На правах рукописи

**Нгуен Тхэ Дат**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ

Специальность: 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» на кафедре «Реактивные двигатели и энергетические установки».

| | |
|---|---|
| **Научный руководитель:** | **Мингазов Билал Галавтдинович,**<br>доктор технических наук, профессор кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ». |
| **Официальные оппоненты:** | **Пиралишвили Шота Александрович,**<br>доктор технических наук, профессор кафедры «Общая и техническая физика» ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева». |
| | **Титов Александр Вячеславович,**<br>кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». |
| **Ведущая организация:** | Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева». |

Защита диссертации состоится «13» Октября 2021 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.2.311.01 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10, в зале заседаний ученого совета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.311.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ». Диссертация и автореферат размещены на сайте https://kai.ru/dissertations

Автореферат разослан «____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.311.01 д.т.н. Т.Р. Билалов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.**

Камера сгорания (КС) является важным узлом газотурбинного двигателя (ГТД), определяющим его основные, в том числе и экологические, характеристики. Традиционные методы проектирования и доводки КС уже являются недостаточными, поэтому в последние годы стали широко применяться различные методы автоматизированного проектирования. Автоматизация проектирования и доводки двигателя невозможна без формализованного описания, т.е. моделирования различных процессов, протекающих в отдельных его узлах, что, в свою очередь, требует пристального изучения всех явлений, обусловливающих эти процессы. Для понимания физических основ процессов горения и успешного применения их на практике необходимо рассмотрение основ химической кинетики, распространения пламени в потоке, закономерностей протекания основных характеристик КС и возможности их моделирования. Развитие общей теории может привести в перспективе к достаточно адекватным моделям, которые позволят конструкторам решать стоящие перед ними текущие задачи, однако ясно, что полученные на основе оценок рекомендации при создании КС необходимо оптимизировать с использованием экспериментальных испытаний. Таким образом, разработка новых методик определения основных характеристик, в том числе, эмиссии вредных веществ, является весьма актуальной задачей, требующей неотложного решения.

**Цель диссертационной работы:**

Исследование и разработка методик расчета полноты, температуры сгорания и эмиссии $NO_x$ на основе многоуровневого моделирования процессов смешения в КС ГТД.

**Задачи исследования:**

Для выполнения поставленной цели необходимо:

1. Разработать и создать экспериментальную установку и модели для исследования процесса смешения в жаровой трубе (ЖТ).
2. Разработать физико-математическую модель, описывающую взаимодействие струй с закрученным потоком и процессов смешения за ними.
3. Создать модель сгорания смеси в КС на основе теории турбулентного горения.
4. Создать методики расчета полноты, температуры сгорания и выделения оксидов азота на основе моделей смешения струй в условиях ЖТ КС.
5. Сравнить результаты разработанных методов расчета с данными 3D моделирования в среде ANSYS FLUENT.

**Научная новизна состоит в следующем:**

1. Получены новые экспериментальные данные по влиянию конструкции ЖТ на процесс смешения в КС.
2. Разработаны аналитические зависимости для расчета процесса смешения потоков в КС.

3. Разработан новый метод расчета полноты сгорания в зоне обратных токов (ЗОТ) закрученной струи на основе теории поверхностного распространения пламени в турбулентном.

4. Создан метод расчета эмиссии $NO_x$ с учетом влияния смешения в зоне горения за закрученной струей.

5. Проведены численные расчеты смешения потоков в нестационарной постановке с использованием стандартных пакетов.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Теоретические и экспериментальные исследования позволяют создать практические методы оценки характеристик КС.

2. Разработанная модель смешения струй в ЖТ, позволяет объяснить влияние конструктивных особенностей ЖТ на основные характеристики горения в закрученном потоке и создать методику расчета полноты и температуры сгорания, и эмиссии $NO_x$.

**Обоснованность и достоверность результатов.** Достоверность полученных результатов определяется применением стандартных апробированных методов измерений, тарировкой и метрологической проверкой используемых приборов, обобщением и сравнением полученных результатов с опубликованными результатами других авторов, численных расчетов с применением стандартных пакетов программ ANSYS FLUENT 19.2 с академической лицензией и подтверждается удовлетворительной их согласованностью.

**Апробация работы.** Диссертационная работа, отдельные ее разделы и результаты докладывались и обсуждались:

1. На XXVIII Международном научном семинаре «Проблемы моделирования и динамики сложных междисциплинарных систем». Тематическая сессия «Авиация и космонавтика: фундаментальные научные и прикладные аспекты». Казань, КНИТУ – КАИ, 2016 г.

2. На Международной молодежной научной конференции «XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)». Казань, КНИТУ – КАИ, 2017 г.

3. На Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. «Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли». (АКТО - 2018), Казань, КНИТУ – КАИ, 2018 г.

4. На Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Авиационная двигатели и силовые установки». Москва, ЦИАМ, 2019 г.

5. На XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей». Самара, СНИУ, 2019 г.

6. На Седьмой Всероссийской конференции с международным участием «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». Рыбинск, РГАТУ, 2019 г.

7. На Международной молодежной научной конференции «XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)». Казань, КНИТУ – КАИ, 2019 г.

8. На X Всероссийской научно-технической конференции молодых специалистов. Уфа, ОДК – УМПО, 2019 г.

9. На научно-технической конференции «Климовские чтения – 2020»: перспективные направления развития авиадвигателестроения. Санкт-Петербург, ОДК – Климов, 2020 г.

**Личный вклад автора.** Автором на основе анализа процессов течения и смешения в ЖТ разработаны аналитические методы определения полноты, температуры сгорания и выбросов $NO_x$ с учетом влияния смешения. Выполнено численное моделирование смешения в закрученной струе и их верификация с результатами экспериментальных исследований.

**Внедрение результатов исследований.**

Результаты диссертационной работы:

– внедрены в учебный и научно-исследовательский процесс КНИТУ – КАИ.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 4 статьи изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в изданиях Scopus и 10 тезисов и материалов докладов на международных и Всероссийских научно-технических конференциях.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников информации и приложений. Диссертация выполнена на 163 страницах текста, содержит 63 рисунков и 4 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертации, поставлена цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы. Рассматриваются проблемы в области создания и разработки доступных в инженерных расчетах методик определения полноты, температуры сгорания и выбросов вредных веществ в камерах сгорания в процессе их проектирования и доводки.

**Первая глава** посвящена литературному обзору современного состояния вопросов, посвященных исследованием газодинамики, процессов смешения, расчетов полноты и температур сгорания и эмиссии $NO_x$ в КС. Проведен анализа результатов исследований, многочисленными авторов, таких как, Я.Б. Зельдович, Г.Н. Абрамович, А. Лефевр, А. Гупта, К.И. Щелкин, Н.А. Чигир, А.В. Талантов, а также Ш.А. Пиралишвили, Б.Г. Мингазов, В.А. Щукин, Ю.Г. Куценко и др. Показана значимость влияния процесса смешения на выбросы эмиссии $NO_x$, для обеспечения экологических требований КС, т.е. низкий уровень выбросов $NO_x$. Приведены факторы, влияющие на процессы смешения и, следовательно, на полноту, температуру сгорания, и эмиссию $NO_x$ и методы их оценки, и установлены параметры, влияющие на эмиссию $NO_x$.

Установлено, что в большинстве работ показана значительная роль смешения в рабочем процессе, однако в них не учитывается влияние смешения на характеристики камеры сгорания. При этом все расчетные зависимости являются

эмпирическими, и поэтому пригодны только для конкретных КС. Вследствие этого возникает необходимость создания аналитических методов расчета указанных характеристик КС, применимых в практической деятельности. На основе проведенного анализа работ в области исследования характеристик горения таких как полнота, температура сгорания и эмиссия $NO_x$ в работе поставлены цели и задачи исследований, показана необходимость проведения экспериментальных исследований смешения в жаровой трубе камер сгорания.

**Вторая глава** посвящена исследованию процесса смешения в закрученной струе, истекающим в атмосферу за фронтовым устройством (ФУ) КС. Для выявления параметров смешения, использовались результаты экспериментального исследования по определению местных температур в среде закрученного потока при различных условиях истечения и геометрии завихрителя. В качестве экспериментальной установки применялась модель ФУ, установленного за трубой подвода воздушного потока с мерными устройствами.

В исследованиях применялся метод термометрирования распределения местных температур в предварительно нагретой закрученной струе воздуха, истекающего в атмосферу. Измерения местных значений концентраций $CO_2$ и температур позволили оценить степень смешения струи с окружающим воздухом.

На практике для сравнения и определения закономерностей смешения используются известные безразмерные комплексы, представляющие собой отношение расхода эжектированного воздуха $G_Э$ к расходу активной закрученной струи $G_З$. К ним можно отнести параметр, предложенный Г.Н. Абрамовичем, и представляющий собой отношение избыточной средней к максимальной избыточной температуре в измеряемом сечении по формуле:

$$m = \frac{T_{CP} - T_0}{T_{MAK} - T_0}, \tag{1}$$

где $T_{MAK}$, $T_{CP}$, $T_0$ - соответственно значения максимальная и средняя и температура воздуха в профиле температурных полей.

