерение R_{Ut} автокорреляционных функций продольной пульсации скорости в начале переходной зоны, где замкнутый вихрь достигает больших размеров. Эти измерения показали наличие небольшого отрицательного максимума, который можно увидеть при большом количестве образцов и времени в среднем. Цифровой коррелятор X-6-4 использовался для проведения эксперимента. В работе / 15 / результаты R_{Ut} измерений представлены в потоке $\lambda= 2,66$. R_{Ut} время, соответствующее отрицательному максимуму, можно рассматривать как $f_x = \frac{1}{\tau_x}$ половину периода характерной частоты периодического процесса. В приведенном выше примере он и соответствует частоте 89 Гц. Соответственно, естественная частота

$$Sh = \frac{f_x \cdot a}{U_0} \quad (29)$$

количество Струхалей, рассчитанное на той же частоте (f_x) и длинной стороне ($a=33,3\text{мм}$) сопла, было равно 0,48 на скорости выхода из сопла $U_0 = 6.03\text{м/с}$. Поэтому при расчете указанных частот $Sh = Sh_{d_3} = Sh_a \approx 0,48$ принялись.

С учетом этого:

$$f_b \approx \frac{0,48 \cdot U_0}{b}; f_{d_3} \approx \frac{0,48 \cdot U_0}{d_3} f_a \approx \frac{0,48 \cdot U_0}{a} \quad (30)$$

можно заметить, что формула показывает, что низким частотам акустического поля соответствует f_a , а более высоким - f_b .

В данных ситуациях и $d_s = 2 \left(\frac{a \cdot b}{\pi} \right)^{0.5}$ при использовании следующих соотношений между выбранными частотами воздействия для анализа:

$$f_b = \lambda \cdot f_a = \left(\frac{4 \cdot \lambda}{\pi} \right)^{0.5} \cdot f_{d_s} \quad (12)$$

для изучения влияния параметра λ на аэродинамику трехмерного потока были проведены измерения поперечных профилей средней скорости потока. Результаты измерений профилей горизонтальной скорости вдоль оси, параллельной короткой (y) стороне сопла при скорости $U_0 = 20$ мм/с для значений $\lambda = 3; 11; 16; 25$ представлены на рисунках 29 и 30. Изучив наши исследования, мы можем заключить, что автоматическая модель профилей, расположенных вдоль оси, параллельной короткой стороне, устанавливается независимо от значения λ при условии $x/b \geq 8$.

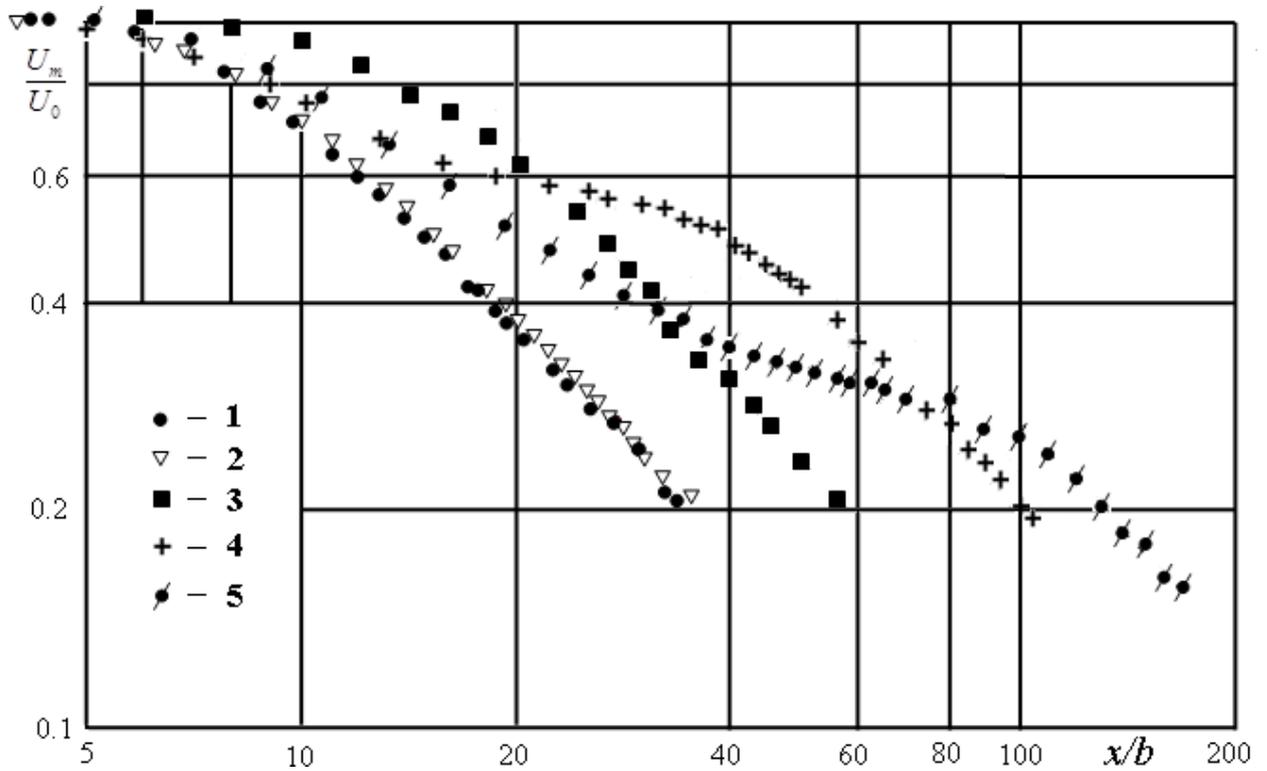
При изучении трехмерных турбулентных потоков было получено множество результатов, которые были визуальным образом исследованы с помощью теневого устройства. Основным фактором, связанным с этими результатами, является образование и последующее развитие замкнутых объемных вихрей. Динамика этих вихрей зависит от параметров соотношения сопла.

На рисунке 31 можно увидеть, что при визуальном наблюдении с помощью оптических устройств, выходящих из сопла нагретого потока, в зоне перемешивания турбулентного потока периодически образуются большие объемные вихри. Они удаляются из сопла и постепенно деформируются, особенно хорошо видны при низких скоростях течения. Исходя из этого, проведен более подробный качественный анализ данных, основанный на пространственном поведении крупномасштабных вихрей. Результаты этого анализа показывают, что при значениях размеров взаимно параллельных сторон сопла, мало отличающихся от сторон квадрата, ширина трехмерного потока в направлении оси z сопла уменьшается, а поперечное сечение потока увеличивается так резко, что он быстро наклоняется к окружности. Это связано с тенденцией крупномасштабных вихрей,

образующихся в смесительном слое, приобретать круглую тороидальную форму с расстоянием от сопла.

Безразмерные профили скорости трехмерного потока

$$\alpha - \lambda = 3; \delta - \lambda = 11; U_0 = 20 \text{ м/с.}$$



29 – рисунок

Безразмерные профили скорости трехмерного потока

$$\alpha - \lambda = 16; \delta - \lambda = 25. U_0 = 20 \text{ м/с.}$$

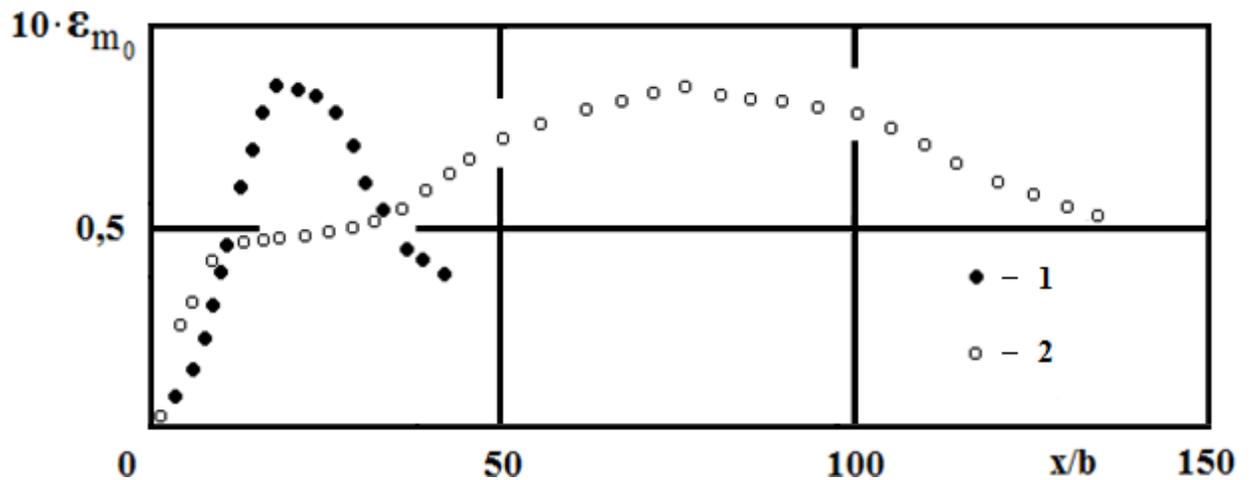


Рисунок 30

Фотографии трехмерного потока движения теплера

$\lambda = 2,66; U_0 = 6 \text{ м/с}$; А-вид с короткого края насадки, Б-вид с длинного края насадки.

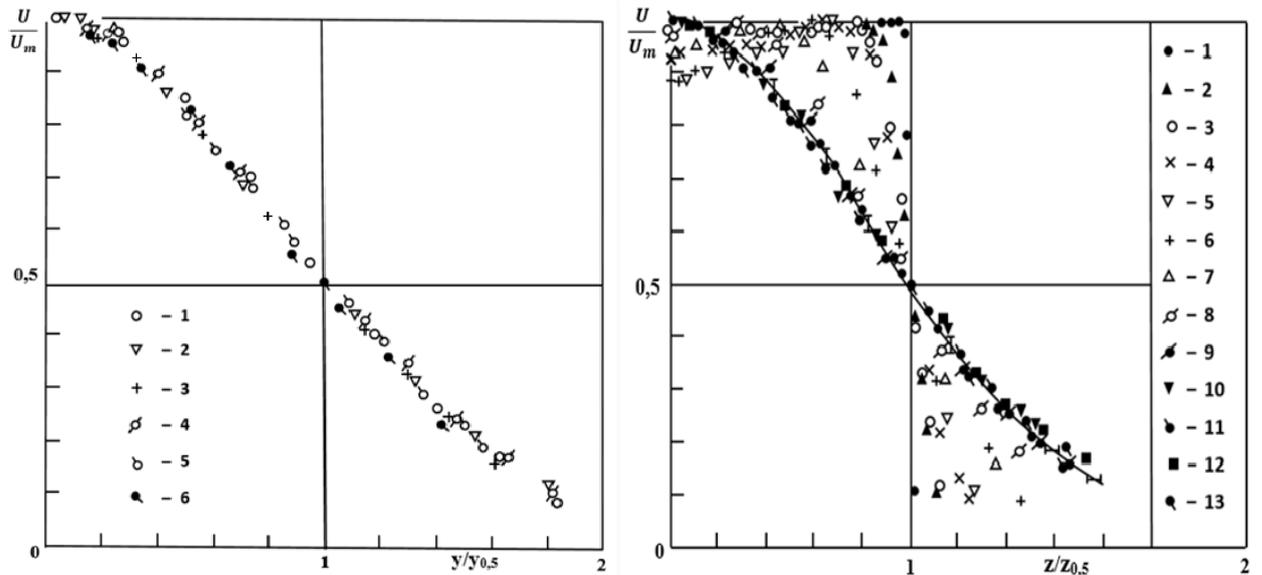


Рисунок 31

На рисунке 32 показано распределение U_0/U_m по оси потоков для трех значений частот сигнала, на которые воздействуют f_b, f_a и f_d .

Заметно, что отсутствие эффекта приводит к более заметному воздействию на трехмерные потоки. При изучении струй, вытекающих из

сопла с эллиптической формой выходной части, также наблюдаются аналогичные эффекты.

Отсутствие эффекта оказывает большое влияние на трехмерные потоки, особенно при изучении струй, вытекающих из сопла с эллиптической формой выходной части. Низкая частота, соответствующая осевой скорости Sh_a ($\lambda = 2,66$), стабилизируется на ободке сопла и вызывает появление крупных вихрей, что усиливает турбулентный обмен в области деформации потока и приводит к снижению осевой скорости. Результаты исследования отображены на рисунках 31 и 33.

Мы заметили интересную динамику вихрей при наблюдении трехмерного потока, вытекающего из сопла (см. рис.33). На первых этапах вихревое отклонение происходит вдоль края сопла, окружающего поток в одной плоскости, а затем распространяется вниз по потоку. Фокус траектории вихрей со стороны короткой части сопла направлен к центру потока, а со стороны длинной части - к центру вихрей. Рис.33 показывает изображения Тейлера струйного изображения с коротких и длинных краев сопла на разных стадиях развития вихревых возмущений. Если частота ударного сигнала соответствует зонам наиболее эффективной частоты ударного сигнала, то есть возможность увидеть его лучше.

Отчетливо заметно на рисунках А и С, что вихревое возмущение отстает от длинного края сопла. Этот процесс приводит к образованию трехмерного возмущения, где короткие и длинные стороны расположены на разных расстояниях вдоль потока от разреза сопла.

Мы расширяем визуальное наблюдение, представленное выше, добавляя к нему некоторые критерии. На Рисунке 34 показаны результаты измерения траекторий фокусов вихрей, полученные путем визуализации изображения потока в трехмерном пространстве при наложении управляющего эффекта, частота которого близка к естественной частоте образования вихрей. Здесь означает l_y - расстояние от фокуса вихря до оси

потока в направлении y (со стороны широкой части сопла), а l_z - по направлению к оси z (со стороны короткой части сопла). Из рисунка видно, что траектория фокусов вихрей со стороны короткой части сопла направлена к центру потока, а со стороны длинной части - от центра.

На рисунке 35 демонстрируется измерение задержки вихревого возмущения, вызванного разрушением короткой части сопла, с помощью стробоскопической визуализации теневого изображения. Это достигается путем определения расстояния между фокусами вихрей на различных стадиях их развития.

Значение рядом с отверстием сопла близко к нулю, затем оно увеличивается по направлению течения и достигает $x/b=3,09 \cdot b$, а затем снова уменьшается до нуля.

$$U_o = 6,03 \text{ м/с}; Sh = 0,48; \lambda = 2,66.$$

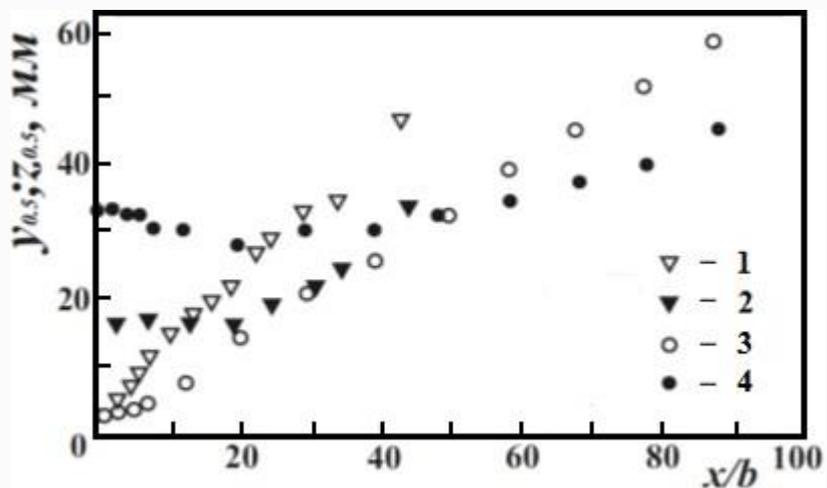


Рисунок 32

*Импульсные изображения потока в трехмерном потоке акустических
эффектов теплера*

$$\lambda = 3; U_0 = 4,3 \text{ м/с}; Sh_a = 0,42 (f_a = 60 \text{ Гц}).$$

*A, B - вид со стороны короткого края насадки; C, D - вид со стороны длинного
края насадки.*

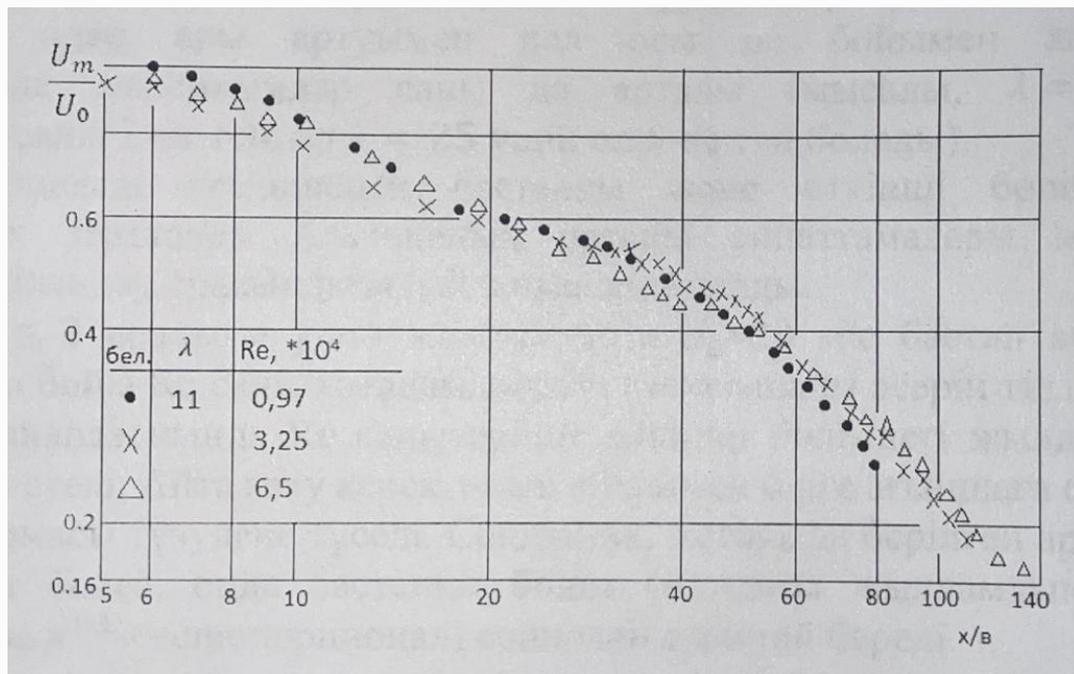


Рисунок 33

Траектория вихревых очагов в трехмерном потоке с разным соотношением сопла для режима потока с одинаковой скоростью потока и действием.
 ($Sh_a = 0,42$).