Для получения аналитической зависимости, использовалось уравнение турбулентной диффузии при истечении газа из кольцевого источника в трубе, определяющим параметрами которого являются местное соотношение газ - воздух $f(x,r)$:

$$f(x,r) = \frac{G_Г}{G_Э}\frac{R_{TP}^2}{R_K^2} K_X \cdot \left[ I_0\left(2K_X \frac{r}{R_K}\right)\right] \cdot \exp\left[-K_X\left(1+\frac{r^2}{R_K^2}\right)\right], \tag{2}$$

где $R_{TP}$ - радиус трубы, в котором находится кольцевой источник; $R_K$ - радиус кольцевого источника; $G_Г$ - расход газа через кольцевой источник; $G_Э$ - расход эжектируемого воздуха; $I_0$ - функция Бесселя нулевого порядка; $K_X$ - безразмерный параметр, определен по формуле:

$$K_X = \frac{R_K^2 \cdot W}{4D_T \cdot x}. \tag{3}$$

Коэффициент турбулентной диффузии определяется по следующей зависимости:

$$D_T = 0,003 \cdot \left(1 + \kappa_1^2 \cdot \mathrm{tg}^2 \varphi_K\right)^{0,5} W \cdot R_{TP}, \qquad (4)$$

где $\kappa_1$ - коэффициент, учитывающий особенности конструкции завихрителя; $\varphi_K$ - угол закрутки потока, который по мере удаления от устья меняется; $W$ - скорость потока.

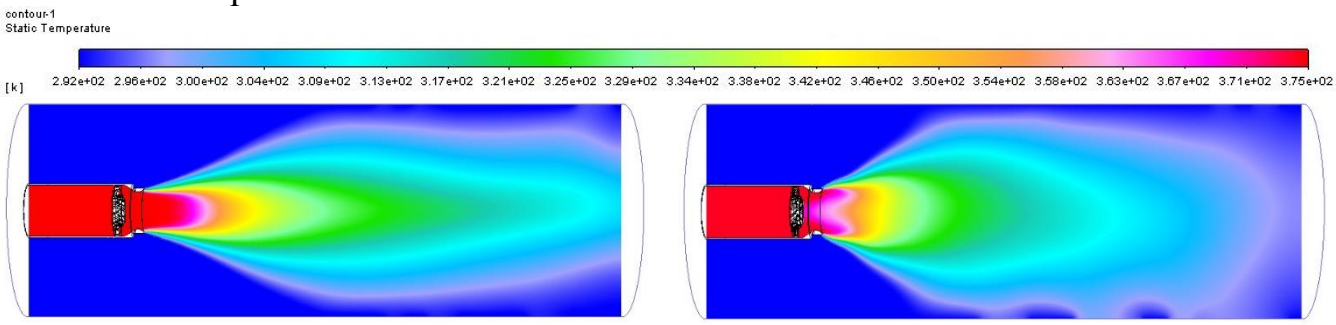
Предложенный подход позволяет получить зависимость для расчета коэффициента смешения $m$ за закрученной струей по оси закрученного потока ($r$ = 0), тогда уравнение (2) упрощается и приводится к виду:

$$m = A_1 \frac{T_З}{T_Э} \frac{R_В}{R_Г} \frac{W_Э}{W_З} \frac{\exp K_X}{K_X}, \qquad (5)$$

где $A_1$ - экспериментальный коэффициент, справедливый для завихрителей применяемых в исследовании, $A_1 = 2,0$; $R_В$, $R_Г$ - газовые постоянные для воздуха и газа; $T_Э$, $W_Э$ - температура и скорость эжектируемого воздуха; $T_З$, $W_З$ - температура и скорость струи из завихрителя.

Кроме того, нами было проведено численное трехмерное моделирование процесса смешения в закрученном потоке с использование различных моделей турбулентности в стационарной и нестационарной постановке.

При стационарных расчетах наилучшие результаты среди RANS моделей семейства *k-ε* и *k-ω*, RSM продемонстрировали модель вязкости *k-ε* RNG, приведенной на рис. 1. Исследования показали, что расчеты в нестационарной постановке по DES модели позволяют достигнуть наилучших результатов соответствия с экспериментом.

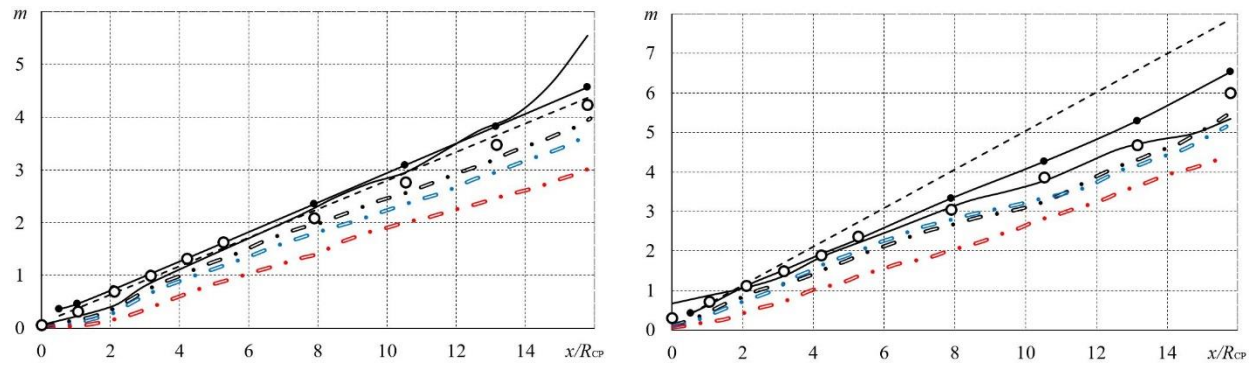



а) б)

Рисунок 1 – Сопоставление температур в продольном сечении для расчетов, выполненных с различными углами крутки, модель турбулентности RANS *k-ε* RNG: а) $\varphi = 30^0$; б) $\varphi = 45^0$

Из рис. 2 приведено сопоставление расчета изменения коэффициентов смешения по длине для двух значений углов крутки $\varphi = 30^0$ и $45^0$, соответствующих степени крутки по А. Лефевру $S_N$ с экспериментальными данными из которых видно хорошее совпадение расчетов и экспериментом.

Сопоставление результатов разных подходов.




а) б)

Рисунок 2 – Сопоставление экспериментальных данных завихрителей по коэффициенту смешения $m$ вдоль оси ($r$ = 0): ○ - эксперимент автора; - RANS $k$-$\varepsilon$ RNG; - RSM; - RANS $k$-$\omega$ SST; — - DES; - аналитический расчет; - - эмпирический расчет на основе формула А. Лефевра: а) $S_N$ = 0,44, $\varphi = 30^0$; б) $S_N$ = 0,78, $\varphi = 45^0$

Из анализа протекания зависимостей следует, что аналитические модели с достаточной точностью могут быть применены в расчетах коэффициента смешения. Следовательно, с помощью найденных зависимостей можно определить распределение местных значений составов смеси в закрученном потоке, и проводить с их помощью дальнейшие исследованиях процессов горения в закрученном потоке и в камерах сгорания.

**В третьей главе** показана необходимость проведения исследований течения закрученной струи в условиях жаровой трубы камер сгорания и посвящена описанию экспериментальной установки, объекта исследования, системы и методов измерений. Созданная установка (см. рис. 3) предназначена для исследования процессов смешения и неравномерности потоков воздуха от ФУ с разными степенями крутки потока и влияние отверстий в ЖТ с разным межосевым шагом, размером и количеством отверстий.

Здесь воздух подается в рабочий участок установки из компрессора с электрическим нагревателем. Измерение параметров воздуха производится в 3-х сечениях: за вентилятором (суммарный расход) и непосредственно на 2-х входах в рабочий участок. Давление измеряется при помощи пьезоэлектрических датчиков и показания дублируются для проверки на микроманометры, а температура – терморезисторами.

Рабочий участок представляет собой имитацию трубчатой КС со сменной перфорированной ЖТ (см. рис. 4-а)). Во фронте КС установлен сменный лопаточный завихритель (см. рис. 4-б)).