1-асимметричный поток ($d=30$ мм):

$$U_0 = 2,78 \text{ м/с}; f = 39 \text{ Гц}, 2 \text{ и } 3 - \lambda = 2: U_0 = 3,48 \text{ м/с}; f = 48 \text{ Гц}, 4 \text{ и}$$

$$5 - \lambda = 3: U_0 = 4,27 \text{ м/с}; f = 60 \text{ Гц}, 6 \text{ и } 7 - \lambda = 6: U_0 = 6,03 \text{ м/с}; f = 85 \text{ Гц}, 3, 5 \text{ и}$$

$$7 - \nu_Y / a, 2, 4 \text{ и } 6 - \nu_z / a.$$

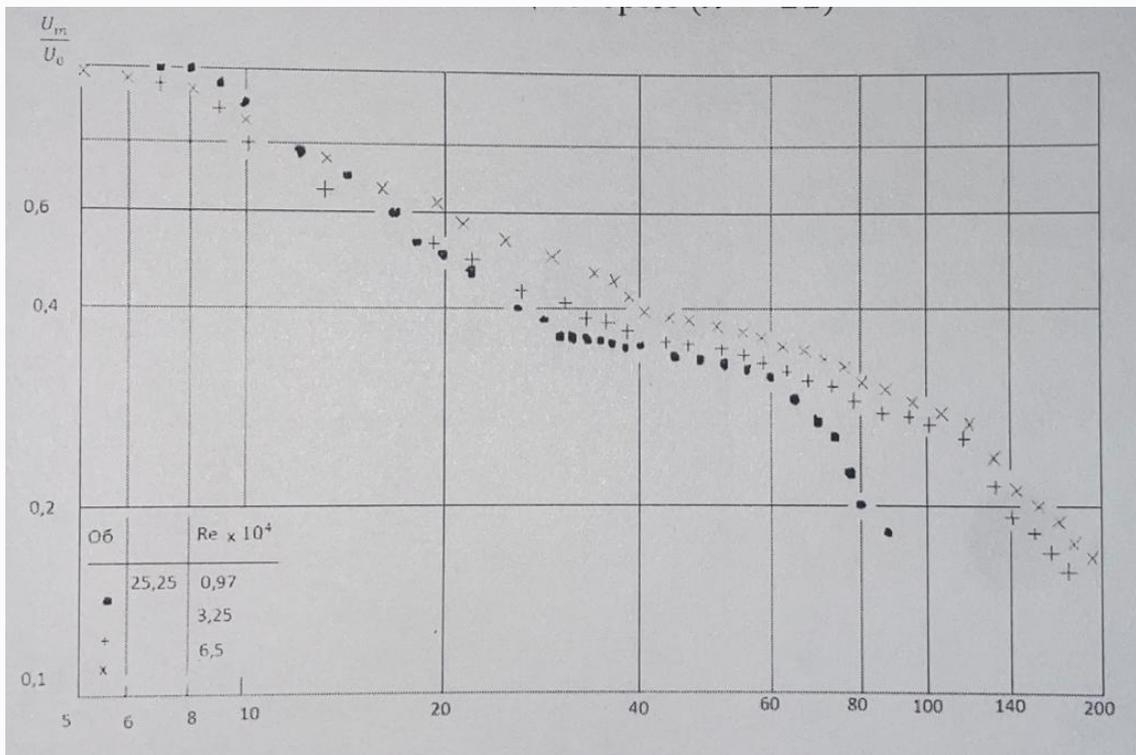


Рисунок 34

Результаты измерений по оси x относительного смещения вихревых очагов, развивающихся по длинным и коротким краям сопла

$\lambda = 3; U_0 = 4,27 \text{ м/с}; f = 60 \text{ Гц}; Sh_a = 0,42. \Delta x = x_z - x_y$, где x_z - координата развивающегося вихревого фокуса, перпендикулярная короткой стороне сопла, x_y - координата развивающегося вихревого фокуса, перпендикулярная длинной стороне сопла.

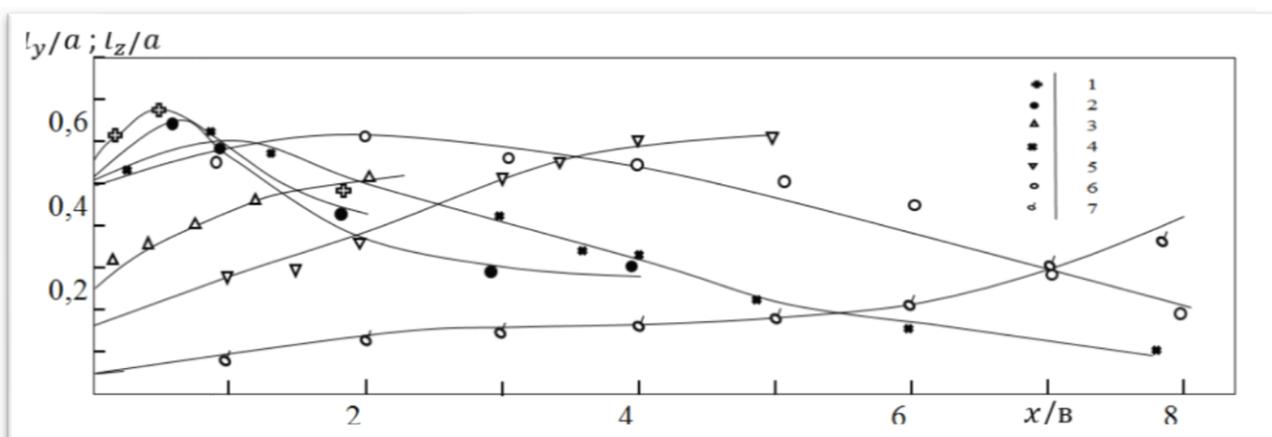


Рисунок 35

Заклучение

- 1) При изучении трехмерных турбулентных потоков, множество результатов было получено. Визуальное исследование с помощью теневого устройства показало, что основная причина этих результатов - образование и развитие крупногабаритных вихрей. Динамика этих вихрей зависит от параметра соотношения сопла.
- 2) В исследовании рассматривается распределение потоков $\frac{U_m}{U_0}$ вдоль оси в трех точках частотного спектра, которые подвержены воздействию факторов f_a, f_b и f_{ab} . Отмечается, что воздействие на трехмерные потоки значительно возрастает при отсутствии эффекта.
- 3) При акустическом воздействии $\lambda = 3$ возникают вихревые движения, которые начинаются вдоль края сопла и распространяются по потоку. Отклонение со стороны длинной части сопла отстает от разрушения короткой части, и траектория фокуса вихрей направлена к центру потока со стороны короткой части и к центру вихрей со стороны длинной части. Этот процесс продолжается до образования трехмерного возмущения, где короткие и длинные стороны расположены на разных расстояниях вдоль потока от разреза сопла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Turkus V.A. Structure of the air inflow jet issuing from a rectangular hole// Zh. Otopl. Vent.5.- 1933.-P.11-19.
- 2 Trentacoste N., Sforza, P.M. Further experimental results for three-dimensional free jets// AIAA J.5.-1967. -P.885–891.
- 3 Sforza P.M., Steiger M.H., Trentacoste N. Studies on three-dimensional viscous jets//AIAA J.4.-1966. -P.800–805.
- 4 Sforza P.M. A quasi-axisymmetric approximation for turbulent three-dimensional jets and wakes//AIAA J.7. -1969. -P.1380–1382.
- 5 Krashennikov S.Y., Rogalskaya E.G. Propagation of jets from rectangular nozzles: free and those close to the screen//Izv. Akhad. Nauk SSSR. Zhid. Gaza4. -1979. -P.39–48.
- 6 Quinn W.R. Turbulent free jet flows issuing from sharp-edged rectangular slots: the influence of slot aspect ratio// Exp.Thermal Fluid Sci.5.-1992. -P.203–215.
- 7 Gutmark E.J., Grinstein F.F. Flow control with noncircular jets//Annu. Rev. Fluid Mech.31.-1999. –P.239–272.
- 8 Quinn W.R., Pollard A., Marsters G.F. On ‘saddle-backed’ velocity distributions in three-dimensional turbulent free jets//In: Proceedings of the AIAA 16th Fluid and Plasma Dynamics Conference, Danvers.-1983.-P.1677–1682.
- 9 Marsters G.F. Spanwise velocity distributions in jets from rectangular slots// AIAA.-1981.-P148–152.
- 10 Sforza P.M., Stasi W.Heated three-dimensional turbulent jets//ASME J. Heat Transf.101.-1979.-P.353–358.
- 11 Sfeir A.A.The velocity and temperature fields of rectangular jets//Int. J. Heat Mass Transf.19.-1976.-P1289–1297.
- 12 Rajaratnam N.Turbulent Jets//Elsevier,Amsterdam.-1976.-P.176-180.
- 13 Miller R.S., Madnia C.K., Givi P.Numerical simulation of non-circular jets// Comput. Fluids24.-1995.-P.1–25.

- 14 Wilson R.V., Demuren A.O. Numerical simulation of turbulent jets with rectangular cross-section//ASME FED238.-1996.-P.121–127.
- 15 Holdo A.E., Simpson B.A.F. Simulation of high-aspect-ratio jets//Int. J. Numer. Methods Fluids39.-2002.-P.343–359.
- 16 Rembold B., Adams N.A., Kleiser L. Direct numerical simulation of a transitional rectangular jet//Int. J. Heat Fluid Flow23.-2002.-P.547–553.
- 17 Faghani E., Maddahian R., Faghani P., Farhanieh B. Numerical investigation of turbulent free jet flows issued from rectangular nozzles: the influence of small aspect ratio//Archive of applied mechanics.-2010.-P.727-745.
- 18 Rhie C.M., Chow W.L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation//AIAA J.21.-1983.-P.1525–1532.
- 19 Van Leer, B. Toward the ultimate conservative difference scheme. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme//J. Comput. Phys.14.-1974.-P.361–370.
- 20 Davidson L., Farhanieh B. A finite-volume code employing collocated variable arrangement and cartesian velocity components for computation of fluid flow and heat transfer in complex three-dimensional geometries//Chalmers University of Technology.-1991.-P.51-59.
- 21 Zhou X., Sun Z., Brenner G., Durst F. Combustion modeling of turbulent jet diffusion H₂/air flame with detailed chemistry//Int. J. Heat Mass Transf.43.-2000.-P.2075–2088.
- 22 Zhou X., Sun Z., Durst F., Brenner G. Numerical simulation of turbulent jet flow and combustion//Comput. Math. Appl.38.-1999.-P.179–191.
- 23 Malmström T.G., Kirkpatrick A.T., Christensen B., Knappmiller, K.D. Centreline velocity decay measurements in low-velocity axisymmetric jets//J. Fluid Mech.346.-1997.-P.363–377.
- 24 Mi J., Nathan G.J., Luxton R.E. Centreline mixing characteristics of jets from nine differently shaped nozzles//Exp. Fluids28.-2000.-P.93–94.

25 Quinn W.R., Militzer J. Experimental and numerical study of a turbulent free square jet//Phys. Fluids31.-1988.-P.1017–1025.

26 Klein M., Sadiki A., Janicka J. Investigation of the influence of the Reynolds number on a plane jet using direct numerical simulation//Int. J. Heat Fluid Flow24.-2003.-P.785–794.

27 Quinn W.R. Upstream nozzle shaping effects on near field flow in round turbulent free jets//Eur. J. Mech. B/Fluids25.-2006.-P..279–301.

28 Deo R.C., Mi J., Nathan G.J. The influence of nozzle-exit geometric profile on statistical properties of a turbulent plane jet//Exp. Thermal Fluid Sci.32.-2007.-P.545–559.

29 Habli S., Mhiri H., Golli S.E., Palec G.L., Bournot P. Numerical study of inflow conditions on an axisymmetric turbulent jet//Int. J. Thermal Sci.40.-2001.-P.497–511.

30 Goldschmidt V.W., Bradshaw P. Effect of nozzle exit turbulence on the spreading rate of plane free jets//ASME, vol. Boulder, Colorado-1981.-P..22–24.

31 Berg J.R., Ormiston S.J., Soliman H.M. Prediction of the flow structure in a turbulent rectangular free jet//Int. Commun. Heat Mass Transf.33.-2006.-P.552–563.

32 Bejan A. Convection Heat Transfer//2nd edn. Wiley, New York.-1948.-P.215-218.

33 Zijnen B.G. Measurement of the velocity distribution in a plane turbulent jet of air//Appl. Sci Res. A7.-1958.-P.256–276.

34 Behnia M., Parneix S., Durbin P.A. Prediction of heat transfer in an axisymmetric turbulent jet impinging on a flat plate//Int. J. Heat Mass Transf.41.-1998.-P.1845–1855.

35 Park T.H., Choi H.G., Yoo J.Y., Kim S.J. Streamline upwind numerical simulation of two-dimensional confined impinging slot jets//Int. J. Heat Mass Transf.46.-2003.-P.251–262.

36 Pope S.B. Turbulent Flows // Cambridge University Press. - 2008. - P. 336-341.

37 Tsuchiya Y., Horikoshi C., Sato T. On the spread of rectangular jets // Exp. Fluids 4. - 1986. - P. 197-204.

38 Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю. и др. Теория турбулентных струй. Изд. 2-ое перераб. и доп. Под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: 1984. - 720 с.

39 Жалпы физикалық практикум. Молекулалық физика: оқу құралы // Исатаев С.И., Асқарова Ә.С., Төлеуов Ғ.К. және т.б. – Алматы: Қазақ университеті, 2002. - 135 б.

40 Сухоруких В.С. Визуализация потоков жидкости и газа и примыкающие к ней задачи // Материалы международного семинара, Минск, май, 1987. Современные экспериментальные методы исследования процессов тепло- и массообмена. – Минск, 1987. – Т.1. – С.10-20.

41 Отменников В.Н., Потехин Б.Н., Харитонов А.И. Получение цветной теневой картины при использовании трехцветных осветительных диафрагм // Физические методы исследования позрачных неоднородностей. М: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1980. С.22-24.

42 Отменников В.Н., Потехин Б.Н., Харитонов А.И. Новая модификация цветного теневого метода // Оптико – механическая промышленность. 1998. №5. – С.27-29.

43 Абрамович Г.Н. О деформации поперечного сечения прямоугольной турбулентной струи. Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. №1. С.54-63.

44 Исатаев С.И., Төлеуов Г., Исатаев М.С., Болысбекова Ш.А. Экспериментальное исследование трехмерных турбулентных струй, истекающих из сопла с прямоугольным выходным сечением. Инженерно-физический журнал. 2016. Т.89, №2. С. 383– 387.

45 Исатаев М.С., Төлеуов Г., Есеналина К.А. Экспериментальное исследование распространения трехмерных турбулентных струй из

прямоугольных сопел. Инженерно-физический журнал. 2017. Т.90, №6. С. 1543–1548.

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ11	Махаметова Назакят Аршидиновна

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 «Физика»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<p>1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i></p>	<p><i>Затраты на сырьё, материалы, комплектующие изделия, специальное оборудование, основную и дополнительную заработную платы исполнителей, отчисления на социальные нужды, накладные расходы</i></p>
<p>2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i></p>	<p><i>В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»</i></p>
<p>3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и</i></p>	<p><i>1. Налоговый кодекс Российской Федерации</i> <i>2. ФЗ №212 от 24.07.2009 в ред. от</i></p>

<i>кредитования</i>	<i>19.12.2016</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>1. Оценка коммерческого потенциала и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Определение потенциальных потребителей результатов исследования, анализ конкурентных технических решений.</i>
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Планирование этапов разработки программы, определение трудоемкости.</i>
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Сравнительный анализ интегральных показателей эффективности, формирование бюджета НТИ</i>
<i>4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Расчет уравнений эффективности НТИ. Расчет уравнений сравнительной эффективности НТИ.</i>
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
<ol style="list-style-type: none"> <i>1. «Портрет» потребителя результатов НТИ</i> <i>2. Сегментирование рынка</i> <i>3. Оценка конкурентоспособности технических решений</i> <i>4. Матрица SWOT</i> <i>5. График проведения и бюджет НТИ</i> <i>6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i> 	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Маланина Вероника Анатольевна	К.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ11	Махаметова Назакят Аршидиновна		

ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-исследовательской работы, направленной на получение результатов экспериментального исследования динамических характеристик трехмерных турбулентных потоков и влияние низкочастотного акустического воздействия на поток, его пространственное развитие и результаты исследования вихревой структуры потока. В связи с этим, были определены ресурсная, финансовая и экономическая эффективность.

Этапы решения задачи:

- провести анализ конкурентных технических решений;
- провести SWOT – анализ;
- предоставить организацию и планирование работ;
- построить график Ганта;
- провести расчёт материальных затрат, заработных плат, отчисления во внебюджетные фонды, затраты на электроэнергию и амортизационных расходов;
- провести анализ сравнительной эффективности работы.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями результатов исследований являются исследовательские лаборатории в сфере авиапромышленности. Это означает, что потребители – крупные коммерческие и некоммерческие организации отраслевой принадлежности.

Для определения группы потребителей, которых может заинтересовать результаты данных научных исследований, необходимо провести сегментирование рынка.

Карта сегментирования рынка по модификации поверхностей представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка по области применения разработки

Область рынка сбыта	Доля рынка, %
Авиастроение	50
Машиностроение	30
Зеленая энергетика	20

Исходя из карты сегментирования рынка услуг по получению чистого водорода, учитывая низкую конкуренцию, можно занять сегмент фильтрации водорода в сфере водородной энергетики, машиностроении и ядерной энергетики. Применение результатов данного научного исследования позволит занять лидирующее положение в этом сегменте рынка.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В отличие от других методов печать методом экструзии позволяет получать детали абсолютно разной формы, а также не требует высоких затрат по времени подготовки фидстока. Для изготовления фидстока необходимо ПМ-связующее и целевой материал, при нахождении необходимого соотношения между ними, мы можем начать печать детали, форма которой предварительно изготавливается в редакторе.

Метод экструзии позволяет менять физические характеристики детали непосредственно в момент печати детали благодаря широким настройкам и параметрам печати. Мы можем регулировать плотность, пористость и форму конечной детали.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки. Для этого была составлена оценочная карта, таблица 4.2.

Б_Ф – печать мембран из оксида алюминия методом экструзии. Б_{К1} – литье под давлением.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (исследований)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _Ф	Б _{К1}	К _{КФ}	К _{К1}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда пользователя	0.1	4	4	0.4	0.4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0.04	4	3	0.2	0.15
3. Помехоустойчивость	0.05	4	2	0.2	0.1
4. Энергоэкономичность	0.06	4	4	0.2	0.2
5. Надежность	0.1	4	3	0.4	0.3
6. Уровень шума	0.05	3	3	0.15	0.15
7. Безопасность	0.01	5	5	0.05	0.05
8. Потребность в ресурсах памяти	0.1	4	4	0.4	0.4
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.2	5	3	0.5	0.3
10. Простота эксплуатации	0.04	4	4	0.2	0.2
11. Качество интеллектуального интерфейса	0.04	4	4	0.2	0.2
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0.02	5	5	0.05	0.05
Экономические критерии оценки эффективности					

1. Конкуренентоспособность продукта	0.05	4	3	0.2	0.15
2. Уровень проникновения на рынок	0.02	5	5	0.1	0.1
3. Цена	0.02	4	4	0.12	0.12
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0.03	4	4	0.12	0.12
5. Послепродажное обслуживание	0.01	4	4	0.04	0.04
6. Финансирование научной разработки	0.07	4	5	0.32	0.4
7. Срок выхода на рынок	0.06	4	4	0.2	0.2
8. Наличие сертификации разработки	0.02	4	4	0.04	0.04
Итого	1	83	77	4.09	3.67

Исходя из таблицы 4.2, конкурентоспособность разработки научного исследования метода экструзии мембран из оксида алюминия (Б_Ф) составила 4.09, против 3.67 метода литья под давлением (Б_{К1}). Полученные данные свидетельствуют о превосходстве научно-технической разработки (Б_Ф) по критериям: удобство в эксплуатации, помехоустойчивость, надёжность, функциональная мощность и конкурентоспособность продукта. Применение метода экструзии мембран (Б_Ф) позволяет добиться более широких свойств конечного продукта, в отличие от конкурирующего метода литья под давлением (Б_{К1}). Данный метод (Б_Ф) имеет более широкую область применения в промышленности.

4.1.3 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой

комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Цель SWOT-анализа раскрыть сильные и слабые стороны, выявить риски, определить возможности для улучшения.

Результаты SWOT анализа представлены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – SWOT анализ

	Сильные стороны:	Слабые стороны:
	С1. Широкий спектр используемых материалов;	Сл1. Высокая стоимость оборудования установки;
	С2. Значительное повышение структурно-механических свойств материалов;	Сл2. Отсутствие современных отечественных принтеров;
	С3. Длительный срок эксплуатации изготовленных деталей;	Сл3. Необходимость квалифицированных специалистов для обслуживания оборудования;
	С4. Высокая точность печати;	Сл4. Продолжительная настройка параметров при смене фидстока;
	С5. Относительная дешевизна процесса	Сл5. Постепенное устаревание

	изготовления фидстока.	программного обеспечения и необходимость своевременного обновления.
--	---------------------------	---

Продолжение таблицы 4.3

Возможности:		
В1. Государственная поддержка проектов по модернизации объектов промышленности;	Привлечение государственных и частных средств на модернизацию оборудования. Большая вариативность параметров печати. Повышение конкурентоспособности на рынке. Высокая детализация печати деталей.	Применение материалов отечественных производителей. Государственное субсидирование. Обучение специалистов для обслуживания принтера. Унификация и стандартизация проектов для упрощения обновления оборудования.
В2. Использование расходных материалов отечественного производителя;		
В3. Снижение стоимости исследований за счет использования метода экструзии;		
В4. Получить государственный заказ на изготовления образцов		
Угрозы:		
У1. Рост стоимости импортных комплектующих;	Использование отечественного оборудования для эксплуатации	Модернизация с использованием отечественного оборудования сократит
У2. Появление новых		

конкурентных технических решений;	установки. Появление конкурентных технических решений для снижения стоимости и повышению качественных показателей.	конечную стоимость услуги. Повышение квалификации специалистов.
У3. Низкий спрос на рынке, обусловленный экономической ситуацией;	Использование результатов научного исследования для повышения конкурентоспособности на рынке. Заключение договоров на оказание услуг в сфере водородной энергетики, машиностроения и/или ядерной энергетики	
У4. Коммерческая неудача вследствие малого спроса	Внедрение численного моделирования для поиска оптимальных параметров печати. Использование особенностей метода экструзии для получения деталей с высоким качеством детализации.	

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта					Слабые стороны проекта				
		C1	C2	C3	C4	C5	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
Возможности проекта	B1	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	B2	+	0	0	+	+	+	+	-	-	-
	B3	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-
	B4	+	+	+	+	+	+	-	+	0	-
Угрозы проекта	У1	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+
	У2	+	+	+	+	+	-	0	-	-	-
	У3	+	+	+	0	+	-	0	-	-	-

	У4	+	+	+	+	+	+	0	-	-	+
--	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

Приведённый анализ показал, что технология, находясь на этапе разработки, имеет хорошие шансы на коммерциализацию, с учетом проявляемого интереса партнеров и удачных исследований. При этом если переход разработки в стадию коммерциализации затянется, то возможна потеря спроса на готовую технологию.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

В данном разделе отражено распределение времени и трудового вклада участников исследовательской работы. Перечень этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, инженер
	3	Проведение патентных исследований	Руководитель, инженер
	4	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер

Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов	Руководитель, инженер
	7	Составление порядка эксперимента, выбор режимов печати	Руководитель, инженер, сотрудник-техник
	8	Изготовление исследуемых образцов	Инженер
	9	Проведение экспериментов	Руководитель, инженер, сотрудник-техник

Продолжение таблицы 4.5

Теоретические и экспериментальные исследования	10	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, инженер
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер
	12	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель, инженер

Данная таблица отображает вклад каждого участника исследовательской работы. Наибольшая часть работы приходится на инженера (магистранта).

4.2.2 Определениетрудоёмкости выполнения работ

Определяющим фактором выражения основной части стоимости научно-технической разработки являются заработные платы лиц, задействованных в реализации проекта. В связи с этим, наиболее важным

моментом является максимально точное определение трудоемкости работ каждого из участников проекта.

Для определения трудоёмкости реализации научного исследования выпускной квалификационной работы используется экспертный способ, основным показателем которого является человеко-день. Для расчёта предлагаемого значения трудоёмкости используют следующую формулу

$$t_{ож} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5}, \quad (4.1)$$

где $t_{ож}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения работы, чел.дн.; t_{\min} – минимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.дн.; t_{\max} – максимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.-дн.

Оценка трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 43 + 2 \cdot 91}{5} = 62.2 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для сотрудника – техника:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 18}{5} = 10.8 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для инженера:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 54 + 2 \cdot 117}{5} = 79.2 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Далее определим продолжительность каждого этапа работы в рабочих днях $T_{рд}$:

$$T_{рд} = \frac{t_{ож_i}}{K_{вн}} \cdot K_{д} \quad (4.2)$$

где $T_{рд}$ – продолжительность одного этапа работы, раб.дн.; $K_{вн}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение определенных длительностей, $K_{вн}=1$; $K_{д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ, $K_{д} = 1$.

Произведем длительно работ в рабочих днях.

Расчёт продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{д} = \frac{62.2 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 62.2 \text{ раб.дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для сотрудника-техника:

$$T_{РД} = \frac{10.8 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 10.8 \text{ раб.дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для инженера:

$$T_{РД} = \frac{79.2 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 79.2 \text{ раб.дни}$$

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Ленточный график проведения научных работ изображается в форме диаграммы Ганта. Для построения диаграммы необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением:

$$T_{кд} = T_{рд} \cdot T_{к}, \quad (4.3)$$

где $T_{кд}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях; $T_{к}$ – коэффициент календарности, определяющийся выражением 4.4.

$$T_{к} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (4.4)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году; $T_{вд}$ – количество выходных дней в году; $T_{пд}$ – количество праздничных дней.

Рассчитаем коэффициент календарности для шестидневной рабочей недели по формуле 4.4:

$$T_{к} = \frac{365}{365 - 54} = 1.17$$

Построим таблицу по результатам расчётов, в которой укажем трудоёмкости работ, название работы, а также укажем длительность работ в рабочих и календарных днях, таблица 4.6.

Таблица 4.6 - Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Длит. работ в раб. дни Т _{РД}			Длит. работ в кален. дни Т _{КД}		
	t _{min} , чел.-дн			t _{max} , чел.-дн			t _{ож} , чел.-дн			НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН
	НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН						
Составление и утверждение технического задания	2	-	-	4	-	-	2.8	-	-	2.8	-	-	3.3	-	-
Подбор и изучение материалов по теме	10	-	10	21	-	30	14.4	-	18	14.4	-	18	16.8	-	21.1
Проведение патентных исследований	5	-	7	8	-	15	6.2	-	10.2	6.2	-	10.2	7.3	-	12.0
Выбор направления исследований	3	-	5	4	-	7	3.4	-	5.8	3.4	-	5.8	4.0	-	6.8
Календарное планирование работ по теме	2	-	3	3	-	4	2.4	-	3.4	2.4	-	3.4	2.8	-	4.0
Проведение теоретических расчетов и обоснований	4	-	7	6	-	10	4.8	-	8.2	4.8	-	8.2	5.6	-	9.6
Составление порядка эксперимента, выбор	1	1	2	3	3	4	1.8	1.8	2.8	1.8	1.8	2.8	2.1	1.8	3.3

технических режимов															
Изготовление исследуемых образцов	-	-	2	-	-	3	-	-	2.4	-	-	2.4	-	-	2.8
Проведение экспериментов	5	5	5	15	15	15	9	9	9	9	9	9	10.5	9	10.5
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	5	-	7	10	-	12	7	-	9	7	-	9	8.2	-	10.5
Оценка эффективности полученных результатов	3	-	3	10	-	10	5.8	-	5.8	5.8	-	5.8	6.7	-	6.7
Определение целесообразности проведения ОКР	3	-	3	7	-	7	4.6	-	4.6	4.6	-	4.6	5.4	-	5.3
Итого	43	6	54	91	18	117	62.2	10.8	79.2	62.2	10.8	79.2	72.8	10.8	92.7

На основе таблицы 4.6, построен календарный план-график исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и декадам. График строится для максимального по длительности исполнения работ. Отмечены области в зависимости от исполнителей, ответственных за конкретную работу, таблица 4.7.

12	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель	7														
		Инженер	7														

где красным цветом обозначен руководитель темы, зеленым инженер (магистрант), желтым сотрудник-техник.

Были определены длительности и обозначены сроки выполнения всех запланированных видов работ. Был построен график Ганта, наглядно иллюстрирующий этапы выполнения проекта участниками.

4.3 Бюджет научно-технического исследования

4.3.1. Расчёт материальных затрат исследования

Расчёт материальных затрат включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта, таблица 4.8.

Таблица 4.8 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Малые турбины	шт	2	8000	16000
Сопло из нержавеющей стали	шт	10	700	7000
Сопло из стали	шт	10	110	1100
Лопasti	шт	1	1650	1650
Халат	шт	1	1570	1570
Бумага наждачная, зернистость – 800	шт	4	52	208
Бумага наждачная, зернистость - 1500	шт	4	30	120
Бумага наждачная, зернистость – 2000	шт	4	115	460
Бумага наждачная, зернистость – 4000	шт	4	170	680
Итого				28788

По полученным данным, наибольшие расходы приходятся на расходные материалы.

4.3.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

Используемые при выполнении ВКР: научно-исследовательская вакуумная установка, персональный компьютер, принтер Vizon2, отрезной станок Brilliant 201, шлифовальная машина Saphir 320, растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N и профилометр STIL 3D Micromesure – в

материальных затратах не учитывались, так как имелись в оснащении лаборатории. В связи, с чем рассчитаем их амортизационные отчисления.

Проведем расчет амортизации использованного оборудования на примере осциллографа Vison2. Первоначальная стоимость 160000 рублей; срок полезного использования для принтера, согласно общероссийскому классификатору основных фондов, составляет 3-5 лет, код 143312467; Время работы на всём оборудовании не превышало одного месяца за все время исследования. Тогда:

- норма амортизации:

$$H_a = \frac{1}{n} \cdot 100\% = \frac{1}{5} \cdot 100\% = 20\%, \quad (4.5)$$

где H_a – норма амортизации в процентах; n – срок полезного использования в годах.

- годовые амортизационные отчисления:

$$A_r = 160000 \cdot 0.2 = 32000 \text{ рублей}$$

- ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_m = \frac{32000}{12} = 2667 \text{ рублей}$$

- итоговая сумма амортизации основных средств:

$$A = 2667 \cdot 1 = 2667 \text{ рублей}$$

Также произведем расчет для остального оборудования и занесем полученные данные в таблицу 4.9.

Таблица 4.9 – Расчеты амортизационных отчислений

Наименование	Первонач. Цена, руб.	Норма аморти., %	Годовые аморти. отчисл., руб.	Ежемесяч. аморти. отчисл., руб.	Затраты, руб.
Принтер Vison2	160000	20	32000	2667	2667
Вакуумная установка	7000000	14.3	1001000	83417	83417

Отрезной станок Brilliant 201	260000	10	26000	2167	2167
Шлифовальная машина Saphir 320	300000	10	30000	2500	2500
РЭМ Hitachi S-3400 N	1500000	14.3	214500	17875	17875
Профилометр	1350000	14.3	193050	16088	16088

4.3.3. Основная заработная плата исполнителей исследования

Для вычисления основной заработной платы необходимо учесть научных и инженерно-технических работников, участвующих в выполнении выпускной квалификационной работы (включая премии и доплаты)

Основная заработная плата работников вычисляется по формуле:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (4.6)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20% от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата руководителя:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (4.7)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывалась по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d} \quad (4.8)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

В таблице 4.10 представлен годовой баланс рабочего времени для 6-дневной рабочей недели.

Таблица 4.10 – Баланс рабочего времени (для 6-дневной недели)

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер	Техник
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней			
- выходные дни	67	67	67
- праздничные дни	14	14	14
Потери рабочего времени			
- отпуск	56	28	28
- невыходы по болезни	1	1	1
Действительный годовой фонд рабочего времени	227	255	255

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$З_M = З_{ТС} \cdot k_p, \quad (9)$$

где $Z_{ТС}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для г. Томска). Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчёт основной заработной платы

Исполнитель	$Z_{ТС}$, руб.	Z_M , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	26500	34450	1419.45	62.2	88289.79
Сотрудник-техник	16500	21450	883.81	10.8	9545.15
Инженер	16500	21450	883.81	79.2	69997.75
Итого					167 832.69

В таблице 4.11 представлены данные по затратам на заработную плату сотрудников за весь период ВКР.

4.3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (4.9)$$

где, $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0.12-0.15).

Дополнительная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = 0.13 \cdot 88289.79 = 11477.67 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата сотрудника-техника:

$$Z_{\text{доп}} = 0.13 \cdot 9545.15 = 1240.87 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата инженера (магистранта):

$$Z_{\text{доп}} = 0.13 \cdot 69997.75 = 9\,099.7 \text{ руб.}$$

Суммарная дополнительная заработная плата равна 21818.24рублей.

4.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Ставка отчислений во внебюджетные фонды для учреждений, осуществляющих научную и образовательную деятельность, на 2023 год составляет 30% (ПФ – 22%, ФФОМС – 5.1%, ФСС – 2.9%)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб.}} = k_{\text{внеб.}} \cdot (Z_{\text{осн.}} + Z_{\text{доп}}) \quad (10)$$

где: $k_{\text{внеб.}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{\text{внеб.}} = (167\,832.69 + 21\,818.24) \cdot 0.3 \approx 56\,895.28 \text{ руб.}$$

4.3.6. Расчет затрат на научные и производственные командировки

При проведении научно-исследовательской работы в научных и производственных командировках не было необходимости.

4.3.7. Накладные расходы (расчёт затрат на электроэнергию)

Потребляемая мощность анализатора составляет 7 кВт/час. Длительность еженедельной работы на комплексной технологической установке составляет 2 часа. Стоимость электроэнергии в Томске составляет 5.748 рубля за 1 кВт/час. Стоимость электропотребления за 5 месяцев рассчитывается по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об} \cdot Ц_{э} \cdot t_{об}, \quad (4.11)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $Ц_{э}$ – тариф на 1 кВт·час; $t_{об}$ – время работы оборудования, час.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $C_{эл.об.}$, руб.
Персональный компьютер	646	0.3	1113.96
Комплексная технологическая установка	40	7	1609.44
Итого			2723.4

4.3.8. Формирование бюджета затрат

Расчет бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты НИИ	28788.00	7,15%
Затраты на специальное	124714.00	30,96%

оборудование для научных (экспериментальных) работ		
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	167 832.69	41,67%
Затраты на дополнительной заработной плате исполнителей темы	21818.24	5,42%
Отчисления во внебюджетные Фонды	56 895.28	14,13%
Затраты на научные и производственные командировки	-	0,00%
Накладные расходы	2732.4	0,68%
Итого: бюджет затрат НТИ	402780,61	100

4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчёта интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат двух (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчёта, с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{ФИН},p}^{\text{ИСП}i} = \frac{\Phi_{Pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.12)$$

где Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта; $I_{финр}$ – интегральный финансовый показатель разработки.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.13)$$

В таблице 4.14 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. Данный проект сравнивается с методикой качественного анализа материалов, заложенной в программе как базовая.

Таблица 4.14 – Сравнительная оценка характеристик

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Разработка	Базовая методика
Способствует росту производительности труда	0.25	5	5
Соответствует требованиям потребителей	0.15	4	4
Энергосбережение	0.2	4	3
Надежность	0.2	4	4
Материалоемкость	0.2	5	4
Итого I_{pi}		4.45	4.25

Характеристики имеют схожие критерии, так как методики реализованы для одного прибора. Каждая из представленных методик реализована для определённой задачи.

Пример расчёта интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_p = \frac{I_{PP}}{I_{финр}} = \frac{0.25 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 5}{1} = 4.45$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя

ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по следующей формуле:

$$I_{ИСП} = \frac{I_{Pi}}{I_{ФИНР}}, \quad (4.14)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{CP} = \frac{I_{Д.П.}}{I_{ИСП}}, \quad (4.15)$$

В таблице 4.15 представлена сравнительная эффективность данного проекта с базовой методикой качественного анализа материалов.

Таблица 4.15 – Сравнительная эффективность

Показатели	Разработка	Базовая методика
Интегральный финансовый показатель	1	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности	4.45	4.25
Интегральный показатель эффективности	4.45	4.25
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.05	0.95

Как видно из таблицы 4.15, разработанная методика эффективнее базовой. Традиционная оценка экономической эффективности полученных результатов невозможны, т.к. они носят чисто научный характер.

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

1. В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был проведен анализ конкурентоспособности создания мембран из оксида алюминия методом экструзии, была подтверждена перспективность данного метода.

2. Проведённый SWOT-анализ проекта, раскрыл сильные и слабые стороны, выявил риски, а также определил возможности для улучшения.

3. Установлено, что в календарных днях длительность работ для научного руководителя составило 72.8 дней, для сотрудника-техника 10.8, а для инженера 92.7 дней.

4. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график Ганта, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – подбор и изучение материалов.

5. Бюджет затрат научно-технического исследования составил 402780,61 рублей. Наибольшая статья расходов приходится на амортизационные отчисления, в связи с большим количеством дорогостоящего специального оборудования (40.2%). На втором месте затраты на основную заработную плату (33.79%).

6. Определены показатели ресурсоэффективности, интегральный финансовый показатель, интегральный показатель эффективности и сравнительная эффективность вариантов исполнения, значения которых свидетельствуют о достаточно высокой эффективности реализации технического проекта.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студент:

Группа	ФИО		
0 БМ11	Махаметова Назакят Аршидиновна		
Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/ специальность	03.04.02 Физика конденсированного состояния

Тема ВКР:

Экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
Введение •— Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и	<i>Объект исследования:</i> трехмерный турбулентный поток. <i>Область применения:</i> научных и инженерный. <i>Рабочая зона:</i> лаборатория <i>Размеры помещения:</i> 40 м ² .

<p>области его применения.</p> <ul style="list-style-type: none"> •– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны: сопла с соотношением сторон:</i> $\lambda=1,00; 2,66; 5,07; 7,61; 11,00; 16,00; 25,25$.</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> В ходе эксперимента скорость потока варьировалась от 2,78 до 20 м/с. Основные измерения проводились при скорости выхода из сопла, соответствующей числу Рейнольдса, рассчитанному по эффективному диаметру.</p>
<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</p>	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности <u>при эксплуатации</u></p> <ul style="list-style-type: none"> •– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового 	<p>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</p> <p>ПНД Ф 12.13.1-03. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях.</p> <p>Федеральный закон N 426-ФЗ</p>

<p>законодательства;</p> <ul style="list-style-type: none"> •— организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>“О специальной оценке условий труда.” от 28 декабря 2013 г., с изменениями от 28 декабря 2022 года.</p>
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации</p> <ul style="list-style-type: none"> •— Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов •— Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Опасность поражения электрическим током; 2. Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, вызывающих риск получения ожогов; 3. Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов <p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Отклонение показателей микроклимата; 2. Отсутствие или недостаток необходимого естественного и искусственного освещения; 3. Повышенный уровень шума; <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: использование защитных костюмов,</p>

	<p>перчатки, виброизолирующая обувь, беруши, наушники.</p> <p>Расчет: расчет системы искусственного освещения</p>
<p>3. Экологическая безопасность <u>при эксплуатации</u></p>	<p>Воздействие на селитебную зону:</p> <p>наличие промышленных отходов (вторцвет- и чермет, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника)</p> <p>Воздействие на литосферу: в ходе создания фидстока в воздух могут попасть нано-частицы порошков керамик и металлов, что приводит к загрязнению литосферы</p> <p>Воздействие на гидросферу: наличие частиц металлов и абразива при использовании шлифовально-полировальной машины</p> <p>Воздействие на атмосферу: пары расплавленного полимера</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях <u>при эксплуатации</u></p>	<p>Возможные ЧС:</p> <p>Природные катастрофы (ураган);</p> <p>Техногенные аварии (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, взрыв газовых баллонов);</p> <p>Наиболее типичная ЧС: пожар (неисправность в</p>

	электрических сетях, нарушение технологического режима)
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Сечин Андрей Александрович	к.т.н .		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	Махаметова Назакят Аришидиновна		

Социальная ответственность

1. 5.1 Введение в раздел

Социальная ответственность является важным аспектом в современном мире, где все больше людей осознают свою роль в сохранении окружающей среды и улучшении качества жизни на планете. В этом контексте экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии имеет большое значение, так как может привести к разработке новых технологий, которые будут более эффективны и экологически безопасны. В данной работе рассмотрены результаты экспериментального исследования турбулентной свободной струи при акустическом воздействии, которые могут быть использованы в различных областях промышленности и технологий.