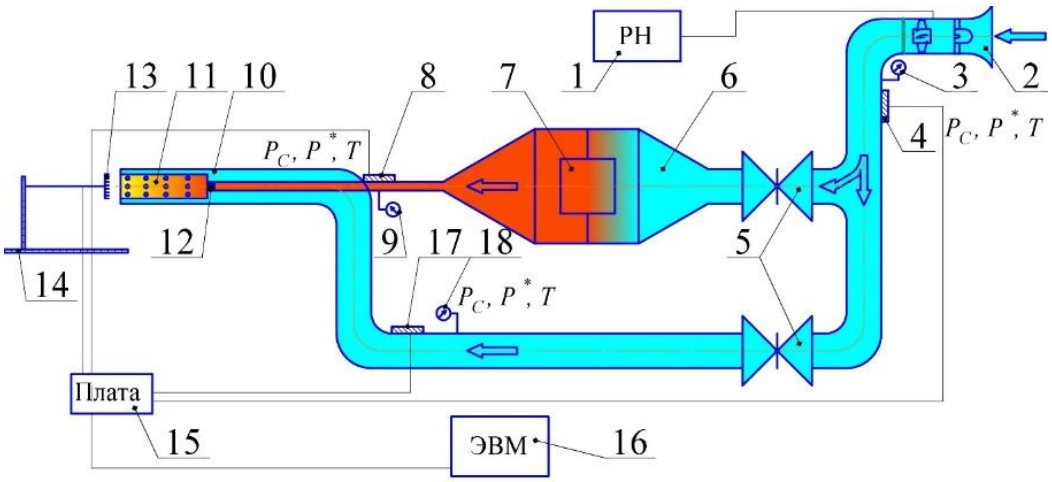
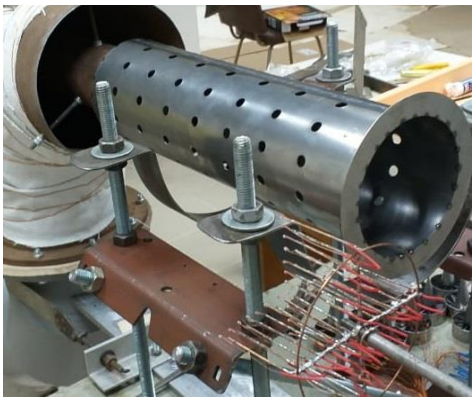
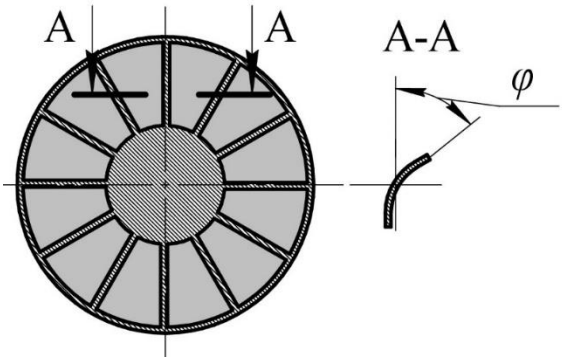



Рисунок 3 – Схема экспериментального стенда, где 1 - регулятор напряжения для контроля оборотов двигателя; 2 - плавный вход, 3;9;18 - манометры для замера давления статического и полного давления, 4; 8; 17 - датчики (температуры и давления), 5 - задвижка (2 шт), 6 - нагреватель воздуха, 7 - смотровое окошко, 10 - КС, 11 - ЖТ, 12 - области установок сменных завихрителей, 13 - термогребенка, 14 - координатник, 15 - плата для перемещения измерений параметров в персональный компьютер, 16 - персональный компьютер



а)




б)

Рисунок 4 – Рабочий участок экспериментального стенда: а) модель смесителя трубчатой камеры сгорания; б) общий вид завихрителя

Экспериментальные исследования включали измерения температурных полей в модельной ЖТ. В качестве экспериментальной ЖТ применялся перфорированная труба с завихрителем во ФУ. Через завихритель подавался нагретый до $T_Г$ = 510 К закрученный поток воздуха, а основной поток воздуха имел комнатную температуру. Объектом исследования являлась перфорированная труба с завихрителем при углах крутки потока $\varphi$ = $0^0$; $15^0$; $30^0$; $45^0$; $60^0$; $75^0$ на входе (см. рис. 4). По длине трубы выполнены системы отверстий, различного диаметра ($d_0$ = 10; 15; 20 мм), расположенных на различном удалении от входа (L = 50; 100; 150; 200; 250; 300; 350 мм).

В результате экспериментальных исследований были получены данные по изменению коэффициента смешения по длине для разных диметров отверстий с различным шагом расположения по диаметру трубы.

При моделировании процессов смешения в закрученном потоке воспользуемся подходом, изложенным в работах Б.Г. Мингазова, в которых процесс смешения условно разделяется на «турбулентное» и «струйное» смешение вторичного воздуха с потоком. Это можно представить в виде уравнения баланса расхода вторичного воздуха и потока газа в ЖТ, в следующем виде:

$$G_{Г,i} = G_{Г,i-1} + \Delta G_{B.T,i} + \Delta G_{B.C,i}\,, \qquad (6)$$

где $G_{Г,i-1}$ - газ, поступивший из предыдущей зоны; $\Delta G_{B.T,i}$ - воздух, поступивший в зону горения в результате «турбулентного» смешения; $\Delta G_{B.C,i}$ - воздух, поступивший в зону горения в результате «струйного» смешения.

Можно представить отношение расходов в виде коэффициентов, характеризующих процесс смешения:

$m_{T,i} = \dfrac{\Delta G_{B.T,i}}{G_{Г,i-1}}$ - коэффициент «турбулентного» смешения. Характеризует смешение вторичного воздуха с газовым потоком в результате турбулентного массообмена;

$m_{\text{C},i} = \dfrac{\Delta G_{B.\text{C},i}}{G_{Г,i-1}}$ - коэффициент «струйного» смешения. Характеризует смешение струй вторичного воздуха с закрученным потоком газа.

Турбулентное смешение. Турбулентный массобмен характерен для взаимодействия закрученного потока с вторичным воздухом, истекающим из мелких отверстий. Учитывая предыдущие результаты исследований закрученной струи в открытом пространстве, применительно к данному типу смешения в ЖТ можно получить следующую зависимость:

$$m = A_1 \frac{T_З}{T_Э} \frac{R_B}{R_Г} \frac{W_Э}{W_З} \frac{1}{\theta^{0,5}} \frac{\exp K_X}{K_X} \frac{\Delta F_i\,(x)}{F_\Sigma}\,, \qquad (7)$$

где $F_\Sigma$ - площадь всех отверстий в ЖТ ; $\Delta F_i\,(x) = F_i\,(x) - F_{ФР}$; $F_i\,(x)$ - площадь одного $i$ пояса отверстий, который находится на расстоянии $x_i$ от ФУ КС; $F_{ФР}$ - площадь ФУ; $\theta$ - степень подогрева газа при горении.

Другой тип смешения более характерен для взаимодействия с поперечными струями, истекающими из основных отверстий. В этом случае происходит дополнительное перемешивание вторичного воздуха с потоком, влияние которого можно определить при рассмотрении взаимодействия отдельной струи с закрученным потоком. Известно, что при взаимодействии струи и потока происходит массообмен, в результате которого эжекция струи в набегающий поток пропорциональна площади экрана, образуемого струями, скорости и плотности набегающего газового потока:

$$G_{B,i} \sim F_Э \cdot \rho_{Г,i} \cdot W_{Г,i}\,, \qquad (8)$$

где $F_Э$ - площадь экрана, образуемого поперечными струями.

При этом, величина смешиваемого набегающего потока пропорциональна количеству зжектируемого воздуха из поперечной струи $G_{Г,i} \sim G_{B,i}$. Это предположение соответствует тому, что между набегающим потоком и поперечной

струей происходит взаимный массобмен, пропорциональный площади контакта между ними.

Площадь экрана, образуемого струями одного пояса отверстий, можно определить по формуле, полученной из рассмотрения геометрии площади экрана:

$$F_Э = \pi\left(d_0 + h_i \cdot tg\frac{\psi}{2}\right)\cdot n_0 \cdot h_i\ , \qquad (9)$$

где $h_i$ - глубина проникновения струи в набегающий поток в данном сечении; $d_0$ - диаметр отверстий; $n_0$ - количество отверстий в одном поясе отверстий; $\psi$ - угол расширения струй при их истечении из отверстий ($\psi$ = ($10^0$ – $15^0$)).

Исследования показали, что глубина проникновения существенно зависит от шага (расстояния) между отверстиями $S$, который определяется для КС по формуле:

$$S = \frac{\pi D}{n_{0i}}, \qquad (10)$$

где $D$ - диаметр трубчатой КС, $n_{0i}$ - количество отверстий в *i*-ом ряде отверстий.

Известно, что с увеличением шага $S$ более $2d_0$ аэродинамический экран, образуемый поперечными струями, переходит из сплошного в разделенный на отдельные струи, что также влияет на их смешение с потоком. Для определения этого влияния был проведен виртуальный эксперимент. В результате численного расчета было получено, что влияние на глубину проникновения струй можно оценивать с помощью коэффициента $a$. Для условий течения в ЖТ:

$$a = \frac{1}{0.1\cdot\tau^2 + 0,65\cdot\tau + 0,35}, \qquad (11)$$

где $\tau = S / d_0$ - относительный шаг отверстий.

Тогда известное выражение для траектории струи запишется в виде:

$$\frac{y(x)}{d_0} = a\cdot\bar{q}^{0,5}\left(\frac{x}{d_0}\right)^n \frac{G_Г}{G_Г + G_{B0}}\sin\gamma, \qquad (12)$$

где $\bar{q} = \dfrac{\rho_{B0}W_{B0}^2}{\rho_Г W_Г^2\cos^2\varphi_{K,i}}$ - соотношение скоростных напоров струи и потока, здесь $\varphi_{K,i}$ - текущее значение угла закрутки набегающего потока; $\gamma$ - угол втекания струи (0 < $\gamma$ < $90^0$); $G_Г$, $G_{B0}$ - расходы газового потока и струи. Для условий течения в ЖТ: $n$ = 0,33 - эмпирический показатель. Из данной формулы следует, что с увеличением шага $S$ между отверстиями дальнобойность струи уменьшается, соответственно уменьшается и коэффициент смешения.

С помощью формулы (12) можно определить значение глубины проникновения в поток: $h_i = y(x)$, для разных отверстий $d_0$ на различном удалении по оси $x$. Располагая данными по изменению глубины проникновения струи и геометрическими размерами смесителя, можно определить коэффициент смешения:

$$m_{C,i} = \frac{G_{B,i}}{G_{\Gamma,i}} = A_2 \frac{h_i \cdot \left( d_0 + h_i \cdot tg \frac{\psi}{2} \right) \cdot n_0}{R_{TP}^2}, \qquad (13)$$

где $A_2$ - коэффициент пропорциональности, определен по эксперименту.

Окончательно, можно получить уравнение для определения относительного количества смешанного с набегающим потоком вторичного воздуха:

$$m_{\Sigma i} = A_1 \frac{T_З}{T_Э} \frac{R_B}{R_\Gamma} \frac{W_Э}{W_З} \frac{1}{\theta^{0,5}} \frac{\exp K_X}{K_X} \frac{\Delta F_i\ (x)}{F_\Sigma} + A_2 \frac{h_i\ (x) \cdot \left( d_0 + h_i \cdot tg \frac{\psi}{2} \right) \cdot n_0}{R_{TP}^2}. \qquad (14)$$

Из анализа данной зависимости следует, что количество смешанного вторичного воздуха зависит от размеров и количества отверстий, глубины проникновения струй и затенения потока. Для подтверждения результатов аналитического моделирования были проведено численное трехмерное моделирование процесса смешения в жаровой трубе КС. Была выбрана модель турбулентности *k-ε* RNG (рис. 5). На входах горячего и холодного потока задавалось расходы *G*, полное давление $P^*$ и температура воздуха $T^*$ по данным эксперимента.

Дополнительно в расчетной области были созданы точечные датчики для замера параметров в осевом и радиальном направлении потока, имеющие координаты $x, y, z$. На рис. 5 представлены результаты измерений полей распределения температуры для понимания процесса смешения и размеров зоны обратных токов в КС в контрольных сечениях. Результаты измерений полей температур по точечным датчикам обрабатывались с помощью формулы (1) для расчета коэффициента смешения $m$ (рис. 6).

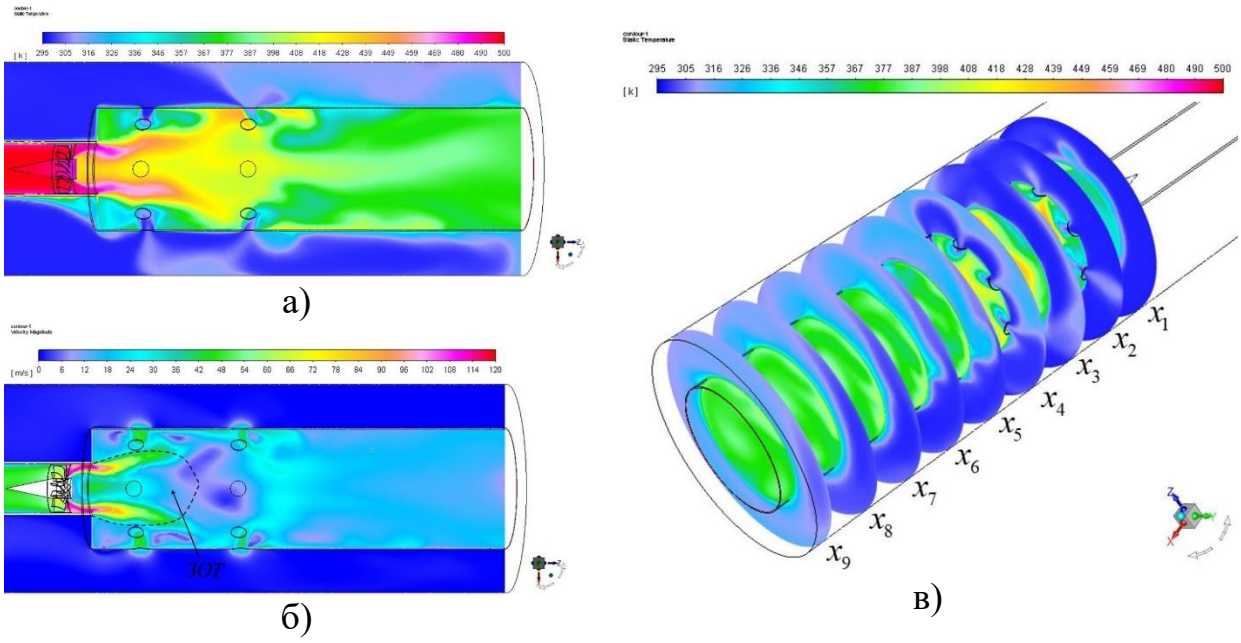



Рисунок 5 – Результат трехмерного численного расчета: а) поле температуры КС; б) вид зоны обратных токов за завихрителем в КС; в) вид контрольных сечений по температуре вдоль КС, где: $G_B = 0{,}112$ кг/с; $G_\Gamma = 0{,}048$ кг/с

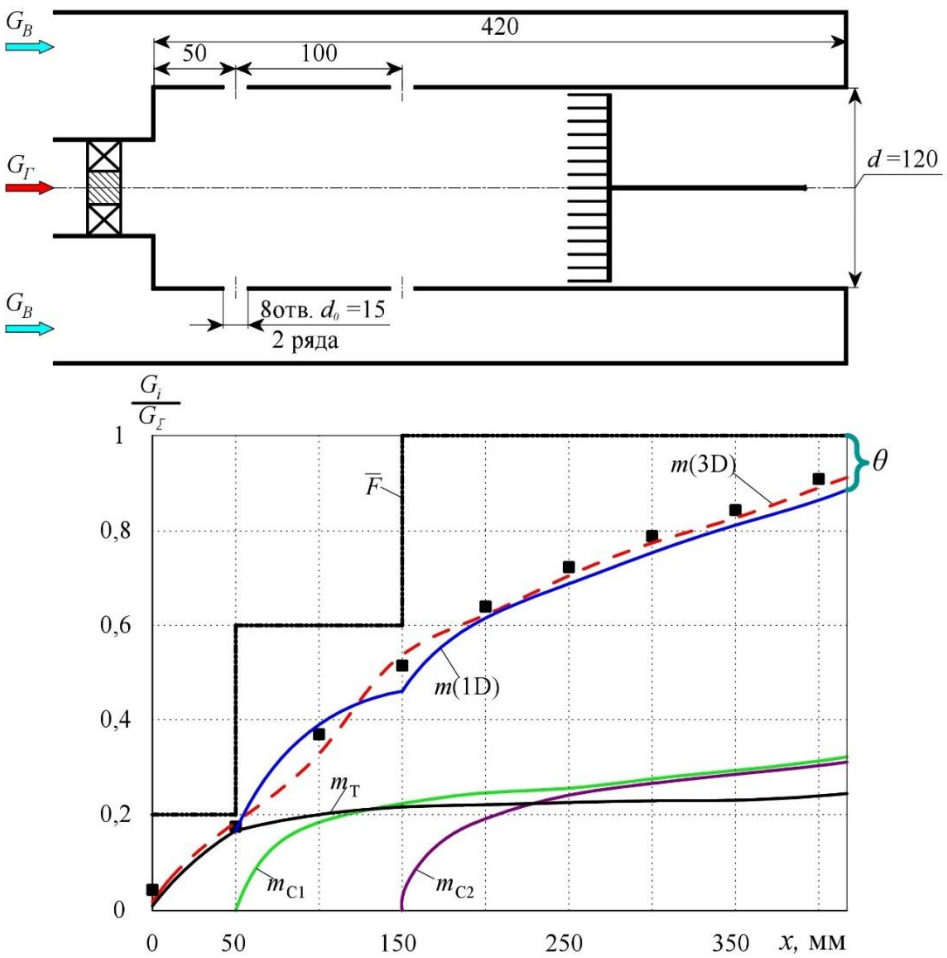



Рисунок 6 – Сопоставление результатов расчета смешения в КС по разными подходам, при углах крутки завихрителя $\varphi$ = $60^0$ ; $d_0$ = 15 мм; $T_Г$ = 500 К; $T_В$ = 295 К; $G_В$ = 0,096 кг/с; $G_Г$ = 0,064 кг/с, где: ■ - эксперимент; численный расчет: линия $m$(3D) - суммарное количество смешанного с потоком воздуха; аналитический расчет: линия $m_T$ - смешение в результате турбулентной диффузии; линия $m_{C1}$ - смешение в результате проникновения первого ряда струй; линия $m_{C2}$ - смешение в результате проникновения второго ряда струй; линия $m$(1D) - суммарное количество смешанного с потоком воздуха; линия $\overline{F}$ - изменение относительного расхода вторичного воздуха, рассчитанное по площадям