Исследования в области физики и механики могут иметь важное значение для различных отраслей промышленности, включая авиацию, судостроение, энергетику и другие. Результаты экспериментального исследования турбулентной свободной струи при акустическом воздействии могут помочь улучшить производительность и эффективность различных технологических процессов, что может привести к экономическому росту и улучшению качества жизни людей.

Кроме того, данное исследование может иметь важное значение для экологии. Улучшение производительности технологических процессов может привести к более эффективному использованию ресурсов и снижению негативного влияния на окружающую среду.

Таким образом, проведение исследований в области физики и механики может быть связано с социальной ответственностью, поскольку они могут привести к улучшению экономического и экологического благосостояния общества.

Исследования в области неустойчивости механического равновесия в изотермических многокомпонентных газовых смесях имеют важное значение для разработки безопасных технологий и стратегий управления рисками. Они способствуют предотвращению аварийных ситуаций, минимизации воздействия на окружающую среду и обеспечению безопасности работников и общества в целом. Благодаря этим исследованиям можно разработать эффективные меры контроля и регулирования газовых смесей, что способствует созданию устойчивой и безопасной рабочей среды.

5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В рамках экспериментального исследования турбулентной свободной струи при акустическом воздействии возникают ряд правовых и организационных вопросов, связанных с обеспечением безопасности.

Во-первых, необходимо обеспечить безопасность персонала, занятого в проведении эксперимента. Для этого требуется провести анализ возможных рисков и определить меры по их предотвращению. Кроме того, необходимо обеспечить соответствующую защиту от шума и вибраций, которые могут возникнуть в процессе эксперимента.

Во-вторых, необходимо обеспечить безопасность окружающей среды. В процессе эксперимента могут возникнуть шумы и вибрации, которые могут негативно повлиять на здоровье людей и животных, а также на экологическую ситуацию в целом. Поэтому необходимо провести соответствующий анализ и определить меры по минимизации негативных последствий.

В-третьих, необходимо обеспечить соблюдение законодательства в области безопасности и охраны труда. Это требует проведения соответствующей экспертизы и получения соответствующих разрешительных документов.

В целом, экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии требует комплексного подхода к обеспечению безопасности, который включает в себя анализ рисков, определение мер по их предотвращению, защиту персонала и окружающей среды, а также соблюдение законодательства в области безопасности и охраны труда.

5.3 Производственная безопасность

Производственная безопасность является одним из важнейших аспектов в промышленности. Она охватывает все меры, направленные на предотвращение возможных опасностей, связанных с производственной деятельностью. Одной из таких опасностей является возможность возникновения турбулентной свободной струи при акустическом воздействии.

Экспериментальное исследование данного явления позволяет определить его характеристики и выработать меры по предотвращению возможных последствий. Для проведения эксперимента необходимо создать условия, при которых будет возможно воспроизвести турбулентную свободную струю при акустическом воздействии.

В ходе исследования необходимо определить параметры струи, такие как ее скорость, температуру и давление. Также необходимо измерить уровень звукового давления, которое вызывает турбулентную свободную струю. Важным этапом эксперимента является анализ полученных данных и выработка рекомендаций по обеспечению безопасности при работе с турбулентной свободной струей.

Таким образом, экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии является важной составляющей производственной безопасности в промышленности. Оно позволяет определить характеристики данного явления и выработать меры по предотвращению

возможных опасностей.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочих местах

№	Фактор(ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативный документ
1	опасные и вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания»; ГОСТ 12.1.002 – 84 «ССБТ. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.
2	опасные и вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде и характеризируемые повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума;	ГОСТ 12.1.003-2014 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности (Переиздание)»; ГОСТ 12.2.024-87 «ССБТ. Шум. Трансформаторы силовые масляные. Нормы и методы

		контроля»; СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания».
3	опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождение работающего;	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания».
4	опасные и вредные производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком искусственного и естественного освещения.	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания».
5	производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий.	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов; ГОСТ 12.1.019-2017

		<p>ССБТ.</p> <p>Электробезопасность.</p> <p>Общие требования и номенклатура видов защиты.</p>
--	--	---

5.3.1 Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями

Одним из опасных и вредных производственных факторов, связанных с электромагнитными полями, является возможное воздействие на организм человека электромагнитных полей высокой интенсивности. Это может происходить при работе с высоковольтными линиями электропередачи, электростанциями, радиостанциями и другими источниками электромагнитных полей.

Кроме того, экспериментальные исследования показывают, что электромагнитные поля могут влиять на турбулентность свободной струи при акустическом воздействии. Это может приводить к нарушению работы оборудования и повышению риска возникновения аварий.

Другим вредным производственным фактором, связанным с электромагнитными полями, является электромагнитный шум. Он может возникать при работе с электронными устройствами, компьютерами, телевизорами и другими электрическими приборами. Этот шум может вызывать головные боли, усталость, нарушение сна и другие негативные последствия для здоровья человека.

Таким образом, необходимо принимать меры по защите от опасных и вредных производственных факторов, связанных с электромагнитными полями.

К ним относятся использование специальной защитной электрооборудования, организация правильной системы заземления, соблюдение правил безопасности при работе с электрооборудованием и т.д. Результаты исследований позволяют разработать меры по минимизации воздействия электромагнитных полей на газовые смеси и обеспечить безопасность работников. Это может включать определение предельно допустимых уровней электромагнитных полей, разработку методов и средств защиты, а также рекомендации по проектированию и эксплуатации оборудования, чтобы минимизировать потенциальные риски.

Нормы на предельно допустимые напряженности электрического поля (ЭП) на промышленной частоте для персонала установлены в ГОСТ 12.1.002 – 84[22]:

$E \geq 25$ кВ/м – пребывание в ЭП без средств защиты не допускается;

$E \leq 20$ кВ/м допустимое время пребывания в ЭП вычисляют по формуле:

$T, \text{ часов} = (50 / E) - 2, E \leq 5$ кВ/м – пребывание в ЭП допускается в течение полного рабочего дня.

Для населения существуют следующие уровни воздействия электрического поля промышленной частоты из СанПиН 1.2.3685-21

«Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания»: внутри жилых зданий 0,5 кВ/м, для территории зоны жилой застройки – 1 кВ/м[23].

Интенсивность воздействия МП определяется напряженностью (Н), или магнитной индукцией (В) (их эффективными значениями). Напряженность МП выражается в А/м (кратная величина – кА/м) магнитная индукция – в Тесла (Тл, дольные величины мТл, мкТл, нТл). Индукция и напряженность МП в воздухе связаны следующим соотношением:

$$B = \mu_0 \times H = 4\pi \times 10^{-7} \times H,$$

где B – магнитная индукция, Тл;

μ_0 – магнитная постоянная, которая равна $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; H – напряженность магнитная поля, А/м.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) магнитного поля устанавливаются по СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания» в зависимости от времени пребывания персонала для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия (табл. 5.2):

Таблица 5.2 – Предельно допустимые уровни магнитного поля

Время пребывания, ч	Допустимые уровни МП Н(А/м)/В(мкТл) при воздействии	
	общем	
< 1	1600/2000	
2	800/1000	
4	400/500	
8	80/100	

Таким образом, исследования неустойчивости механического равновесия в изотермических многокомпонентных газовых смесях имеют важное значение для анализа опасных и вредных производственных факторов, связанных с электромагнитными полями. Они способствуют разработке мер безопасности, обеспечивающих защиту работников и предотвращение негативных последствий воздействия ЭМП на производственные процессы.

5.3.2 Опасные и вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде и характеризруемые повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума

Акустические колебания в производственной среде могут вызывать серьезные вредные последствия для здоровья работников. Они могут приводить к нарушению слуха, головной боли, усталости, снижению работоспособности, повышению уровня стресса и т.д.

Одним из наиболее опасных и вредных производственных факторов является шум. Шум может возникать в результате различных технологических процессов, например, при работе машин и оборудования, при перемещении грузов, при перевозке материалов и т.д. Он может иметь различную частоту, интенсивность и продолжительность.

Для изучения воздействия акустических колебаний на производственную среду проводятся экспериментальные исследования. Одно из таких исследований – это исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии.

В рамках этого исследования была проведена серия экспериментов с использованием специального оборудования. Была создана турбулентная свободная струя, которая подвергалась акустическому воздействию различной интенсивности и частоты.

В результате экспериментов было установлено, что акустические колебания могут значительно влиять на характеристики турбулентной свободной струи. Они могут вызывать изменения в скорости потока, турбулентности, форме и размере струи.

Таким образом, экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии позволяет более глубоко изучить влияние акустических колебаний на производственную среду и разработать меры по защите работников от негативных последствий шума.

5.3.3 Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождение работающего

Одним из опасных и вредных производственных факторов, связанных с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождение работающего, является турбулентная свободная струя при акустическом воздействии.

Это происходит, когда воздух движется со скоростью, превышающей критическую, и образуется турбулентный поток. При этом возникают колебания давления и скорости, которые могут привести к различным негативным последствиям для здоровья работающих.

Экспериментальное исследование такой свободной струи при акустическом воздействии позволяет определить оптимальные параметры работы оборудования и условия труда для минимизации рисков для здоровья работающих.

В ходе исследования измеряются параметры турбулентного потока, такие как скорость, давление, температура и влажность воздуха. Также проводятся измерения уровня шума и вибрации.

На основе полученных данных можно определить оптимальные режимы работы оборудования и условия труда, которые позволят минимизировать риски для здоровья работающих. Кроме того, на основе результатов исследования

можно разработать рекомендации по организации безопасного труда и профилактике профессиональных заболеваний.

Таблица 5.3 – Допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах впомещениях

Пе р и о д го д а	Катег ория работ по уровн ю энерг озатр ат, Вт	Температура воздуха, °С	Темпе ратур а повер хност ей, °С	Относ итель ная влажн ость возду ха, %	С к о р р о с т ь Д в и ж е н и я в о з д у х	Для диапаз она темпе ратур воздух а ниже оптим альн ых велич ин, не более	Для диапаз она темпе ратур воздух а выше оптим альн ых велич ин, не более
		Диапазон ниже оптимальн ых величин	Диапа зон выше оптим альн ых велич ин				

						а , м / с		
Теп лый	I6(140 -174)	20-21,9	24, 1- 28	1 9 - 2 9	15- 75	0 , 1	0 , 3	
Хол о д н ы й	I6(140 -174)	12-20,9	23, 1- 24	1 8 - 2 5	15- 75	0 , 1	0 , 2	

5.4 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность- это важный аспект, который необходимо учитывать при проведении любых экспериментов и исследований. В данном случае, экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии может иметь важное значение для понимания процессов, связанных с транспортировкой и распространением загрязнений в атмосфере.

В ходе эксперимента была изучена динамика турбулентной свободной струи при воздействии на нее акустических колебаний различной частоты и

амплитуды. Были получены данные о скорости потока, температуре, концентрации загрязнений и других параметрах, которые могут влиять на экологическую безопасность.

Одним из главных результатов эксперимента стало выявление эффекта снижения концентрации загрязнений в струе при определенных частотах акустических колебаний. Это может быть полезно для разработки новых методов очистки воздуха и снижения выбросов вредных веществ в атмосферу.

Также было обнаружено, что акустическое воздействие может изменять динамику турбулентной свободной струи, что может привести к изменению распределения загрязнений в атмосфере. Это может быть важным фактором при планировании строительства новых промышленных объектов или расширении существующих производств.

Таким образом, экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии имеет большое значение для понимания процессов, связанных с экологической безопасностью. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых технологий и методов, которые помогут снизить негативное воздействие промышленности на окружающую среду.

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В настоящее время безопасность в чрезвычайных ситуациях является одной из наиболее актуальных проблем. В связи с этим проводятся исследования, направленные на разработку новых методов и средств обеспечения безопасности людей в экстремальных условиях.

Одним из таких исследований является экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии. Турбулентная свободная струя – это поток газа, который движется со скоростью,

превышающей скорость звука. В экстремальных условиях такой поток может возникать, например, при аварии на газопроводе или при пожаре.

Акустическое воздействие на турбулентную свободную струю может привести к ее уменьшению и более равномерному распределению скорости газа. Это может снизить опасность возникновения пожара или взрыва в экстремальных условиях.

В рамках экспериментального исследования были проведены измерения скорости и температуры газа в турбулентной свободной струе при акустическом воздействии. Было выявлено, что акустическое воздействие действительно может привести к уменьшению турбулентности и более равномерному распределению скорости газа.

Таким образом, экспериментальное исследование турбулентной свободной струи при акустическом воздействии может стать основой для разработки новых методов и средств обеспечения безопасности людей в экстремальных условиях.

2. 5.6 Вывод по разделу

В разделе о социальной ответственности в экспериментальном исследовании турбулентной свободной струи, было показано, что научные исследования могут иметь широкие социальные последствия и влиять на жизнь людей. В данном случае, исследование турбулентной свободной струи может привести к улучшению производительности двигателей, что в свою очередь может привести к экономическим выгодам и сокращению выбросов вредных веществ.

Однако, при проведении таких исследований необходимо учитывать их потенциальные негативные последствия для окружающей среды и здоровья людей. Необходимо соблюдать этические нормы и принципы, а также учитывать мнение общества и заинтересованных сторон.

Таким образом, социальная ответственность научных исследований является важным аспектом развития науки и технологий, который должен быть учитыван при планировании и проведении исследований.

Литература

"Конституция Российской Федерации" (принята всенародным голосованием 12.12.1993 с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 01.07.2020)

Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 года № 197-ФЗ (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.03.2023 г.)

ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов

ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования»

ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения.

ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности

1 A BRIEF REVIEW OF WORKS REGARDING THE AERODYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF TURBULENT FREE FLOWS

General characteristics of turbulent flows

Turbulent flows have been the subject of experiments and numerical calculations for 40 years. Free flows are the raw data for studying the physical properties of turbulent flow in a medium, because they are used to evaluate physical models. In addition, they are of particular interest for use in many technical applications; here are some examples of such applications: combustion engines, propulsion plant, spray dryer, laser metal treatment, chemical mixing, blade cooling, etc.

It was soon discovered that axisymmetric jet configurations are significantly better than their counterparts in certain aspects. In particular, they promote mixing with the enveloping fluid. Due to the presence of higher-order instability forms, axisymmetric jets are more unstable than circular jets. The first experimental work was carried out in 1933, where fields of averaged velocities in jets of rectangular cross section with initial ratio of sides in cross section of 1,2,5 and 10 were studied experimentally by Trentakoste and Sforza, Krashennikov and Rogalskaya. Rajaratnam combined most of the analytical solutions and conclusions from the experiments performed to study two-dimensional, three-dimensional jets and circular section jets. This occurred at a time when significant results had been achieved in numerical studies, so special attention was paid to the study of the features of planar and axisymmetric jets, which is why most of the studies were carried out then and the results of these studies are now available[1-12].

At the same time, very little research has been done on turbulent three-dimensional jets using numerical simulation because of the high cost associated with this kind of modeling.

More recently, a comprehensive numerical study has been conducted by Miller et al. with detailed illustrations of the phenomena of axis change and entrainment velocity on various noncircular jets, including oval, rectangular, and triangular jets. Wilson and Demuren created a finite-difference numerical

model based on a 2:1 rectangular cross-section jet using three different turbulent states at the jet inlet. Holdo and Simpson analyzed a 10:1 rectangular turbulent jet using a large-scale turbulent flow model. A comparison of the results of the experiments conducted by Quinn and others with those of Holdo and Simpson showed a satisfactory match in the far-field, but did not show initial acceleration of the jet toward the axis within the original five equivalent diameters of the streamline field. Rembold et al. investigated the transient process of a rectangular cross-section jet with an AR=5 aspect ratio using direct numerical simulation (DNS)[13-16].

The DNS model has high predictive accuracy at low Reynolds numbers and high computational cost. LES (Large Eddy Simulation) can achieve large Reynolds numbers, but is also characterized by high computational cost. However, RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equations) can be applied up to high Reynolds numbers, which cannot be achieved with direct numerical simulation (DNS).

The purpose of this research work is to investigate the two-parameter turbulence model in modeling the turbulent flow field in free jets flowing from a nozzle with a rectangular cross section. In this study, we used two-parameter turbulence modeling to predict the main flow parameters, velocity profiles in the near zone, and the degree of velocity reduction in the far zone. Berg et al. used 2 standard two-parameter turbulence models ($k-\varepsilon, k-\omega$) to simulate the flow coming out of a rectangular section nozzle. It was found that the $k-\varepsilon$ model simulation method was the best way to predict velocity reduction along the central axis of the flow in both near- and far-field study areas. All of the results of these studies agree well with experimental data. However, Berg et al. did not consider the effect of Reynolds numbers, aspect ratio and temperature field. In this research paper, the effect of Reynolds numbers was investigated over a wide range of Re . It should be noted that the medium in all cases is air, and the turbulence model $k-\varepsilon$ was used, as well; the velocity and temperature fields were studied, and the effect of aspect ratio on mixing in jets with rectangular cross section was analyzed. The study was conducted with aspect ratios ranging from 1:1 to 1:4. The Reynolds number,

based on the hydraulic diameter at the inlet, was taken in the range from 800 to 25600. This research work is a study of the effect of conditions in the inlet flow section on the parameters of a rectangular cross-section jet flowing into a larger area. It should be noted that the temperature field has also been investigated.

Further, the main research is done in scientific work [17].

1.2 Definitive equations

The constitutive equations are the continuity equations, momentum equations and energy constancy equations. The following assumptions are considered for flow modeling: steady state, constant fluid parameters, incompressibility, Newtonian fluid and the absence of natural convection.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j T}), \quad (3)$$

where x_1, x_2, x_3 are the Cartesian coordinate directions ($x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$), u_i are the time-averaged Cartesian components of the velocity vector with the commonly used dashes omitted for convenience ($u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w$), $\overline{u_i u_j}$ are the turbulent stress tensor, p is pressure. The correlation of fluctuations on the velocity-temperature scale, which determines the diffusive turbulence flux ($\overline{u_j T}$), is modeled using the Boussinesq approximation:

$$\overline{u_j T'} = -\alpha_t \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right), (4)$$

where the thermal turbulent diffusivity is defined as:

$$\alpha_t = \frac{c_\mu k^2}{Pr_t \varepsilon}. (5)$$

The turbulent Prandtl number, Pr_t , is a constant in the energy constancy equation; in most simple turbulent flows, the turbulent Prandtl number is taken as an order of one.

The turbulence model used for the study in this research paper is characterized by the following: the standard k - ε model developed by Launder and Spalding. Dynamic turbulent viscosity models assume that the following relation is applied to the Reynolds criteria in Eq.

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, (6)$$

where μ_t is the dynamic turbulent viscosity, δ_{ij} Kronecker delta, k kinetic energy of turbulence per unit mass. In the k - ε model, the dynamic turbulent viscosity is calculated using the ratio

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, (7)$$

where c_μ is a constant, and the values of k and scattering ε are obtained by solving the following transfer equations:

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k - \rho \varepsilon, \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + P_\varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 P_k - c_2 \rho \varepsilon). \quad (9)$$

The degree of kinetic energy production of turbulence is determined using the following formula:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (10)$$

1.3 Detailed description of numerical studies

To solve the system of equations, the finite-volume method with appropriate transfer of variables was used. The fields of averaged pressures and velocities were calculated using the SIMPLEC algorithm. To prevent fluctuations in the baric field, the Rhee-Chow interpolation method was used. A second-order Van Leer difference scheme was adopted to determine transient values in the momentum equations and energy constancy equations. The equations reduced to a discrete form were solved several times using a linear algorithm using the method [18, 19].

Due to the presence of high velocity gradients around the central flow line, an irregular 120 x 90 x 90 grid was used to discretize the flow area. Structured, orthogonal coordinate grids have been developed for the solution region shown in Figure 1. As shown in Figure 1, the z - y plane, with uniform spacing between node points, was used in the input area ($0 \leq z \leq L_z i, 0 \leq y \leq L_y i$) in both the z -axis and y -axis directions. Outside the entrance zone, a geometrically expanding mesh, in the z -axis direction as well as in the y -axis direction, was adopted as an expansion factor of 1.06. Also in the x -axis direction, a geometrically expanding mesh was

adopted as an expansion coefficient of 1.06. Three computational meshes were used for the autonomous mesh tests with the following node beam distributions in the z, y axis direction, respectively: $50 \times 50 \times 80$ (coarse mesh), $70 \times 70 \times 100$ (medium coarse mesh) and $90 \times 90 \times 120$ (fine mesh). The maximum speed differences along the central line (along the x axis) between coarse and medium mesh and between medium and fine mesh were respectively 2 and 0.01%. Based on these results, the fine grid was chosen in this study for all calculations. These calculations were performed using the modified CALC-BFC code. The solutions were found to converge when the maximum residual for all equations reduced to discrete form was no more than 10^{-4} [20].

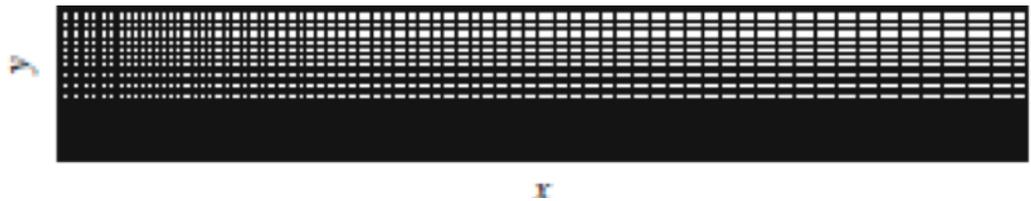


Figure 1-Mesh in x - y plane

The geometric elements along with the coordinate system are shown in Figure 2. The turbulent free jet exits a rectangular-shaped vent of size $(2L_y i \times 2L_z i)$ into a stationary environment. In this paper, due to symmetry, only one quarter of the flow area is modeled. The planes $z=0$ and $y=0$ shown in Figure 2 are symmetry planes, while the plane $x=0$ is a solid wall, except for the vented area.

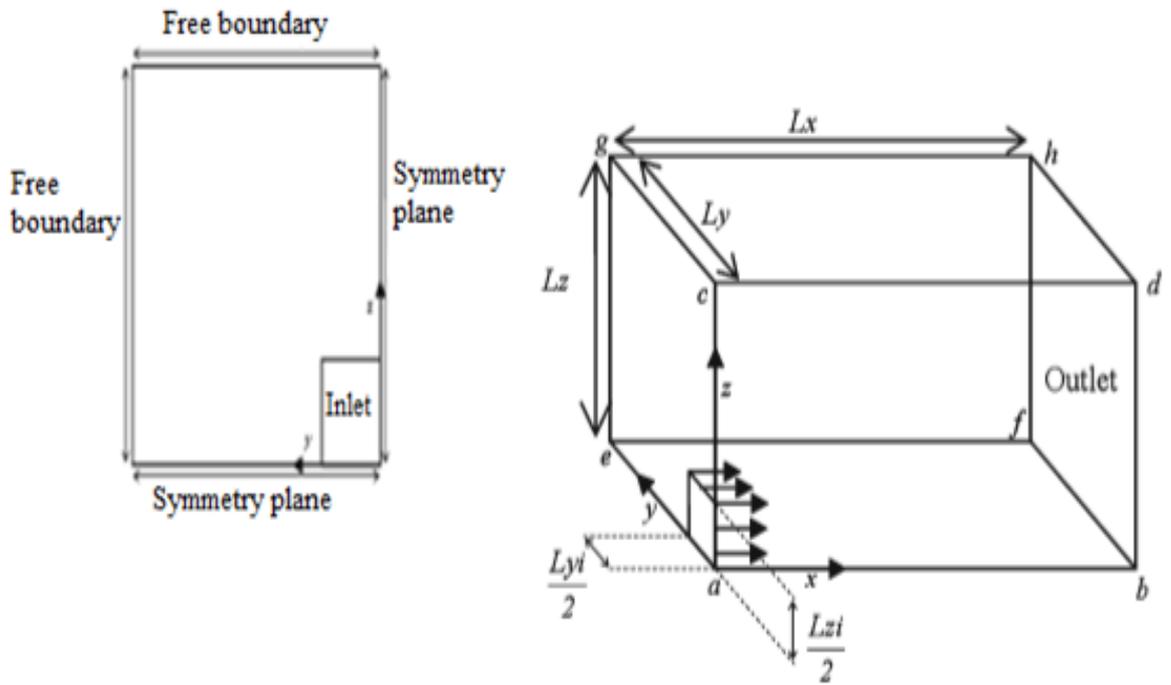


Figure 2-Scheme of geometric elements

The computational domain was defined with dimensions L_z , L_y and L_x in the lateral direction (z) across the flow (y), and along the flow (x), respectively. The flow flows out through the open plane at $x=L_x$. The values of L_x are 100 times the hydraulic diameter. The values L_y and L_z , for acceptable free boundary conditions, were chosen to be 20 times as long as the hydraulic diameter in the y -axis and z -axis direction. Within this geometric scheme, planes $a-b-f$ and $c-a-b-d$, are the symmetry planes, and plane $b-d-h-f$ is the exit point with a fully formed boundary condition. Planes $c-d-h-g$ and $e-f-h-g$ are planes with a free flow boundary with constant pressure [21,22].

The inlet section is defined by $x=0$ and consists of two zones: the inlet zone at $0 \leq y \leq L_{yi}$, $0 \leq z \leq L_{zi}$ and the wall zone defined by the residual of the inlet section. The values of Reynolds number in this numerical study are taken as:

$$Re=800, 1600, 3200, 6400, 12800, 18000, 25600.$$

1.4 Borderline state

There are 5 different kinds of boundaries to be analyzed: entry point, walls, symmetry, exit point, and entrainment boundary (free flow boundary).

Entrance point. At the entry point, all variables are known, using uniform velocity and temperature profile with two turbulence intensities ($I=0.05, I=0.01$). Inlet turbulence energy is calculated by the formula:

$$k_{in} = 1,5I^2u_{in}^2, (11)$$

The degree of dissipation at the input is calculated by the formula:

$$\varepsilon_{in} = (\rho c_{\mu} k^2)(1,000I\mu), (12)$$

Wall. $u=0, v=0$ (no-slip condition), k, ε are calculated by the wall function, constant temperature conditions (ambient temperature) are assumed at the wall.

Symmetry. In the symmetry plane, a zero normal gradient is assumed.

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \frac{\partial \omega}{\partial n} = 0, \frac{\partial k}{\partial n} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, (13)$$

Exit point. At the flow outlet, a zero gradient is taken along the axial direction.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0, \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0, (14)$$

External entrainment boundary (free flow boundary).

The free boundary of the flow is moved away from the entrance to the jet so that the pressure is constant. Zero values for k, ε are applied, the temperature value is assumed to be the ambient air temperature. When calculating the transverse velocity component, parallel or perpendicular to the free flow boundary, a zero gradient condition is assumed.

1.5 Research results and discussion

1.5.1 Flow configuration in the study area

Velocity vectors and computational devices for flow measurement were obtained and presented for consideration. The velocity vectors in the symmetry plane are shown in Figure 3. The figure clearly shows that because of the boundary layer at the flow boundaries, the secondary flow rushes away from the free flow boundaries toward the main flow.

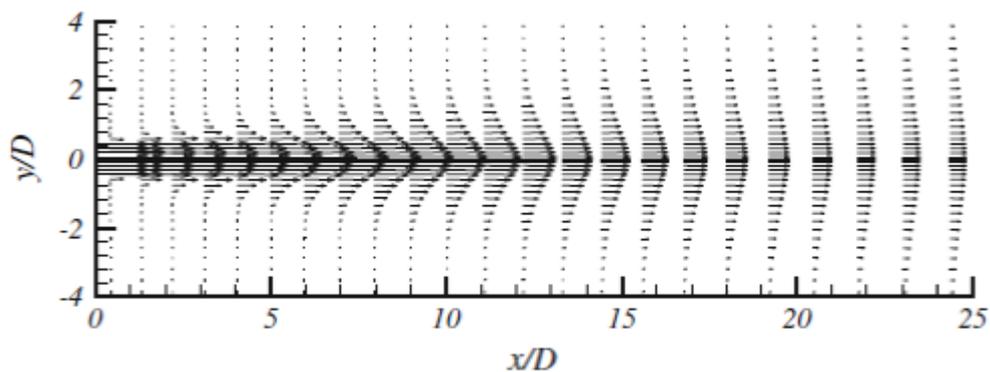


Figure 3-Speedvectors in the symmetry plane,AR=1

The contours of the average flow velocity in the symmetry plane are shown in Figure 4. The potential core of the flow is clearly visible in Figure 3.

The velocity field contours show the dissipation of the flow under the effect of intense boundary layer shear. To further study the streamline field, it is necessary to analyze the transversal flow field. Consequently, in some places downstream, transversal cuts are used, at right angles to the main flow.

The velocity vectors at these locations are shown in Figure 5. The field shows how mass transfer occurs from the free boundary region toward the main flow. Because of the strong tangential stresses along the flow boundaries, another flow appears, starting from the center line of the flow and rushing toward its boundaries, which enhances the effect of blurring the jet into an infinite environment.

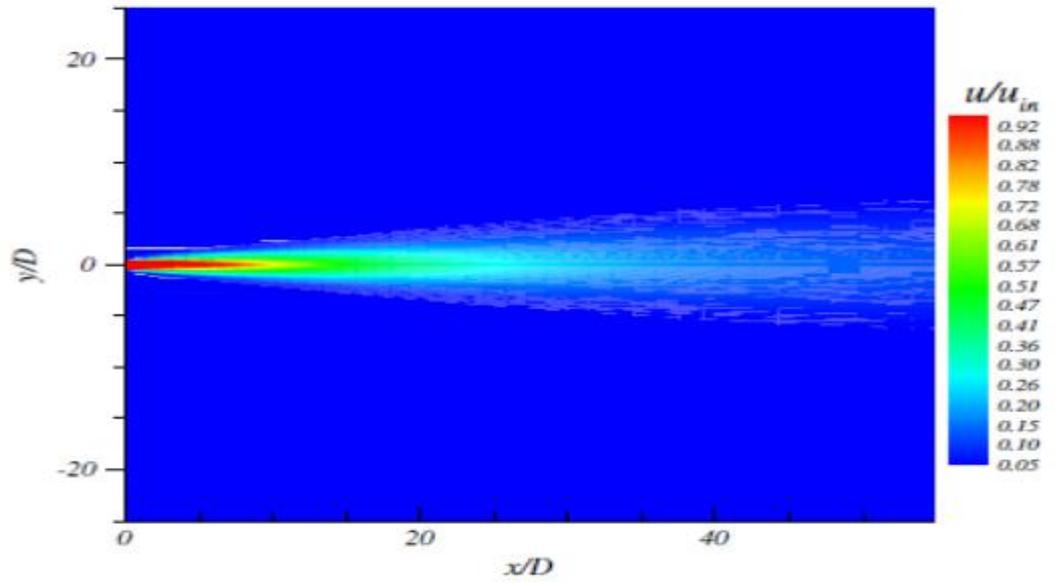
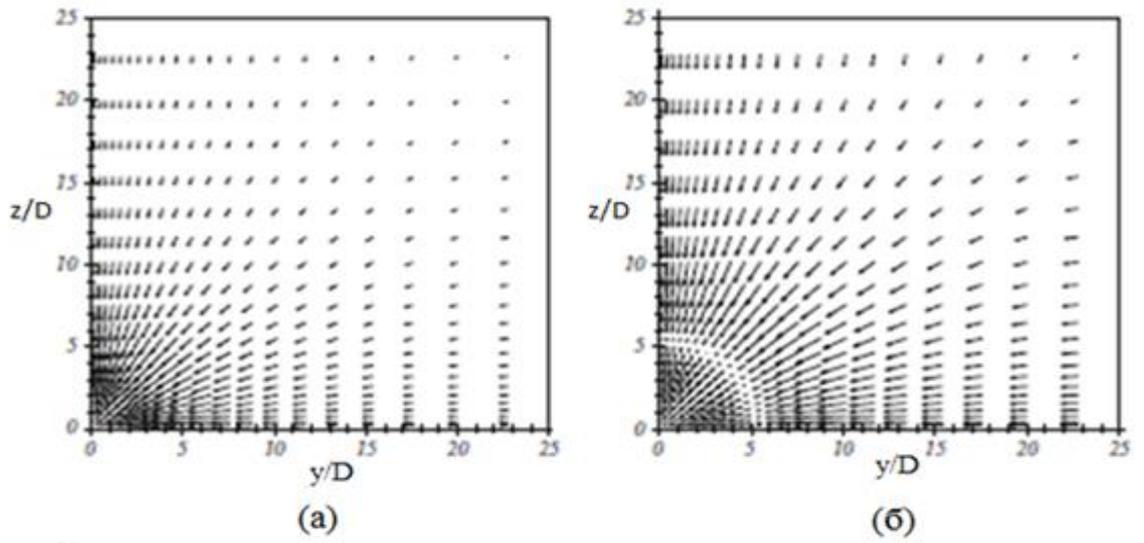
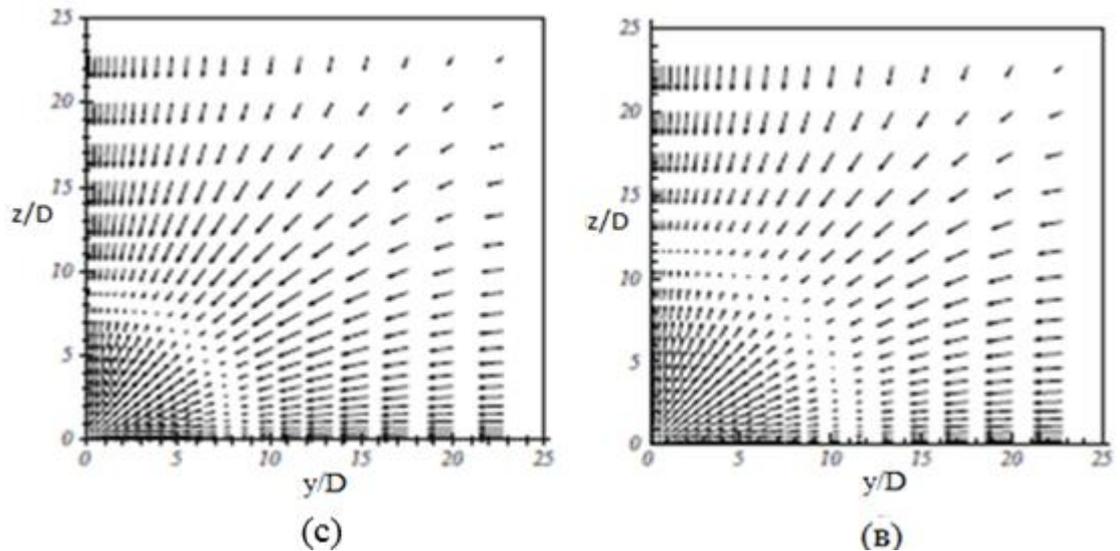


Figure 4-Speedcontours in the symmetry plane,AR=1





a) $x/D= 20$, b) $x/D= 40$, c) $x/D= 60$, c) $x/D= 80$

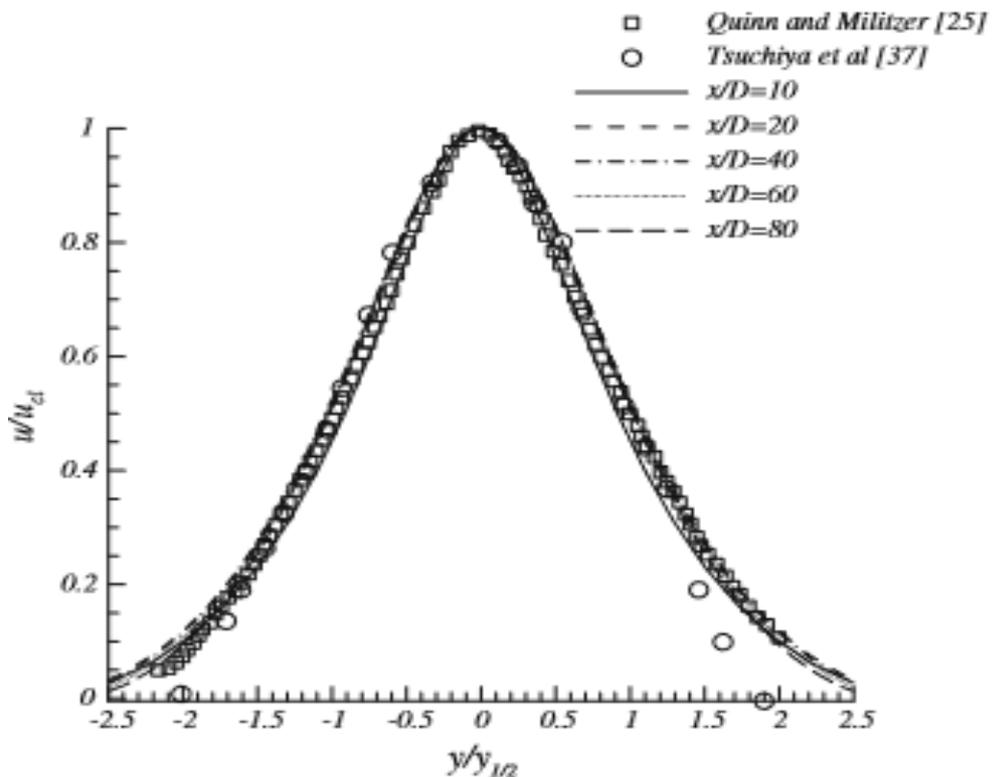
Figure 5-Field of streamline in cross-flow direction at $x/D, AR= 1$

At the same time, the velocity of the secondary flow, flowing along the main flow, will decrease. Moving in the direction of the axis, the jet of rectangular cross-section gradually turns into a jet of circular cross-section.