Анализ полученных результатов показал, что смешение воздуха, поступающего из отверстий ЖТ для различных рядов, происходит не одинаково. Если в случае, когда смешение вторичного воздуха происходит в результате турбулентного обмена с потоком набегающего нагретого воздуха достигает величины $G_i/G_\Sigma$ = 0,25 (кривая $m_T$ на рис. 6), то смешение воздуха, поступающего из отверстий первого ряда (кривая $m_{C1}$) и второго ряда (кривая $m_{C2}$), проходит более интенсивно, и к выходу из смесителя они достигают значений $G_i/G_\Sigma$ = (0,3 – 0, 35). Если, согласно уравнения баланса (14), все значения $m$ суммировать, то получится суммарная кривая ($m$(1D)) смешения вторичного воздуха с потоком, истекающим из завихрителя. Можно заметить, что кривые смешения,

найденные путем одномерного и трехмерного моделирования, практически соответствую друг другу и подтверждаются экспериментальными данными.

Необходимо отметить также то, что из сравнения протекания данной кривой с ступенчатой зависимостью относительных площадей отверстий следует, что не весь вторичный воздух успевает перемешаться с потоком за время его пребывания в ЖТ. Можно предположить, что этот фактор является одной из основных причин формирования неравномерности полей температур $\theta$.

Таким образом исследования, проведенные в данной главе, показывают, что в расчетах процессов КС необходимо учитывать реальную долю вторичного воздуха, подмешанного к газовому потоку в каждом сечении смесителя за время пребывания смеси в рассматриваемой зоне с помощью найденных зависимостей.

**В четвертой главе** рассматриваются результаты моделирования процессов горения и методов расчета полноты, температуры сгорания, эмиссии $NO_x$ в закрученном потоке.

Создание аналитической зависимости для расчета полноты сгорания встречает определенные трудности, связанные с необходимостью одновременного учета влияния химического реагирования и смешения на выгорание смеси.

В КС наиболее важной является зона циркуляции, которая ответственна за стабилизацию пламени, количество выбросов эмиссии. Поэтому возникает необходимость в определении коэффициента смешения в ЗОТ $m_{ЗОТ}$, и соответственно полноту и температуру горения в ней с учетом эжектированного из потока воздуха.

Располагая зависимостями для расчета коэффициента смешения $m$ и используя известную зависимость, полученную на основе обобщения многочисленных результатов исследований по смешению струи с потоком, можно найти следующее уравнение для расчета состава смеси в ЗОТ $\alpha_{ЗОТ}$:

$$\alpha_{ЗОТ} = \alpha_З \cdot m_{ЗОТ}\left(1 + \frac{1}{\alpha_З \cdot L_0}\right) + \alpha_З, \qquad (15)$$

где $\alpha_З = \dfrac{G_{З,0}}{G_{Т,0} \cdot L_0}$ - начальный состав смеси за завихрителем.

Полноту сгорания можно определить исходя из теории турбулентного горения, согласно работе А.В. Талантова, в зоне горения объем смеси сгорает с поверхности с определенной скоростью $U_Т$.

При этом за малый промежуток времени $dt$ сгорает малый объем $dV$, равный площади осредненной поверхности объема радиусом, равным масштабу $l_Т$ и турбулентной скоростью $U_Т$.

Можно получить уравнение для расчета полноты сгорания:

$$\eta_Г = \frac{3U_{T0}^3}{W'^3}\left\{\frac{1}{3}\left[1-\exp\left(-\frac{3\Delta x\cdot\varepsilon}{l_i}\right)\right]-\right.$$
$$\left.-\frac{U_H}{U_{T0}}\left[1-\exp\left(-\frac{2\Delta x\cdot\varepsilon}{l_i}\right)\right]+\frac{U_H^2}{U_{T0}^2}\left[\left(1-\exp\left(-\frac{\Delta x\cdot\varepsilon}{l_i}\right)\right)\right]\right\}, \quad (16)$$

где $U_T = U_H + W'$ - турбулентная скорость потока; $t = \frac{V_Г\cdot\rho_Г}{G_Г}$; $t_0 = \frac{l_0}{W'}$ – времена пребывания и существования пульсации, здесь $l_0$; $w'$ – масштаб и пульсационная скорость в расчетном сечении потока.

Здесь нормальная скорость $U_H$ распространения пламени зависит от физико-химических свойств горючей смеси и является ее физико-химической константой. Влияние различных режимных параметров на нормальную скорость горения достаточно хорошо описывается также зависимостью:

$$U_H = U_{H0}\left(\frac{T_i}{T_0}\right)^{\delta}\left(\frac{P_i}{P_0}\right)^{\gamma}, \quad (17)$$

где $U_{H0}$ - нормальная скорость при условии $P_0 = 10^5$ Па и $T_0 = 873$ К. Показатели степени $\delta$ и $\gamma$ рассчитываются как: по работе A.M. Mellor: $\delta = 2{,}98 - \frac{0{,}8}{\alpha}$; $\gamma = -0{,}38 + \frac{0{,}22}{\alpha}$. По работе В.А. Щукина: $\delta = 1{,}8$; $\gamma = -0{,}2$.

Отметим что, значения $U_{H0}$, $\delta$ и $\gamma$ соответствовали заданному топливу при конкретных рабочих условиях. В свою очередь в литературе существует множество вариантов степеней $\delta$ и $\gamma$ как в виде константы. Для правильного определения $U_{H0}$, $\delta$ и $\gamma$ были анализированы данные работы многих авторов и получить зависимости $U_{H0} = f(\alpha)$, $\delta = f(\alpha)$, $\gamma = f(\alpha)$.

$$U_{H0} = -3{,}55\alpha^4 + 25{,}49\alpha^3 - 66{,}31\alpha^2 + 70{,}82\alpha - 22{,}3. \quad (18)$$

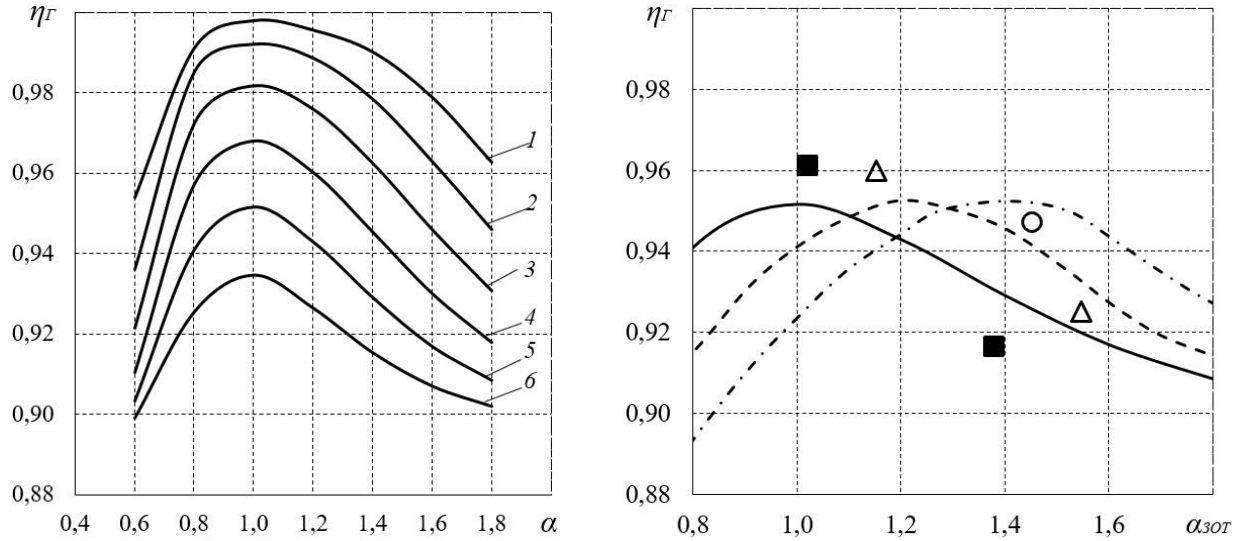
$$\delta = 2{,}03\alpha^2 - 4{,}46\alpha + 4{,}05. \quad (19)$$

$$\gamma = -0{,}63\alpha^2 + 1{,}28\alpha - 1{,}04. \quad (20)$$

Приведенные зависимости позволяют провести расчеты полноты сгорания в ЗОТ, в которых кроме кинетических факторов учитываются, как количество подмешанного воздуха, так интенсивность и масштаб турбулентности. Анализ результатов проведенных расчетов показывает, что полнота сгорания зависит от состава смеси и угла закрутки потока. Также начальная температура влияет на нормальную скорость горения соответственно на полноту сгорания за время пребывания в ЗОТ (рис.7-а). При использовании данной зависимости необходимо иметь в виду то, что она пригодна для случая горения гомогенной смеси, что в первом приближении имеет место в условиях зоны обратных токов в следе закрученной струи. Поэтому расчеты велись для условий течения в ЗОТ.