1.5.2 Results of the study of the rectangular section

Figure 6 shows normalized velocity diagrams at several x/D ratios with full acceptance of this condition. It is important to note that the similarity solution for calculating the flow parameters is based on this condition. It should be understood that the flow is similar to itself in the zone of full development after passing this zone. Based on the available results, the self-similar distribution occurs after $x/D=20$ at $I=0.01$. The velocity profiles are normalized with respect to the local velocity along the flow centerline, u_{c1} , while the x coordinate, counted in the flow direction, is normalized with respect to D , and the transverse coordinate y is normalized with respect to the local flow half-width, $y_{1/2}$. The predicted longitudinal velocity components show satisfactory agreement with the measurements. This difference can be attributed

to the difference in Re number, since the experimental data were obtained at a different Reynolds number, which exceeded the given Re number. This is confirmed by Malstrom et al. and Mee et al. who showed that the flow parameters change as Re number increases up to the critical value. In the present research work, the same results were obtained at $I=0.05$ in the far zone, the autosimilar distribution appears after the ratio $x/D=10$ [23,24].



Quinn and Miltzer (25), Tsuchiya et al (37)

Figure 6-Distribution of the average value u vertically, $AR= 1$

Figure 7 shows a comparison of the flow attenuation in the downstream direction along the central velocity line, u_{c1} , under two inlet boundary conditions, with measurements made by Quinn and Miltzer and Mee et al. Two different states of the inlet flow boundary are considered. Figure 7 shows that the flow development depends on the inlet flow boundary conditions. Figure 8 shows the flow development in the

half-width, $y_{1/2}$. $I=0.05$, with the inlet turbulence intensity, which is even more in agreement with the measurements made [25].

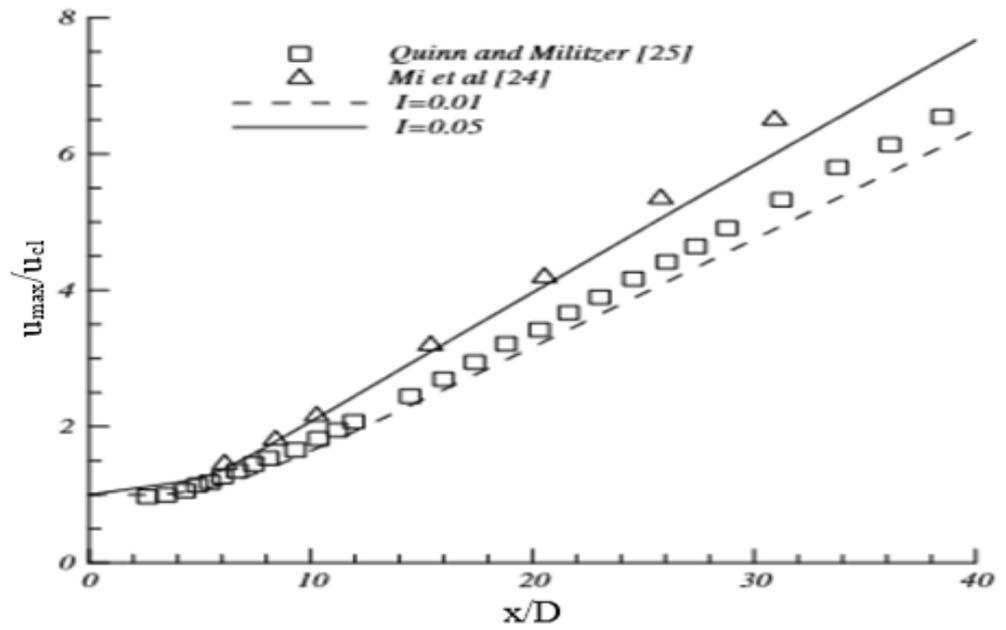


Figure 7-Comparison of velocity drop along the center line, AR= 1

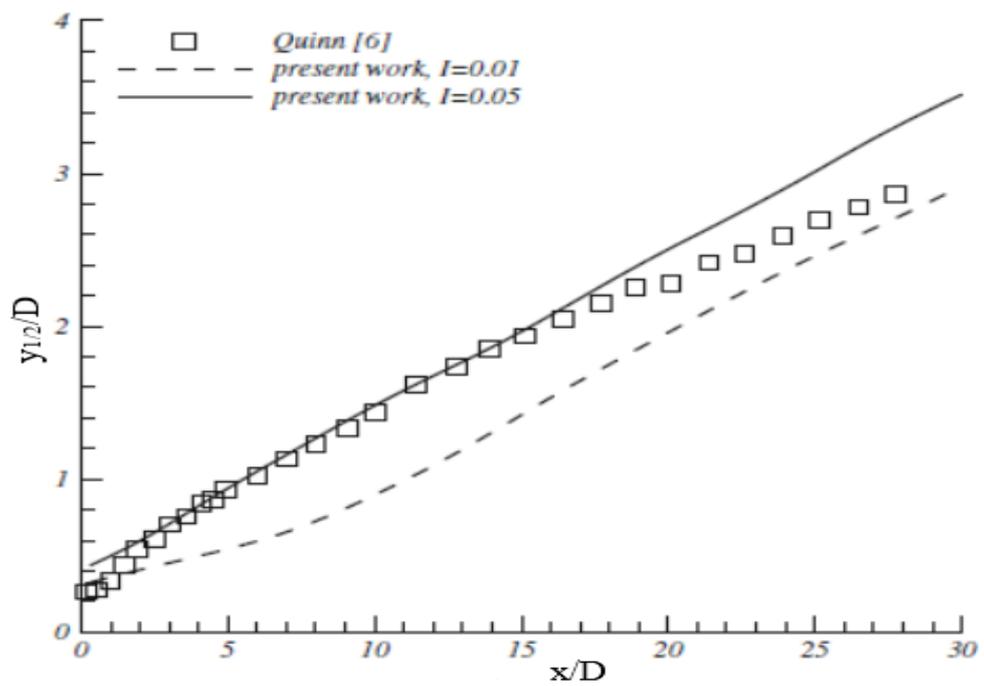


Figure 8-Flowpropagation, AR= 2

Figure 9 shows the arithmetic mean vertical or transverse velocity component, v , profiles at $I=0.05$. After $x/D > 10$, one can observe a tendency towards automodel distribution. When considering another condition of flow entrance boundary, results for v , similar to above described results were obtained. However, at $I=0.01$, an autosimilar distribution appears after $x/D > 20$. The further away from the center, the more negative the values of v become, indicating entrapment of masses in the flow. At the boundary of the computational domain, the value of v tends to zero. The profiles of w are characterized by a similar behavior.

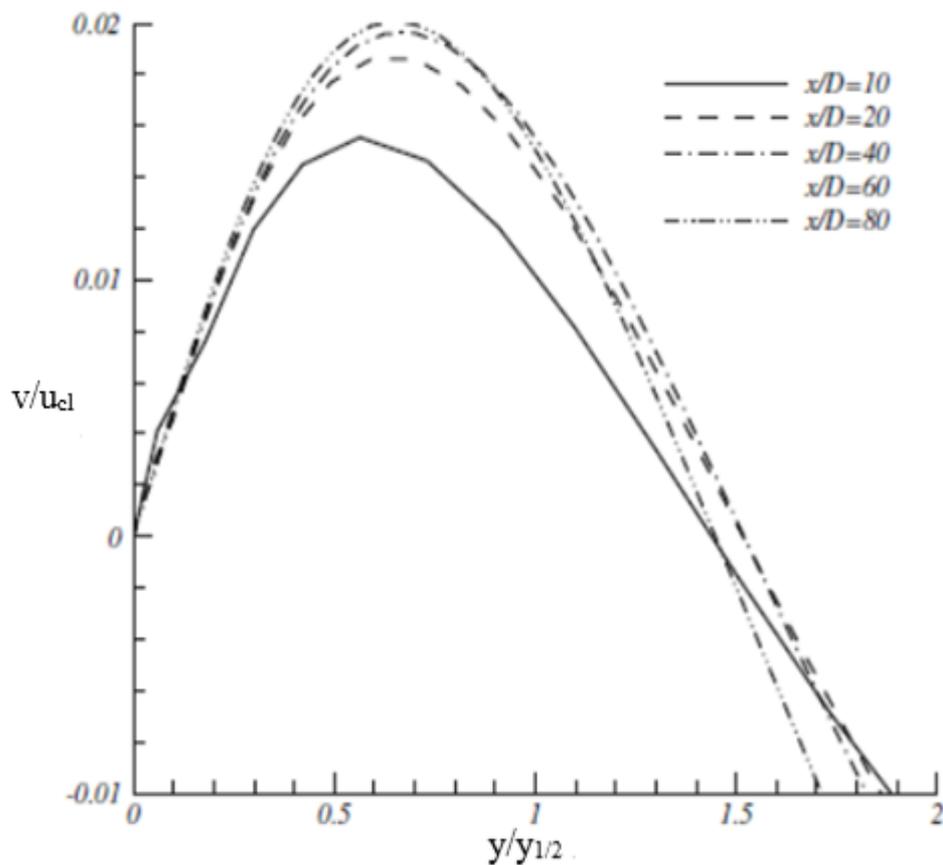


Figure 9-Distribution of the average value of v at different axial locations, AR= 1

One important hypothetical assumption when making an analytical solution for calculating two-dimensional symmetric jets is that the momentum of the jet is constant in the direction of the flow. This hypothetical assumption is depicted in Figure 10 for a square-section jet, which shows that for the variation of the normalized momentum in the direction of the x -axis, the momentum should be considered a constant. Thus, this figure confirms the assumption of constant momentum for jets with free boundaries in analytical solutions.

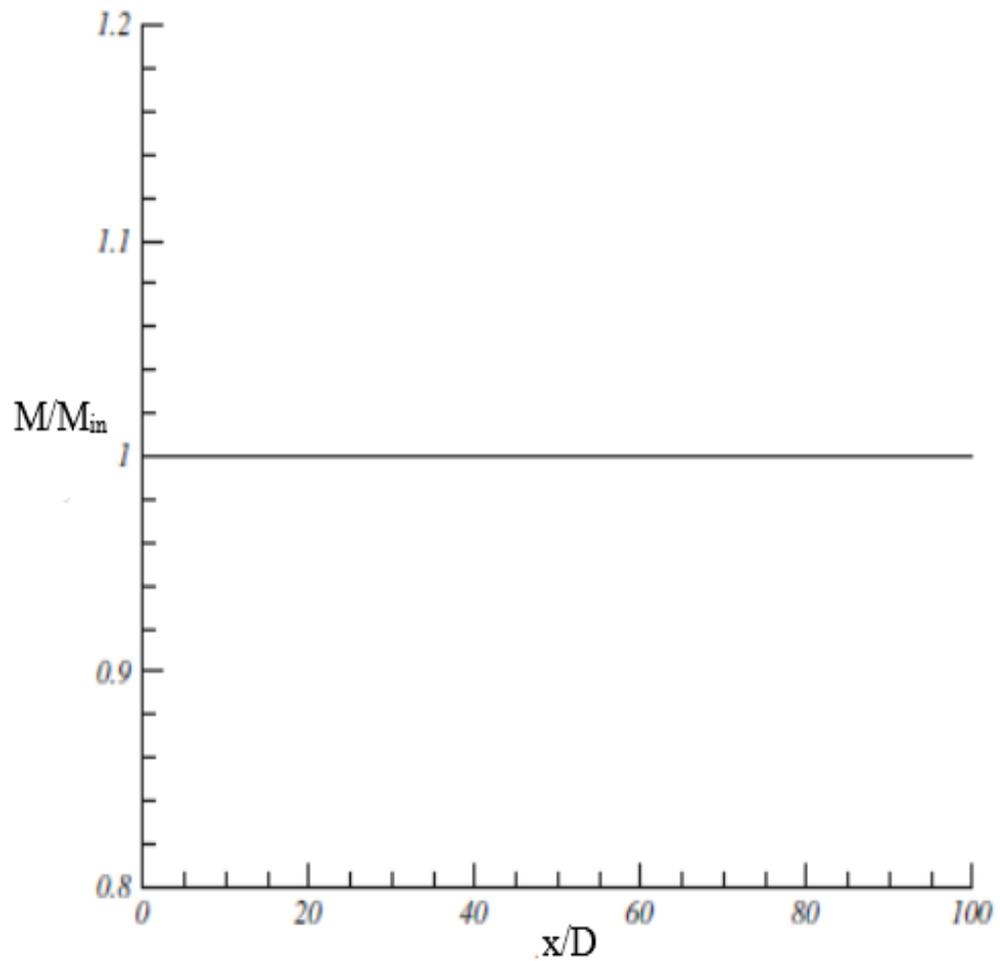


Figure 10-Normalized pulse in the direction of the x -axis

1.5.3 Reynolds number variation

Klein et al. analyzed planar jet flow using direct numerical simulations over a wide range of Reynolds numbers. The results showed that when $Re < 6000$, Re has a significant effect on flow development, but that the flow approaches a contraction state at higher Reynolds numbers. Mee et al. and Malstrom et al. also support this idea of off-axis symmetric jets[26].

Regarding the effect of Reynolds numbers, the researchers note that the flow itself is not independent of Reynolds number, but approaches a contraction condition at $Re = 12800$, at least to the extent considered in this research paper. We obtained the same degree of change with respect to Reynolds number when using two

different inlet flow parameters at $Re > 12800$. But when Reynolds number is 800, the $model-\varepsilon$ does not agree with the findings of Miller et al. Figure 11 shows the convergence of the flow at the point of attenuation along the center line at $Re > 12800$.

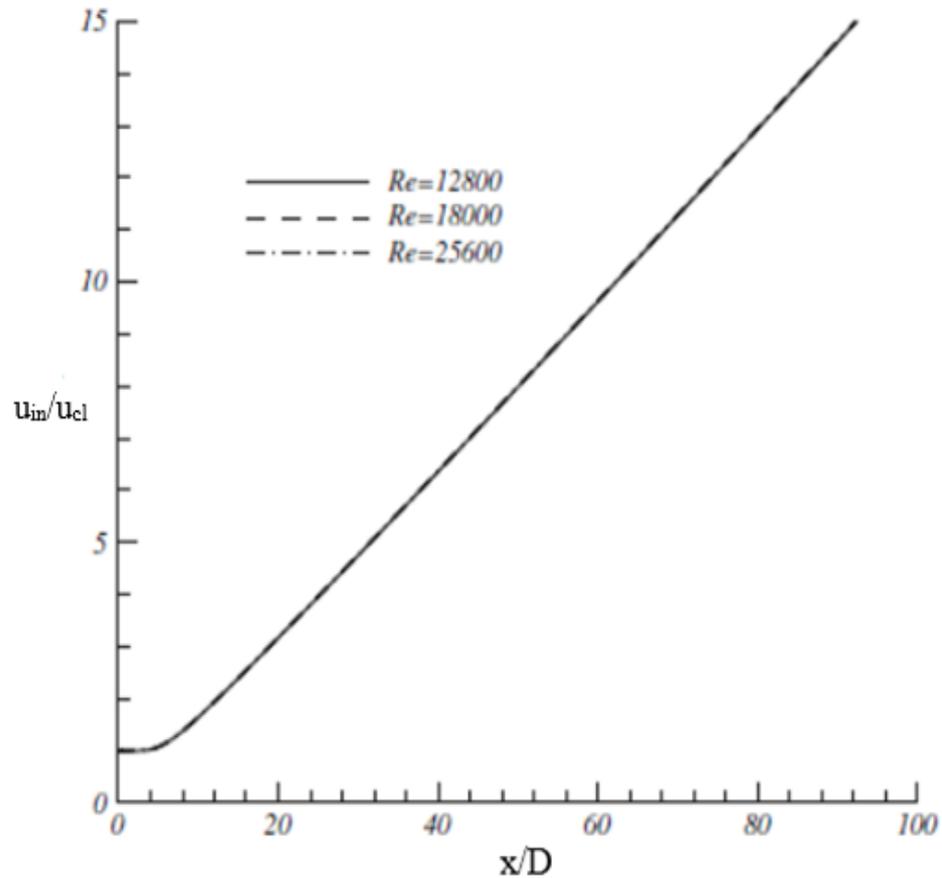


Figure 11-Speeddrop at different Reynolds numbers

1.5.4 Effect of inlet turbulence intensity

In the inlet area, two different states of turbulence intensity at the inlet were considered: $I=0.05$ or $I=0.01$. It was noted that the $k-\varepsilon$ model at $I=0.01$ does not agree with the experimental data. This turbulence intensity predetermines the drop of flow velocity along the central line, evolution of jet half-width and entrainment by the flow, which were less than the measured values in the experimental results. At the same time, the same pattern is observed at a distance greater than expected. And on the other hand, in the $k-\varepsilon$ model at $I=0.05$, results were obtained that,

fortunately, coincided with the experimental results. But both models mentioned above proved to be incapable of predetermining the true characteristics of a plane jet at low Reynolds numbers. Also, the character of u and v propagation under two different conditions at the inlet remained the same in the far zone.

As shown in Figure 7, one can see the difference between the results obtained from this scientific work with the basic conditions in the inlet flow section ($I= 0.01$) and the previously conducted experimental studies. The results differ from each other mainly because of the different shape of the nozzle used in the experiments.

In the experimental study, a free jet can flow out of a pipe, out of a nozzle gradually reducing the shape of the jet in the upstream direction from the outlet section plane of the nozzle or from an orifice with sharp edges. Of course, these three different outlet flow conditions lead to different development scenarios downstream from the nozzle or orifice outlet plane. Depending on the requirements of the operating conditions where jets are used, one of the three possible outlet flow conditions described above can be used [27].