Результаты расчетов приведены на рис. 7, из которых следует, что полнотная кривая для закрученной струи имеет характерную особенность изменения-

максимальное значение полноты сгорания достигается при $\alpha_{ЗОТ} \approx 1,0$, уменьшение и увеличение αзот снижает полноту сгорания. Для разных круток струи характеристики полноты имеют некоторое расслоение, связанное с различной интенсивностью смешения в струе. Например, при углах крутки $\varphi = 30^0$ максимум полноты сгорания достигается при $\alpha_{ЗОТ} = 1,4$, при $\varphi = 45^0$, $\alpha_{ЗОТ} = 1,2$, причем этот факт подтверждается также экспериментальными данными. Очевидно, что это связано с тем, что на полноту сгорания дополнительно влияет наличие микронеоднородности смеси.




а) б)

Рисунок 7 – Результаты расчета полноты сгорания: а) Влияние начальной температуры (в К) на полноту сгорания в ЗОТ, где: *1* - 873; *2* - 773; *3* - 673; *4* - 573; *5* - 473; *6* - 373; б) Изменение полноты сгорания в ЗОТ от степени закрутки потока, при начальной температуре $T_З = 473$К, где: Экспериментальные данные Б.Г. Мингазова: ■ - $\varphi = 60^0$; Δ - $\varphi = 45^0$ ; ○ - $\varphi = 30^0$; Расчет: —— - $\varphi = 60^0$; – – - $\varphi = 45^0$; – · – - $\varphi = 30^0$

Другой важной характеристикой является температура горения в ЗОТ.

Средняя температура газа в зоне обратных токов может быть найдена из уравнения теплового баланса, в котором учитывается $Q_Э$ - тепло внесенное эжектируемым воздухом в ЗОТ, $Q_З$ - тепло, внесенное воздухом закрученной струей, $Q_Г$ - тепло подведенное к газу в ЗОТ за счет сгорания топлива, $Q_{СМ}$ - суммарное тепло в зоне обратных токов. На основе уравнения теплового баланса, с учетом коэффициента смешения, произведен расчет температуры горения в ЗОТ:

$$Q_{СМ} = Q_Э + Q_З + Q_Г . \qquad (21)$$

при $\alpha \geq 1$:

$$T_{Г,ЗОТ} = \frac{m_{ЗОТ} T_Э + T_З}{m_{ЗОТ} + 1} + \frac{\eta_Г \cdot Hu}{c_{РГ} \cdot (1 + \alpha_{ЗОТ} L_0)}, \qquad (22)$$

при $\alpha < 1$: $$T_{Г,ЗОТ} = \frac{m_{ЗОТ} T_Э + T_З}{m_{ЗОТ} + 1} + \frac{\eta_Г \cdot Hu}{c_{РГ} \cdot \left( L_0 + \frac{1}{\alpha_{ЗОТ}} \right)}, \quad (23)$$

где $Hu$ - теплотворная способность топлива; $L_0$ - стехиометрический коэффициент.

Располагая расчётными данными полноты и температуры сгорания можно оценить эмиссии $NO_x$ в зоне обратных токов Анализ многочисленных исследований показывает, что наиболее обоснованным подходом является термический механизм выделения $NO_x$ в продуктах сгорания. Поэтому для нахождения выбросов оксида азота в ЗОТ можно использовать упрощенную зависимость, полученную на основе термического механизма Я.Б. Зельдовича:

$$NO_x = 37 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{[O_2]} \cdot [N_2] \cdot e^{-\frac{65000}{T_{Г,ЗОТ}}} \cdot \sqrt{\frac{P_K^*}{T_{Г,ЗОТ}}} \cdot t, \quad \%, \quad (24)$$

где $t = \frac{V_{ЗОТ} \cdot \rho_Г}{G_{ЗОТ}}$ - время пребывания газа в ЗОТ; $O_2$, $N_2$ - мгновенные концентрации кислорода и азота в продуктах сгорания. В связи с тем что в расчетах трудно оценить концентрации $O_2$, $N_2$, можно использовать зависимость приведенную:

$[O_2] = \frac{0,232 \cdot (\frac{\alpha_{ЗГ}}{\eta_Г} - 1)}{1 + \frac{\alpha_{ЗГ}}{\eta_Г} \cdot L_0}$, объем %; $[N_2] = \frac{0,768 \cdot (\frac{\alpha_{ЗГ}}{\eta_Г} - 1)}{1 + \frac{\alpha_{ЗГ}}{\eta_Г} \cdot L_0}$, объем %.

На рис. 8 представлены результаты расчетов зависимости $NO_x = f(\alpha_{ЗОТ})$. Здесь же приведены литературные данные для горения однородной и неоднородной смесей. Из них следует, что выделение окиси азота в зоне горения с различной степенью крутки, происходит в пределах диапазона изменения выбросов, характерных для горения в неоднородных и однородных смесях. Очевидно, это связано с тем что при малых крутках в ЗОТ недостаточный уровень турбулентности и соответственно и турбулентной диффузии, вследствие чего в зоне горения имеются локальные зоны с переобогащёнными составами, которые способствуют выделению максимального значения $NO_x$ в области $\alpha > 1,0$, тогда как в однородных смесях максимум выделения $NO_x$ соответствует стехиометрическому составу, т.е. $\alpha = 1,0$. Поэтому с увеличением крутки струи скорость смешения возрастает, т.е. смесь становится более однородной и протекание кривой $NO_x = f(\alpha_{ЗОТ})$ приближается к характеру соответствующий горению однородных смесей.

Необходимо отметить, что при горении хорошо перемешанных стехиометрических смесей возможно превышение выбросов $NO_x$ по сравнению с неоднородными составами и наоборот при горении обедненных однородных смесей можно достигнуть значительного уменьшения эмиссии $NO_x$.

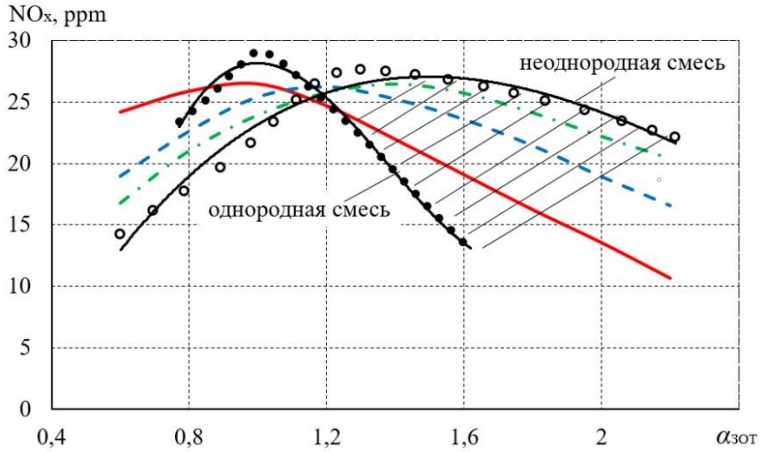


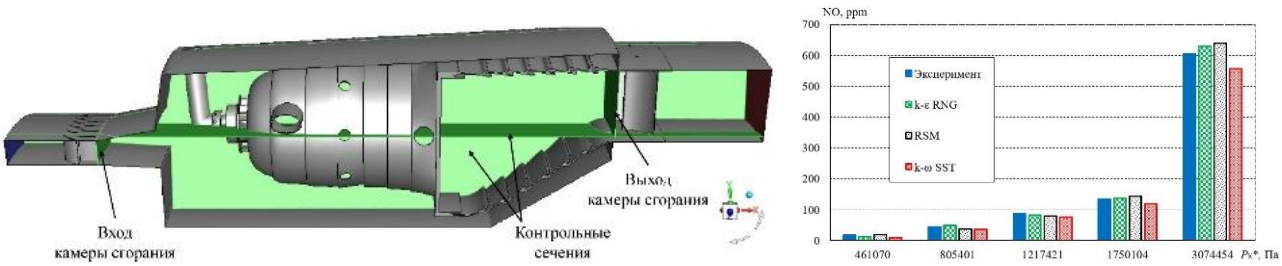

Рисунок 8 – Зависимости концентрации оксидов азота от состава смеси в ЗОТ за завихрителем, где: обобщенные экспериментальные данные П.М. Канило: ● - заранее подготовленная смесь природного газа и воздуха; ○ - диффузионный факел природного газа; Расчет: — - $\varphi = 60^0$; - - - $\varphi = 45^0$; —·— - $\varphi = 30^0$ ; Начальная температура смеси $T_З = 473$ К, давление $P_0 = 10^5$ Па

**В пятой главе** проводится исследование процессов образования $NO_x$, верификация математических моделей для прогнозирования выбросов $NO_x$ применительно к КС.

Для тестирования разработанной модели были проведены расчеты камеры сгорания авиационного двигателя ПС-90А (базовый вариант), геометрические и режимные характеристики которой приведены в книге А.А. Иноземцева. В качестве исходных параметров были рассмотрены пять режимов, которые выбирались по итогам экспериментальных данных Ю.Г. Куценко для двигателя ПС-90А и представлены в таблицу 1. Расчеты выполнятся для 1/12 сектора камеры сгорания (см. рис. 9-а)) в программе Fluent ANSYS V 19.2 Academic. Задача решалась в стационарной постановке с применением сопряженного решателя по давлению Pressure Based Coupled Solver (PBCS). Были проведены тестирование различных типы сетки, и получены наилучшее соответствие полиэдральной сетки с 34,2 млн. элементов. Была выбрана модель турбулентности *k-ε RNG, RSM, k-w SST*. По границам сектора использовались условия периодичности, на входе задавались массовый расход и температура воздуха за компрессором, на выходе контролировалось постоянство статического давления.

Таблица 1 – Граничные условия и результат измерения уровня эмиссии NO

| Номер режима | $P_K^*$, Па | $T_K^*$, К | $G_B$, кг/с | $\alpha$ | NO, ppm эксперимент |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3074454 | 856,0 | 6,61 | 2,94 | 605 |
| 2 | 1750104 | 713,5 | 4,22 | 3,96 | 134 |
| 3 | 1217421 | 655,8 | 3,03 | 4,12 | 87 |
| 4 | 805401 | 579,6 | 2,18 | 5,24 | 44,5 |
| 5 | 461070 | 490,9 | 1,35 | 6,19 | 18 |




а) б)

Рисунок 9 – Численное моделирование: а) трехмерная численная модель трубчато-кольцевой камеры сгорания; б) сравнение результата расчетов выбросы NO при использовании различных моделей турбулентности с экспериментальными данными

Для расчета горения жидкого топлива было выбрано газофазное приближение (стационарное) в виду того, что в современных камерах сгорания с высокими давлениями за компрессором преобладают высокие температуры воздуха на входе в КС, которые практически мгновенно испаряют жидкое топливо. Это упрощение позволяет сильно сэкономить на времени, по сравнению с нестационарным, который учитывает распыл и испарения жидкого топлива. К тому же стационарный расчет имеет наилучшее соответствие с экспериментальными результатами замеров температур.

Влияние выбора модели турбулентности для расчета выброса NO. На рис. 9-б) представлено сравнение данных эксперимента с результатами расчетов, проведенных для камер сгорания ПС-90А с использованием моделей *k-ε RNG, RSM, k-w SST*. И также по итогам предварительных расчетов и сопоставлений с экспериментальными данными выбраны: модель горения - модель ламинарных микропламён для неперемешанной смеси Flamelet (LF), где в качестве набора химических реакций для окисления керосина использовался химический механизм Jet-A (17 компонентов смеси: $H_2$, H, O, $O_2$, OH, $HO_2$, C, CH, CO, $CO_2$, $C_2H_2$, $C_{12}H_{23}$, N, NH, NO, $H_2O$, $N_2$ и 28 химических реакций их взаимодействия); модели излучения - модель дискретных ординат, с учетом сопряжённого теплообмена между продуктами горения и стенками ЖТ.

Сопоставление расчетных зависимостей с экспериментальными данными приведено на рис. 10.

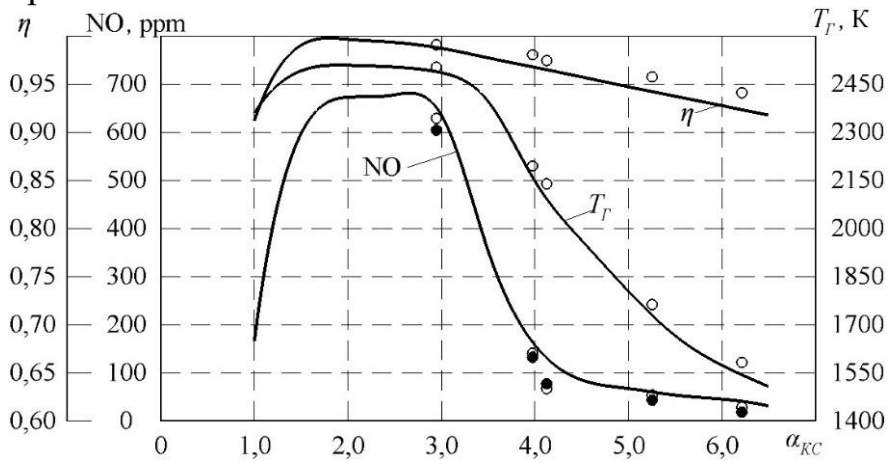



Рисунок 10 – Сравнение результата расчетов выбросы NO при использовании численного трехмерного (3D) и аналитического расчета с экспериментальными

данными (таблица 1), где ● - эксперимент; ○ - численный трехмерный расчет; ▬ - аналитический расчет по одномерной модели

Исследование влияния степени смешения на выбросы NO камеры сгорания. На основе численного трехмерного расчета характеристик КС. Исследовалась КС ПС-90А с тремя вариантами завихрителей, имеющие $\varphi = 30^0; 45^0; 60^0$ (рис. 11).

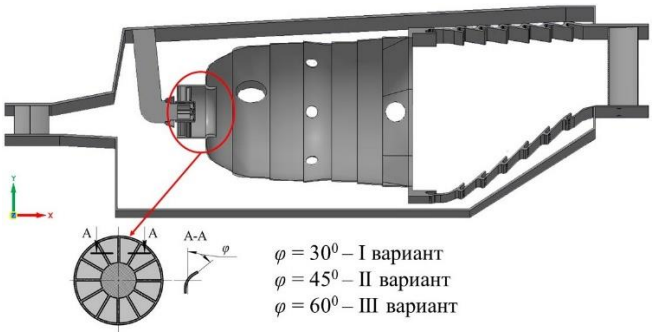
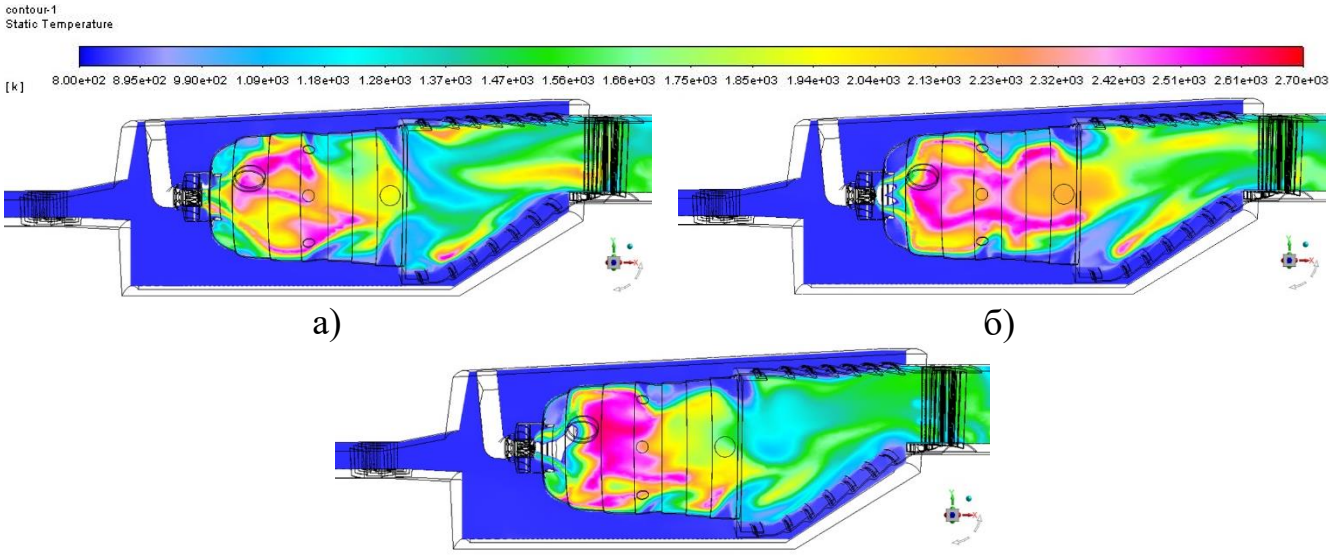



Рисунок 11 – Варианты расчетов при различной степени смешения за ФУ КС

Из результатов расчета, представленных на рис. 12 видно, что угол крутки потока в завихрителе ФУ оказывает влияние на формирование температурного поля в зоне смешения. Очевидно, это происходит вследствие влияния закрутки на смешение топливоздушной смеси. При малых углах закрутки потока ($\varphi = 30^0$) наблюдается (см. рис. 12-а) недостаточное перемешивание и догорание остаточного топлива происходит уже на выходе из жаровой трубы. В зоне смешения наблюдаются относительно холодные струи вторичного воздуха, доходящие до ядра потока, это происходит в виду слабой закрутки потока от ФУ и соответственно слабой интенсификации процесса тепло-массообмена в последующих зонах жаровой трубы. При увеличении угла закрутки струи вторичный воздуха более интенсивно смешивается с нагретыми газами и быстро нагреваются, этим объясняется уменьшение их размеров в зоне смешения (см. рис. 12-б, в)).