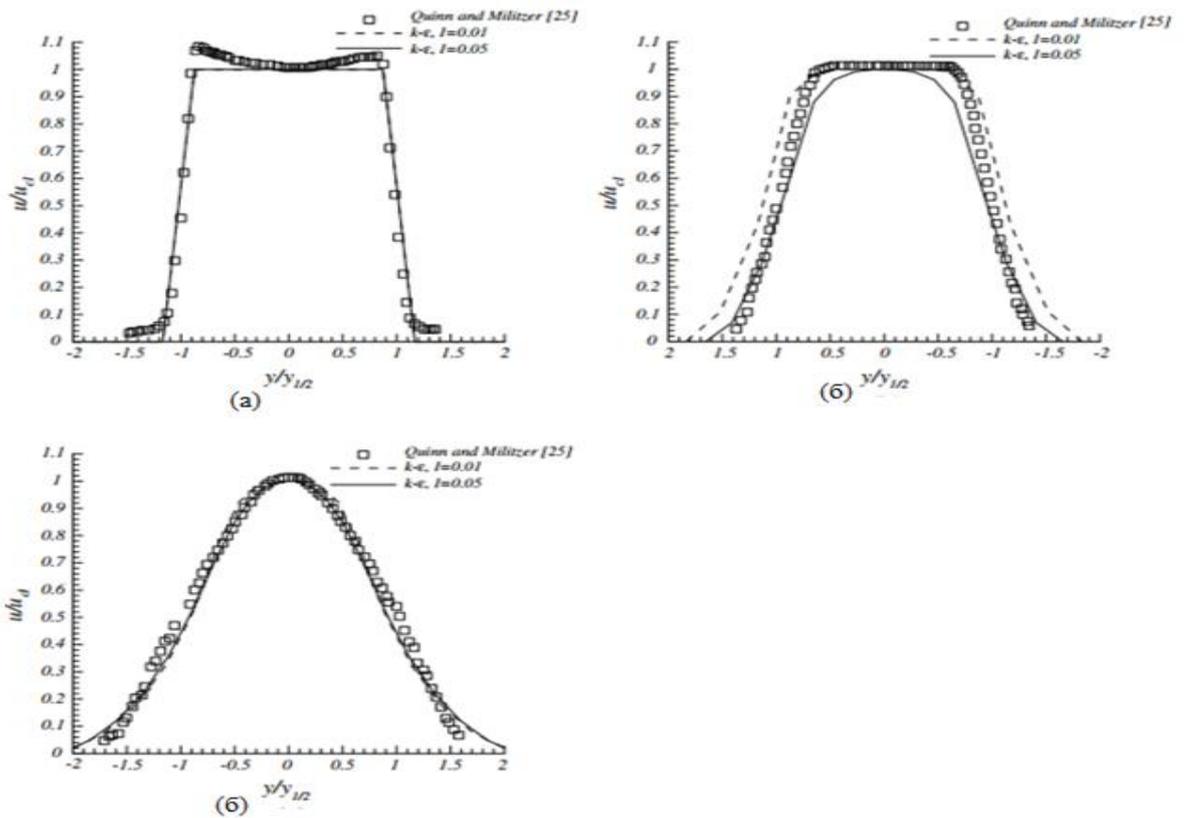
In accordance with earlier experimental studies, the free jet flowing from a nozzle with a specially profiled expanding part has a uniform average velocity profile in the flow direction up to the plane of the outlet section, but the hole with sharp edges is characterized by a non-uniform average velocity profile in the flow direction up to the plane of the outlet section. The effect of local flow contraction, which causes the jet to accelerate as it approaches the plane of the outlet section, is clearly seen in the jet flowing from the sharp-edged orifice, but this effect is absent in the jet from the specially profiled expanding part nozzle. Also, the average velocity profile in the direction of the flow from the sharp-edged orifice has an obvious saddle shape, while the velocity profile of the flow from the specially profiled expanding portion of the nozzle has an absolutely flat shape in the near field of view. The velocity drop along the centerline of the flow from a nozzle with sharp edges is much higher than that of the flow from a nozzle with a specially profiled expanding part. In studies of many non-planar and non-circular jets, sharp-

edged throttle plates have been used due to the simplicity of their calculation and fabrication[28].

In this research paper, uniform velocity conditions and the turbulence intensity profile in the flow entry region were considered. As can be seen, the uniform velocity profile in the flow inlet region, simulates the flow coming from a nozzle with a specially profiled expanding part, rather than from a nozzle with sharp edges. Thus, the difference between the results presented (based on the baseline inlet turbulence intensity, $I= 0.01$) and the earlier experiments, arises because of the sharp-edged nozzle. In a nozzle with a specially profiled expanding part, u_{\max} is directly in the inlet region, while in a nozzle with sharp edges, due to the effect of local flow contraction, u_{\max} is at a considerable distance from the inlet region.

One of the reasons for the difference between the earlier experiments and the results presented in Figure 7 is the local flow contraction effect, which causes a different location of u_{\max} . The local flow constriction effect is clearly traceable in the experiments conducted, whereas in this scientific study this effect is not observed because a free jet flowing out of a nozzle with a specially profiled expanding part is simulated. Deo et al. proved that the jet flowing out of a nozzle with a specially profiled expanding part has a lower degree of flow rate drop compared to the jet flowing out of a nozzle with sharp edges due to different flow conditions at the inlet.

Some studies have analyzed the effect of inlet turbulence intensity. According to the results of the present and previous studies, as the inlet turbulence intensity increases, the shorter the static flow core, the longer the central line becomes and the flow scattering becomes. As the inlet turbulence intensity increases, the results are consistent with the experimental data, because the averaged turbulence intensity at the inlet of nozzles with sharp edges exceeds that measured at the center of the inlet zone[29,30].



Quinn and Militzer (25)

Figure 12-Speed profiles in flow direction in the central x -plane for a jet with a square cross-section. a) $x/D=0.280$, b) $x/D=1.121$, c) $x/D=2.658$

In the experiments conducted by Quinn and Militzer, the turbulence intensity in the center of the outlet plane was kept at 0.5%. But results from earlier studies show that turbulence intensities in the boundary layer region can reach values greater than 0.5%. by a factor of 20, if not 30. The main idea in using higher turbulence intensities in the inlet zone is that the turbulence intensity at the inlet to the sharp-edged nozzle is saddle-shaped, so that the average inlet turbulence intensity exceeds the values characteristic of the central inlet zone. Figure 12 shows the normalized velocity in the near zone of the nozzle. The main difference between the results obtained after this scientific study and the experimental data is that the velocity profile obtained in this study is hat-shaped, while after the experiment, the velocity profile obtained is in the shape of a depressed saddle. The effect of inlet turbulence intensity is not evident in areas close to the nozzle. At

some distance from the nozzle, the high degree of inlet turbulence results in a more compressed velocity profile. Similar results were obtained by Deo et al [31].

In this study, a uniform velocity profile in the entrance zone was used. Consequently, the local flow constriction effect disappears in the near-field zone and the saddle-shaped velocity profile is absent in this zone. Instead of these two phenomena in the near-field observation zone, a hat-shaped velocity profile and a static core flow region characterized by constant velocity $u_{cl} / u_{in} = 1$ can easily be detected. Although it is not possible to accurately predict the length of the static core from high degrees of turbulence, recent studies of the static core are consistent with experimental data.

In order to compare with the results obtained from the $k-\varepsilon$ model, the results of this scientific study were compared with the results obtained by Berg's group. In Figure 13, based on the data obtained by Berg's group, curve SM-1 is the result of calculation of the $k-\varepsilon$ model with a uniform velocity profile in the entrance zone and curve SM-2 is the result of calculation of the $k-\varepsilon$ model with a velocity profile in the entrance zone, which agrees with the experimental data obtained by Quinn. In both schemes, a value of $I = 0.005$ is taken as the degree of turbulence. The results of the work done by Berg et al. (SM-2) agree well when comparing the values of $I = 0.01$ and $I = 0.005$, because the experiments done by Quinn used a sharp-edged nozzle. Because of the use of a sharp-edged nozzle, the velocity profile in the entrance area was not uniform, hence, as expected, the results of Berg et al. (SM-2) agree more with the experimental data obtained by Quinn compared to uniform flow with values $I = 0.01$ and $I = 0.005$.

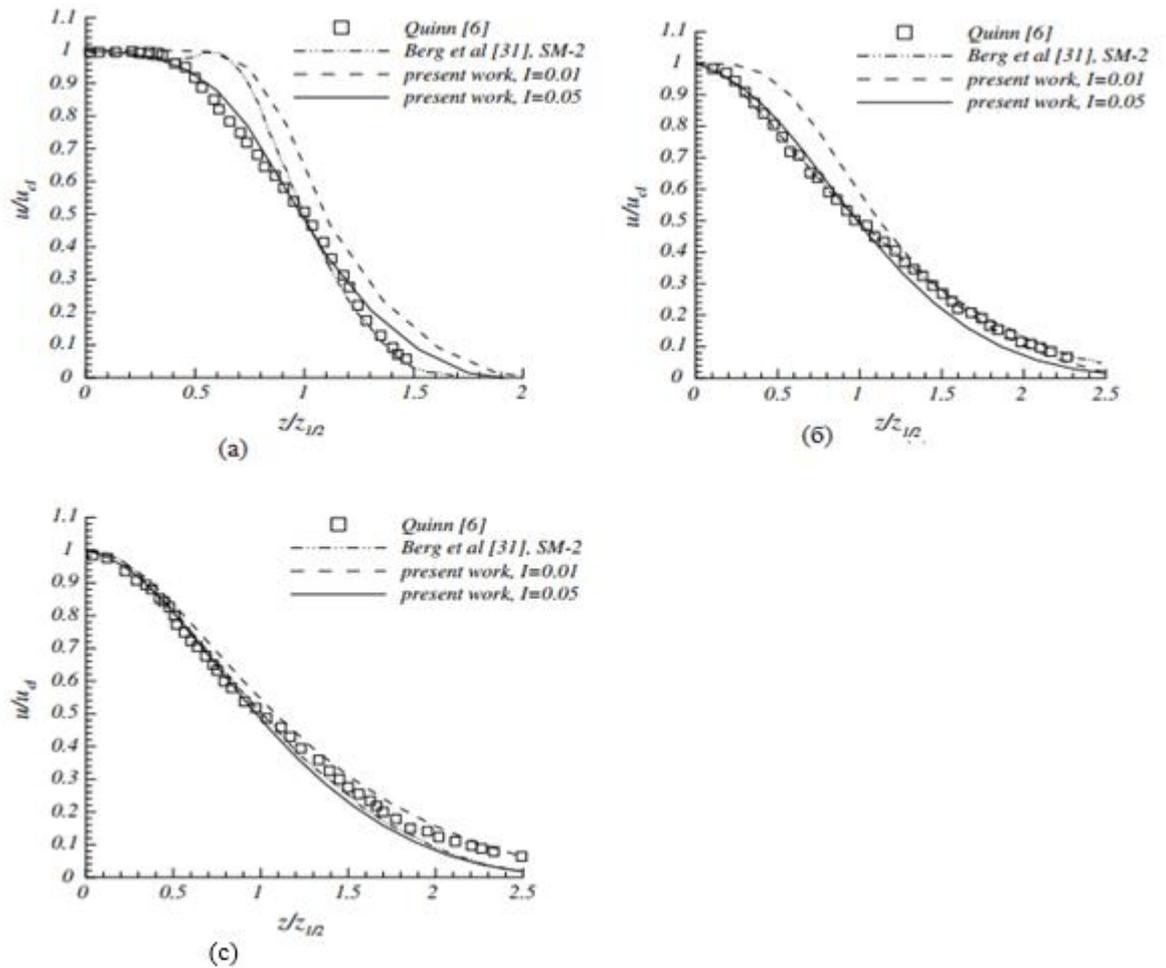
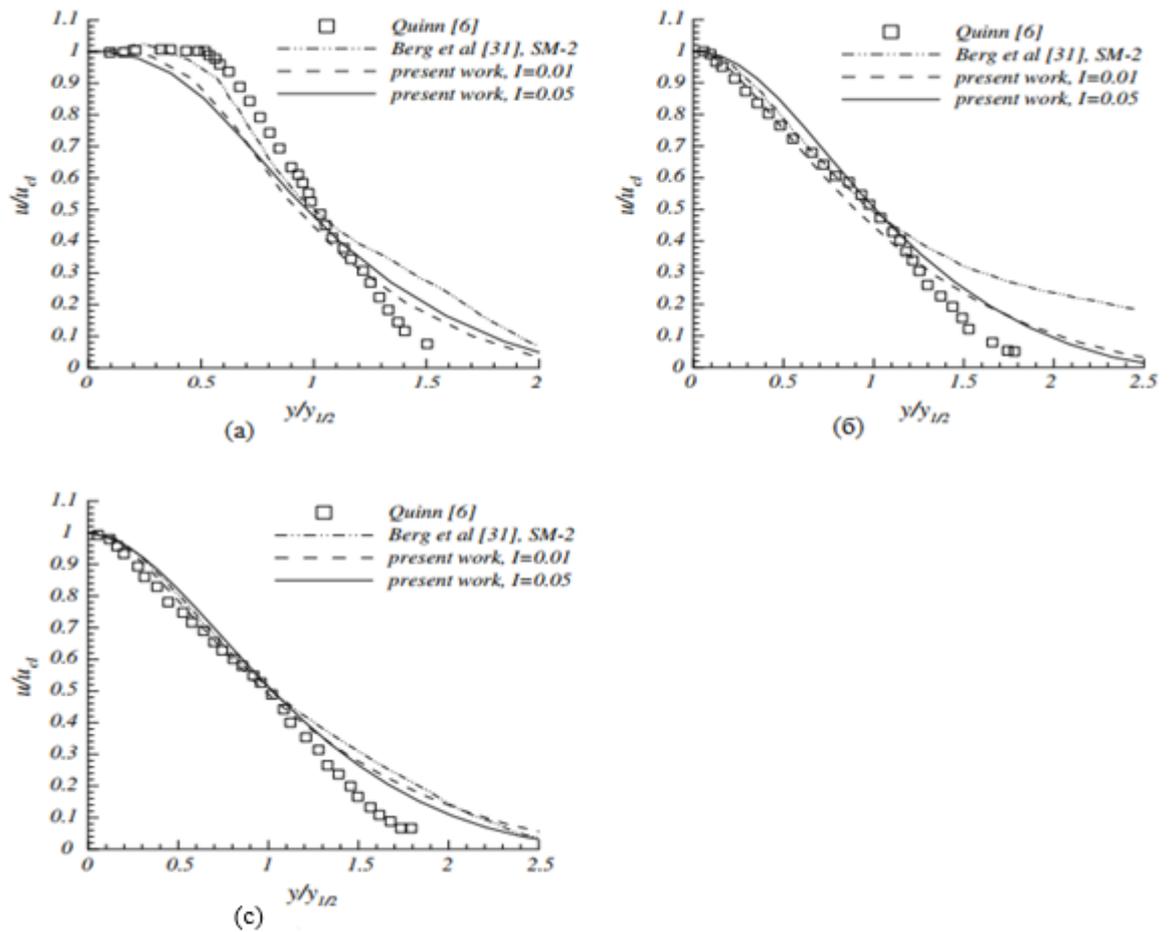


Figure 13-Speedprofiles in the direction along the flow in the central plane $x-z$. a) $x/D= 2$, b) $x/D= 5$, c) $x/D= 10$

Figures 13 and 14 show the normalized velocity profile in two planes. The experimental results show that the velocity profile along the entire length of the rectangle is not saddle-shaped, but the results of the Berg group (SM-2) predetermine the appearance of a saddle-shaped profile in the vicinity of the nozzle (Figure 13a). As can be seen in Figure 13b, c, and Figure 14c, there is no difference between the results obtained in this study and those obtained by Berg et al. (SM-2). As the degree of turbulence increases, a saddle profile in the vicinity of the nozzle cannot be predicted, as shown in Figure 14a. Also, the results of this study at $I= 0.05$ show satisfactory agreement with the experimental data shown in Figure 14b, in contrast to the results obtained by Berg's group (SM-2).



a) $x/D= 2$, b) $x/D= 5$, c) $x/D= 10$

Figure 14-Speedprofiles in the downstream direction in the central planex-y

Figure 15 shows the flow development in half-width, $y_{1/2}$. $I= 0.05$, the degree of turbulence in the inlet flow is more in line with the measured values. The dissipation of the jet is one of its important characteristics, depending on the inlet conditions. As can be seen from Figure 15, the conclusions drawn in the presented work at $I= 0.05$ show a satisfactory agreement with the experimental data obtained by Quinn. When comparing the results of the work done by Berg's group (SM-2) with the conclusions made in the presented work at $I= 0.05$, increasing the degree of turbulence intensity in the inlet area or using a saddle-shaped turbulence intensity profile is as important a technical solution as using a profile consistent

with the experimental data. But pursuing the goal of matching the profile with each experiment to predict flow characteristics is inefficient. In other words, a new profile would have to be calculated in each case. Using higher degrees of turbulence is a common way to predict any type of flow.

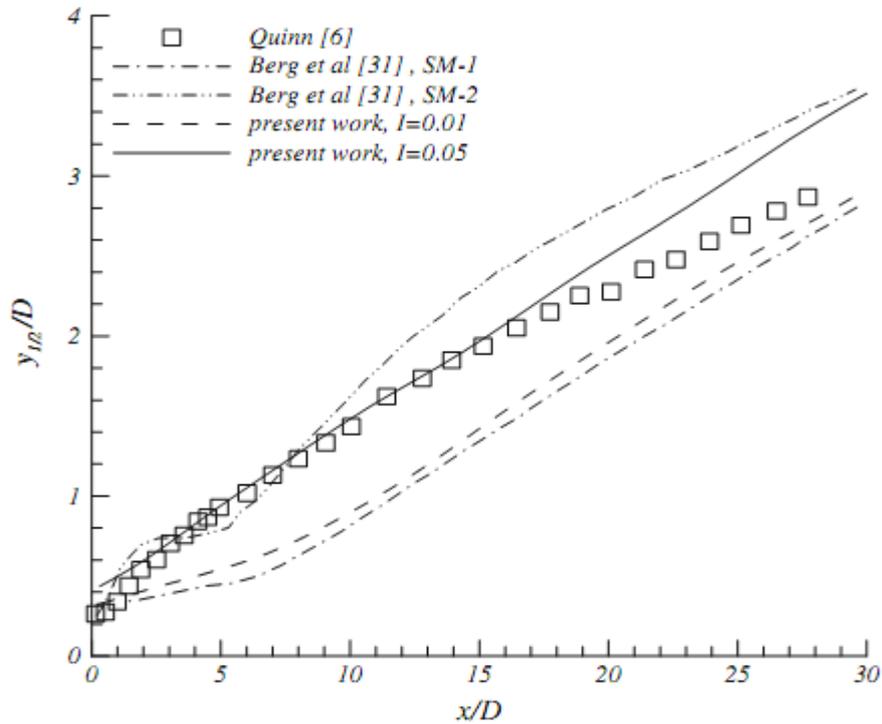


Figure 15-Map of jet propagation, aspect ratio AR= 2

1.5.5 Thermal characteristics

The boundary conditions for temperature as well as velocity are defined in Part 3. The temperature of the wall and the free flow boundary zone is equal to the ambient air temperature. In the symmetry plane, a zero normal gradient is assumed for the calculations, and a zero gradient is assumed in the outlet section along the axial direction. In the inlet zone, a uniformly distributed temperature profile is considered. The difference between the inlet temperature and the ambient air temperature is 40°C, which allows to ignore the hydrostatic effect.

The automodel equation for calculating temperature and velocity fields is closely related to the plane jet [32].

$$\frac{T - T_{\text{inf}}}{T_{cl} - T_{\text{inf}}} = \left(\frac{u}{u_{cl}} \right)^{\text{Pr}_t}, \quad (15)$$

Also, when creating the k - ε model, we are dealing with similar dimensionless temperature and velocity profiles in the fully developed zone under the influence of the Prandtl turbulent number. For example, the normalized velocity and temperature at an $x/D = 80$ ratio is shown in Figure 15. Using the analytical solution, the same results are obtained for the plane jet. In Figure 15, the value of $y_{t_{1/2}}$ is the half-width of the thermal local jet.