а) б)

в)

Рисунок 12 – Поля температуры по разными углам крутки завихрителя, расчет режима №1 таблица 1, где: $\alpha$ = 2,94; $P_K^*$ = 3074454 Па; $T_K^*$ = 856,0 К; $G_B$ = 79,32 кг/с здесь: а) $\varphi$ = $30^0$; б) $\varphi$ = $45^0$; в) $\varphi$ = $60^0$

Разработанный метод расчета характеристик камеры сгорания с учетом смешения, можно представить в виде блок- схемы, описывающей последовательность расчетов и мероприятий по доводке КС (см. рис. 13).

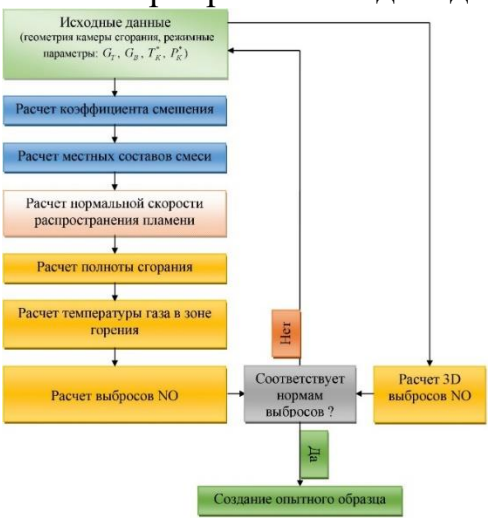



Рисунок 13 – Схема расчета выходных характеристик КС ГТД

Представленный алгоритм расчета характеристик камер сгорания позволяет определить влияние процессов смешения на выходные характеристики камер сгорания, что является важной частью проектирования и доводки камер сгорания. По итогам такого расчета делается вывод о необходимости внесения поправок в конструктивный облик камеры сгорания. Анализ и сопоставление результатов расчета эмиссии NO камеры сгорания различными методами моделирования на примере камеры сгорания ПС - 90А.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить исследования газодинамики течения и смешения потоков для трубчатого типа ЖТ КС ГТД.

2. Проведены экспериментальные исследования температурных полей, смешения и горения в закрученной струе.

3. Разработан аналитический метод расчета смешения в КС. Анализ результатов расчета указывает на достаточно хорошее соответствие данным эксперимента.

4. Получены зависимости для расчета полноты и температур сгорания в ЗОТ закрученной струи на основе теории турбулентного горения. Установлены закономерности влияния крутки струи на полноту сгорания и температуру сгорания.

5. Установлено, что увеличение закрутки топливо воздушной струи до угла $\varphi = 60^0$ способствует уменьшению уровня эмиссии $NO_x$ при горении обедненных смесей.

6. Проведено исследование процессов образования $NO_x$, на основе трехмерного моделирования и сопоставление результатов расчетной и экспериментальной оценки характеристик КС.

7. Проведен анализ и сопоставление результатов расчета эмиссии $NO_x$ различными методами моделирования на примере КС ПС - 90А.

8. На основе результатов проведенных исследований составлена методика расчета характеристик КС. Полученные зависимости позволяют предсказывать основные ее закономерности и могут быть использованы на практике и при доводке КС.

**Публикации автора по теме диссертации**

**В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Нгуен, Т.Д. Исследование смешения потоков за фронтовым устройством камеры сгорания газотурбинных двигателей / А.И. Сулаиман, Б.Г. Мингазов, Ю.Б. Александров, Т.Д. Нгуен // Известия высших учебных заведений, Авиационная техника. – Казань, 2019. – № 2. – С. 102 - 107.

2. Нгуен, Т.Д. Влияние расчётной сеткой на результаты численного расчета трехмерного нестационарного закрученного потока за лопаточным завихрителем / Ю.Б Александров, Т.Д. Нгуен, Б.Г. Мингазов, А.И. Сулаиман // Вестник Московского авиационного института. – Москва, 2020. – № 1. - С. 122 - 132.

3. Нгуен, Т.Д. Влияние режимных и конструктивных параметров на неравномерность температурного поля на выходе из камеры сгорания газотурбинного двигателя / А.И. Сулаиман, Б.Г. Мингазов, Ю.Б Александров, Т.Д. Нгуен // Вестник ПНИПУ. – Пермь, 2020. – № 60. – С. 80 - 87.

4. Нгуен, Т.Д. Экспериментальное и численное определение коэффициента смешения за различными лопаточными завихрителями камеры сгорания ГТД / Т.Д. Нгуен, Ю.Б. Александров, А. И. Сулаиман, Б.Г. Мингазов // Известия высших учебных заведений Авиационная техника. Казань. - 2020. - № 4. - С. 101 - 107.

**В научных изданиях, индексируемых базой данных SCOPUS:**

1. Nguyen, T.D. Study of mixing in a swirling jet / T.D. Nguyen, Y.B. Aleksandrov, B.G. Mingazov //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC. 2211. 2020. - pp. 040007-1 – 040007-7.

**В сборниках научных трудов, материалов конференций:**

1. Нгуен, Т.Д. Анализ работы камеры сгорания в различных условиях эксплуатации / Т.Д. Нгуен, Б.Г. Мингазов // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмичесуих систем процессы, модели, эксперимент. – Казань. - 2018. - 1(46), т.23. - С.97 - 108.

2. Нгуен, Т.Д. Анализ смешения в закрученном потоке за лопаточным завихри-телем. Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли / Ю.Б. Александров, Т.Д. Нгуен, Б.Г. Мингазов // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Материалы конференции. Материалы докладов. Том 1. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. - 2018. - С. 323 - 325.

3. Нгуен, Т.Д. Анализ радиального поля неравномерности температуры на выходе камеры сгорания перспективного авиационного двигателя / Т.Д. Нгуен,

Ю.Б. Александров, А.И. Сулаиман // XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. – Самара. -2019. - С. 31 - 34.

4. Нгуен, Т.Д. Сравнительный расчет камеры сгорания по одно- и трехмерной постановке с разными моделями горения / Ю.Б. Александров, Т.Д. Нгуен, Б.Г. Мингазов // XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. – Самара. - 2019. - С. 35 - 37.

5. Нгуен, Т.Д. Совершенствование температурного состояния стенок в области нагревательного элемента для экспериментальной установки, имитирующей смешение потоков в камере сгорания ГТД / Т.Д. Нгуен, Б.Г. Мингазов, Ю.Б., Александров, А.И. Сулаиман // Международная молодежная научная конференция «XXIV Туполевские чтения». - Том 1: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. - 2019. - С. 262 - 266.

6. Нгуен, Т.Д. Смешение поперечных струй с газовым потоком / А.И. Сулаиман, Б.Г. Мингазов, Ю.Б. Александров, Т.Д. Нгуен // Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки». Москва, ЦИАМ. - 2019. - С. 127 - 128.

7. Нгуен, Т.Д. Исследование смешения потока за лопаточным завихрителем в свободном пространстве / Т.Д. Нгуен, Б.Г. Мингазов, Ю.Б. Александров, А.И. Сулаиман // Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки», Москва. ЦИАМ. - 2019. - С. 130 - 131.

8. Нгуен, Т.Д. Особенности численного расчета смешения в закрученном потоке за лопаточным завихрителем / Т.Д. Нгуен, Ю.Б. Александров, Б.Г. Мингазов, А.И. Сулаиман // X Всероссийская научно-техническая конференция молодых специалистов. – Уфа, 2019. - С. 60 - 61.

9. Нгуен, Т.Д. Моделирование процессов смешения в закрученном потоке / Т.Д. Нгуен, Ю.Б. Александров, Б.Г. Мингазов // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: тезисы докладов. 7-я Всероссийская конференция с международным участием / Мин. высш. обр. и науки РФ; РГАТУ им. П. А. Соловьева; Рос. фонд фунд. исслед.; Нац. исслед. ун-т «МЭИ»; Нац. комитет по тепломассообмену РАН; ПАО «ОДКСатурн». – Ярославль: ООО «Цифровая типография». - 2019. - С. 56.

10. Нгуен, Т.Д. Влияние формы обтекателя на однородность профиля скоростей перед лопатками завихрителя / Т.Д. Нгуен, Ю.Б. Александров, Б.Г. Мингазов // Климовские чтения – 2020: перспективные направления развития авиадвигателестроения: сборник статей научно-технической конференции. – СПб.: Скифия-принт. - 2020. - С. 93 - 100.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ. А 14.

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К. Маркса, 10