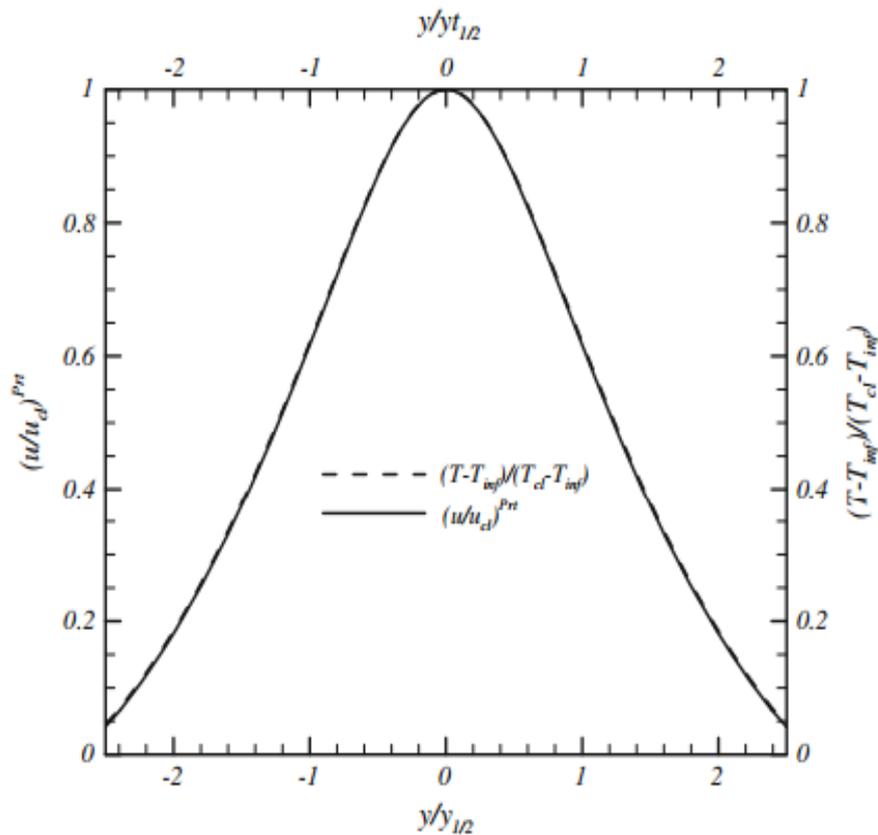


Figure 16-Normalized values of temperature and velocity at the $x/D=80$ ratio, taking into account the effect of Prandtl number

It was found that at a distance from the exit section of the nozzle, the temperature and velocity fields behave the same. It was found that the diffusion of mass and heat is much faster than the momentum propagates. In other words, the temperature profile was found to be wider than the velocity profile, so the temperature field propagates to a greater extent than the velocity field. Also, the length of the static core of the temperature zone is shorter than the length of the static core of the velocity zone. In the case of an insignificant temperature difference, it is assumed that the temperature field will behave in the same way as any passive field of scalar quantities[33].

It is found that the temperature drop along the central line will be the same as the velocity drop; closer to the jet outflow point there is a static core zone, where $T_{cl}/T_{in}= 1$, here the temperature drop along the central line begins. Figure 16 and 17 provide detailed information describing a comparison of the characteristics of the temperature and velocity fields.

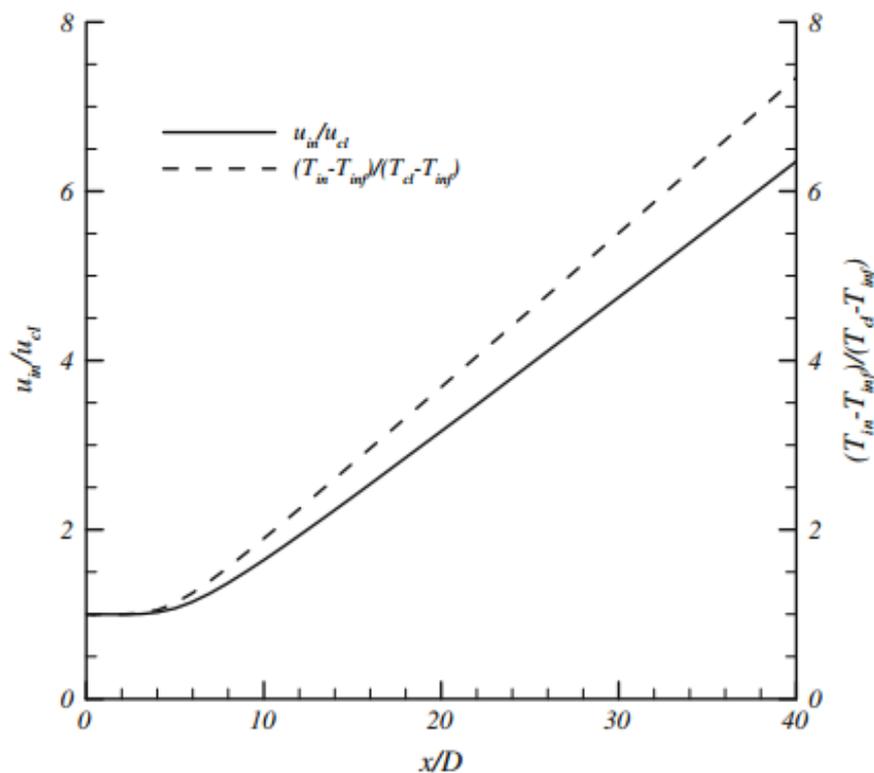


Figure 17-Temperature and velocity drop along the center line, aspect ratio AR= 1

As a result of many experimental studies, it was found that even for simple flows there are no universal Pr_t values. As noted in the paper, the application of a variable Prandtl turbulent number does not change the consequences of mixing jets. Park et al. used a $Pr_t = 0.9$ number to simulate miscible planar jets. Hubley et al. used $Pr_t = 0.95$ to simulate a free axisymmetric jet. Pop compared the velocity and temperature profiles in the automodel zone of a planar down jet with the turbulent Prandtl number set to $Pr_t = 0.7$ and concluded that the measurement results were consistent with the experimental data. In all previous studies of jet properties, the turbulent Prandtl number was taken as a number less than unity. Therefore, in the present study, the Prandtl turbulence number was taken as $Pr_t = 0.72$. Figure 15 shows the effect of the Prandtl turbulent number. When the value of the Prandtl turbulent number is changed, the curve shown in Figure 15 does not change. Also, the velocity and temperature profiles fall on the single curve in the area of the automodel distribution. As the values of the Prandtl turbulence number increase, the static core length in the temperature zone increases, scattering decreases, and the degree of temperature drop along the central line decreases [34-37].

1.5.6 Comparing different aspect ratios

In this section, we present a comparison of flow characteristics in jets of rectangular cross section with aspect ratio $AR = 1-4$. Figure 18 shows the drop in normalized velocity along the centerline of the jet at different aspect ratios. According to Figure 18, the degree of drop in normalized velocity at aspect ratio $AR = 1$ is higher compared to other proportions. Mie et al. provides evidence that the increase in the degree of velocity drop along the centerline is closely related to the increasing mixing effect of turbulent jets.

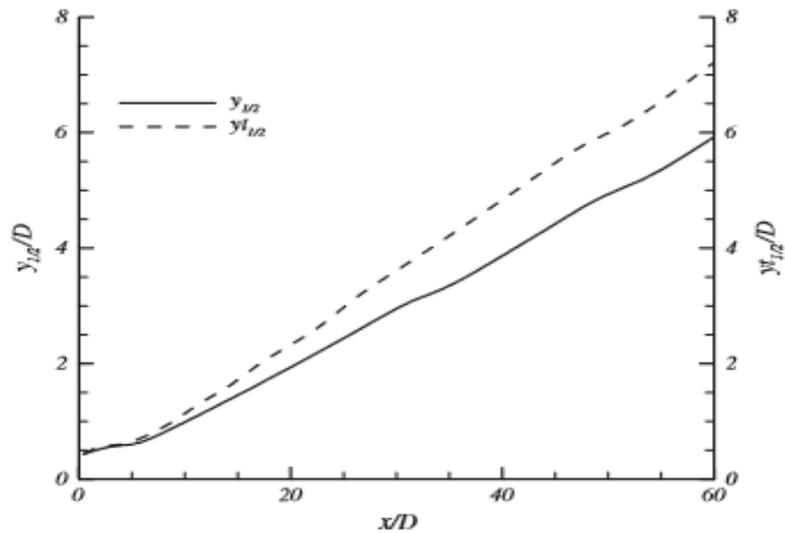


Figure 18-Distribution of the temperature and velocity field in the direction of the *y-axis*, aspect ratio $AR = 1$

Also, a comparison was made of the degree of flow entrainment along the direction of the coordinate axis. The flow entrainment shows the mixing efficiency in the jet. Figure 14 depicts the flow entrainment rates based on the normalized net mass inflow ratio $(Q - Q_{in})/Q_{in}$ at different AR aspect ratios, where Q_{in} is the flow rate of matter from a rectangular cross section jet, and Q is the total flow rate of matter at the point where the value x in the direction along the flow. Figure 19 shows a jet with an aspect ratio equal to one, characterized by a greater degree of entrainment of the flow from the environment into the jet. At the same time, an increase in the aspect ratio leads to a decrease in the entrainment rate. Consequently, it can be argued that the degree of entrainment by the flow at aspect ratio $AR = 1$ is greater compared to other ratios, and that the aspect ratio $AR = 1$ is more effective compared to other ratios.

Figure 20 shows the propagation of the jet in the direction of coordinate axes y and z with different aspect ratios AR . As can be seen from this figure, the patterns of jet propagation in the far field at different aspect ratios are almost the same. (Fig. 21).

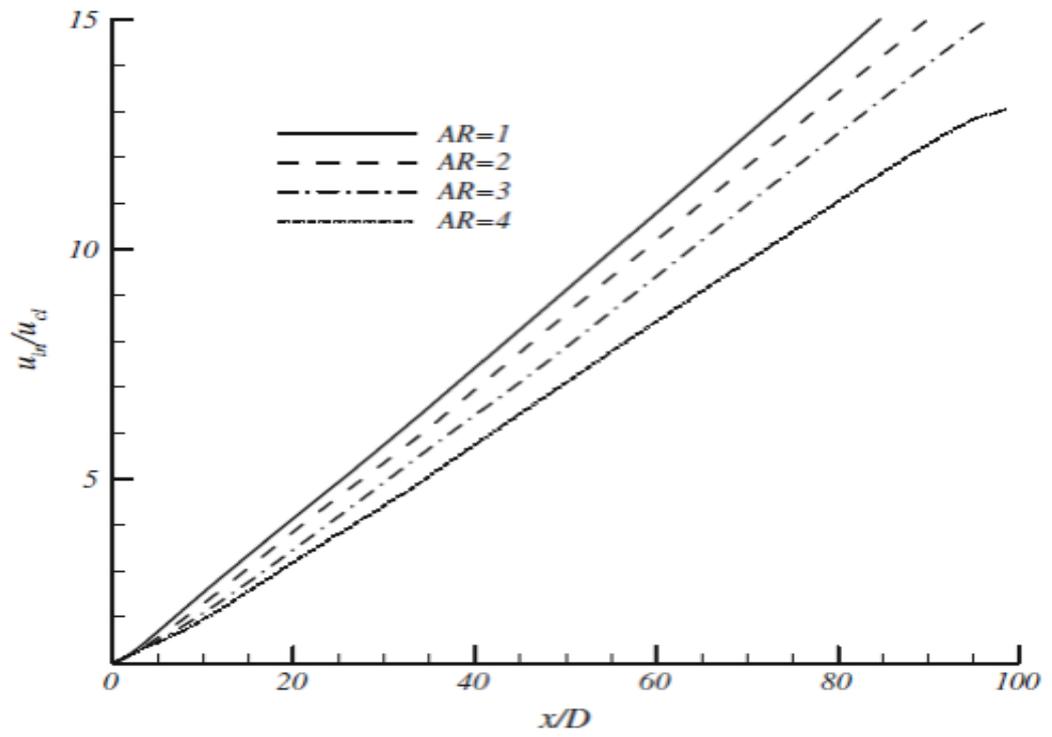


Figure 19-Drop of normalized velocity along the center line

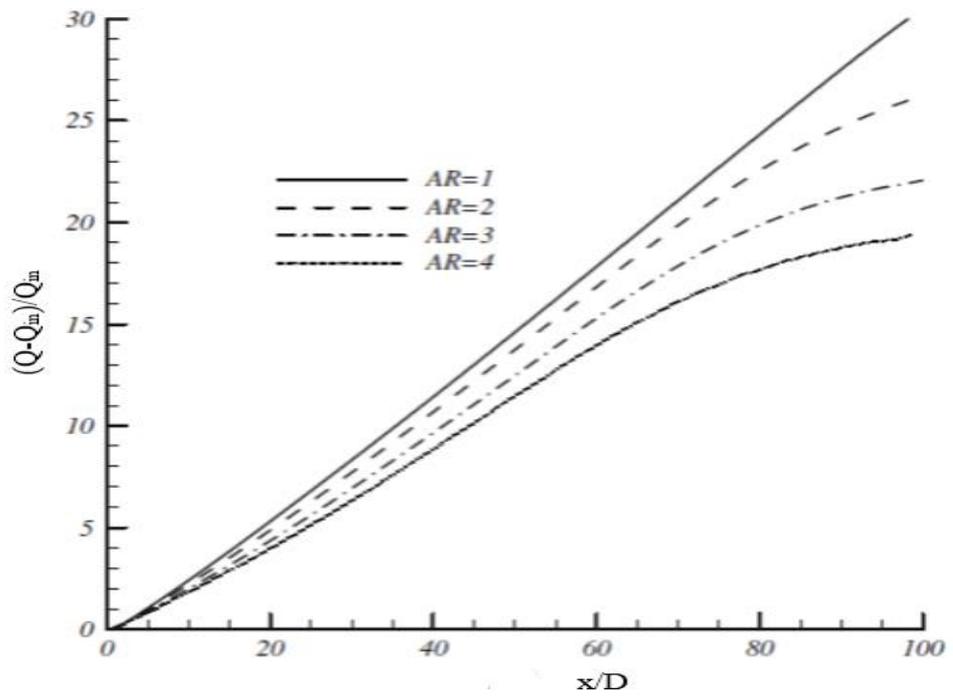


Figure20-Driven flow

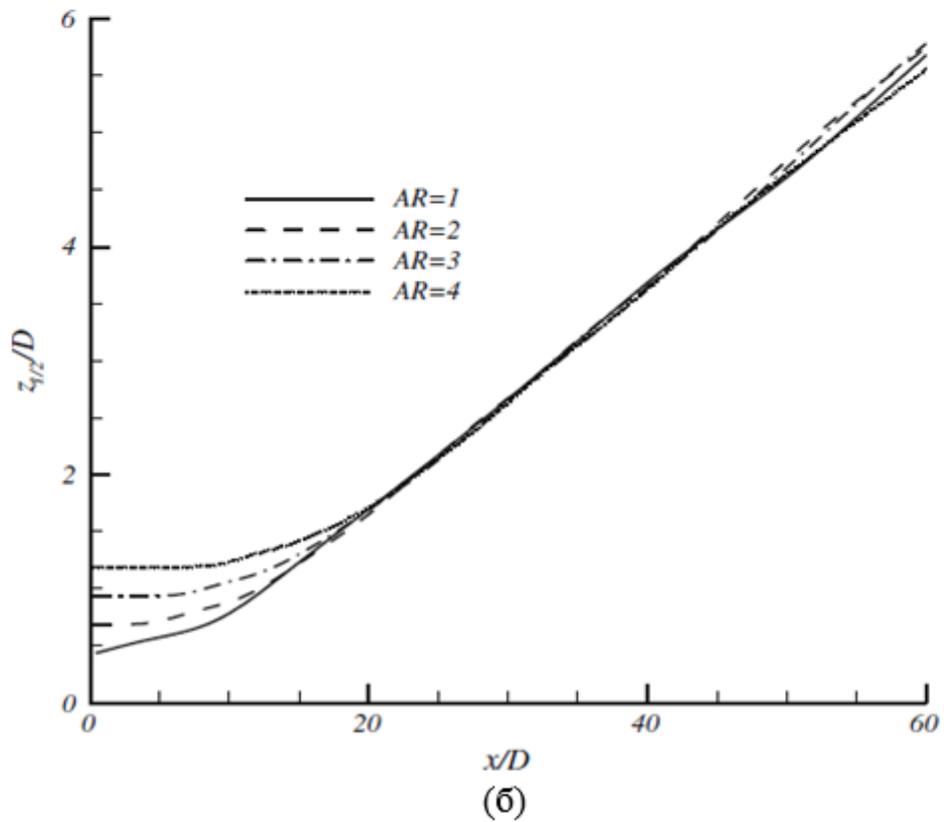
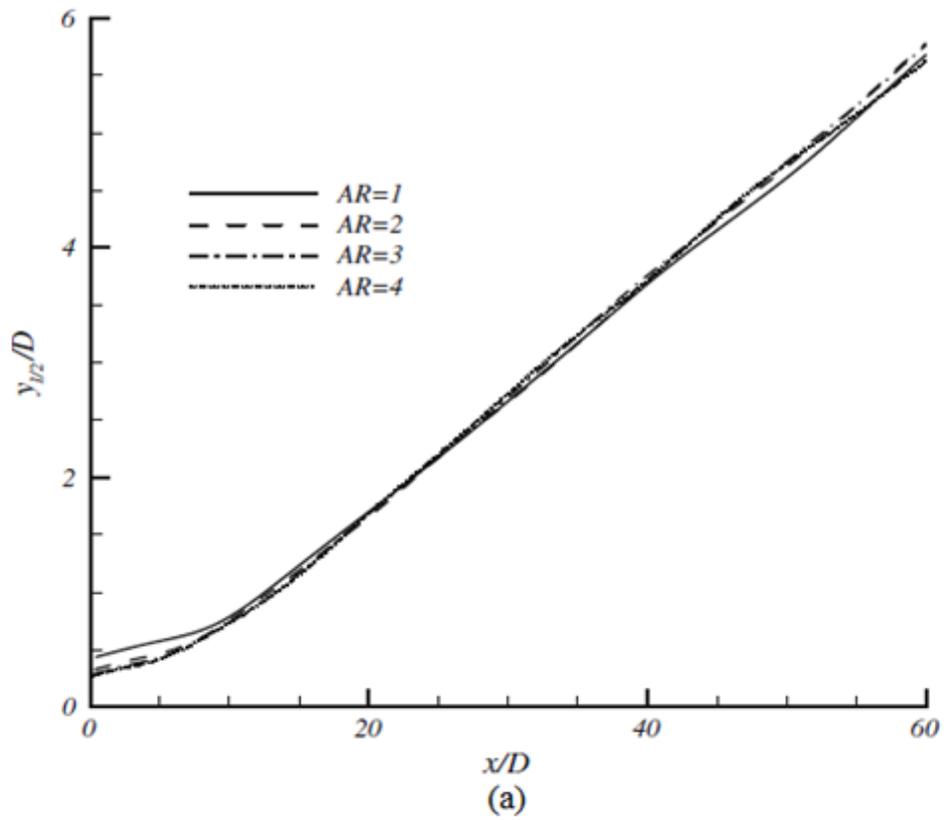


Figure 21-Propagation pattern, a in the direction of the coordinate axis and b in the direction of the coordinate axis z

1.6 Conclusion on the overview of the main work

This paper describes a numerical study of the fluid medium and thermal properties of a turbulent jet of rectangular cross section with the aspect ratio $AR=1-4$. The fields of velocities and temperatures are presented. Also, the effect of Reynolds number on the degree of mixing of rectangular cross-section jets is analyzed. The effect on the evolution of jet development is determined at $Re < 12800$ numbers. In addition, at high Reynolds numbers, the jet tends to shrink.

When studying the entrance zone, two different degrees of turbulence were considered: $I=0.05$ and $I=0.01$. Simulations showed that the results of velocity field measurements coincide with the experimental data, the value $I=0.05$ is taken as the degree of turbulence of the incoming flow. Based on the results of both degrees of turbulence of the incoming flow, it turned out impossible to predict parameters of a rectangular-section jet at small Reynolds numbers.

Additionally, the self-similarity equations for calculating the temperature and velocity fields are closely related. When comparing the degree of entrainment by the flow, an aspect ratio equal to one results in a greater degree of entrainment by the flow from the environment into the jet compared to other ratios, hence, the aspect ratio $AR=1$ is more effective in mixing. In the far field of observation, all of the jets subjected to the study converged into a circular cross-section jet. The difference in the character of jet propagation in the far field of observation could not be determined; for all AR aspect ratios, all jets have approximately the same propagation character.