

## Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

**Автор:** Жөнәділ Балауса Боләділқызы

**Название:** Нашар ағулы денелердің негізіндегі зиянды заттардың шығуы төмен ГТҚ-ның жану камерасын жасау жобасы.docx

**Координатор:** Диас Умишев

**Коэффициент подобия 1:** 0,4

**Коэффициент подобия 2:** 0

**Тревога:** 65

**После анализа Отчета подобия констатирую следующее:**

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите.

Обоснование:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

26.04.19г.

Дата

В.А. (Валеев И.)

Подпись Научного руководителя

## Протокол анализа Отчета подобия

### заведующего кафедрой / начальника структурного подразделения

Заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения заявляет, что ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

**Автор:** Жәнәділ Балауса Боләділқызы

**Название:** Нашар ағулы денелердің негізіндегі зиянды заттардың шығуы төмен ГТҚ-ның жану камерасын жасау жобасы.docx

**Координатор:** Диас Умишев

**Коэффициент подобия 1:**0,4

**Коэффициент подобия 2:**0

**Тревога:**65

**После анализа отчета отчета подобия заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения констатирует следующее:**

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, работа признается самостоятельной и допускается к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, работа не допускается к защите.

Обоснование:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

30.04.19

Дата

Подпись заведующего кафедрой /

начальника структурного подразделения

Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
30-04.19

Дата

.....  


Подпись заведующего кафедрой /

начальника структурного подразделения

## РЕЦЕНЗИЯ

Дипломдық жұмыс

(жұмыс түрінің атауы)

Жәнәділ Балауса Боләділқызы

(білім алушының Т.А.Ә.)

5B071700 – Жылу энергетикасы

(мамандық атауы мен шифрі)

Тақырыбы: *Нашар ағулы денелердің негізіндегі зиянды заттардың шығуы төмен ГТҚ-ның жану камерасын жасау жобасы*

Орындалды:

түсініктеме \_\_\_\_\_ 53 бет

Жәнәділ Б.Б дипломдық жұмысы нашар ағулы денелердің негізіндегі зиянды заттардың шығуы төмен ГТҚ-ның жану камерасын жобалауға арналған. Жұмыста газ турбинасының жану камерасын жаңа нашар ағулы денелері бар камерасына ауыстыру жобасы қарастырылған. Жаңа жану камерасын пайдалану арқылы шығатын зиянды заттардың мөлшері азаяды, және де бұл ГТҚ жоғары температуралық напорға ие. Нәтижеде газ турбинасының тиімділігі өсіп, отын шығыны азайды.

## ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ

Жұмысқа келесідей ескертулер жасалды:

- түсініктемелік жазбада грамматикалық және стилистикалық қателер кездеседі;
- есептік бөлімде жылу сыйымдылықтың мәні температураға тәуелсіз болып алынған.

Айтылған ескертулер жұмыстың маңызын төмендетпейді.

## ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Дипломдық жұмыс тапсырмаға сәйкес толық орындалған және «өте жақсы» (95%) бағаға бағалап, ал жұмыстың авторы Жанәділ Балауса Боләділқызын 5B071700 – «Жылу энергетикасы» мамандығы бойынша «бакалавр» академиялық дәрежесін алуға лайық деп санаймын.

## РЕЦЕНЗЕНТ

АЭЖБУ, «Жылу энергетикалық қондырғылар» кафедрасының доценті, техн.ғыл.канд.

«30» 04 20 19 ж.



М.Е. Туманов

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Т.К. Бәсенов атындағы Сәулет, құрылыс және энергетика институты

Энергетика кафедрасы

**ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ**

Кафедра меңгерушісі м.а.

PhD докторы, ассистент профессор

 Е.А. Сарсенбаев

«30» 09 2019 ж.

### ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы: «Нашар ағулы денелердің негізіндегі зиянды заттардың шығуы төмен ГТҚ-ның жану камерасын жасау жобасы»

5B071700 – Жылу энергетикасы мамандығы бойынша

Орындаған

Жәнәділ Б.Б

Пікір беруші

АЭЖБУ «Жылуэнергетикалық  
кондырғылар» кафедрасының  
доценті, техн. ғыл. канд.

Ғылыми жетекші

PhD доктор, сениор-лектор

 Балгаев Н.Е.

 Туманов М.Е.

«25» 04 2019 ж.

«30» 04 2019 ж.

Алматы 2019

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Т.К. Бәсенов атындағы Сәулет, құрылыс және энергетика институты

Энергетика кафедрасы

Жәнәділ Балауса Боләділқызы

Нашар ағулы денелердің негізіндегі зиянды заттардың шығуы төмен ГТҚ-ның  
жану камерасын жасау жобасы

**ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС**

5В071700 – Жылу энергетикасы

Алматы 2019

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Т.К. Бәсенов атындағы Сәулет, құрылыс және энергетика институты

Энергетика кафедрасы

5B071700 – Жылу энергетикасы

**БЕКІТЕМІН**

Кафедра меңгерушісі м.а.

PhD докторы, ассистент профессор

 Е.А. Сарсенбаев

«28» 01 2019 ж.

**Дипломдық жұмысты орындауға  
ТАПСЫРМА**

Білім алушы *Жәнәділ Балауса Боләділқызы*

Тақырыбы «Нашар ағулы денелердің негізіндегі зиянды заттардың шығуы төмен ГТҚ-ның жану камерасын жасау жобасы»

Университет ректорының 2018ж. «30» қазанындағы № 1210-б бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі «25» сәуір 2019 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістер: *Компрессордың ішіндегі ауа температурасы 518,6 К ; турбина алдындағы ауа қысымы 695,04кПа; отынның меншікті шығыны 0.163 кг/(кВт\*сағ); турбинаның ішіндегі газ температурасы 882К ; жану камерасынан шығатын газ температурасы 1400К.*

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі

а) Азот оксидтерінің түзілуін басудың әдістері;

б) Микромодульді жану камералары және оттықтар;

в) Газ турбиналы қондырғыны есептеу

г) Экономикалық бөлім.

Сызбалық материалдар тізімі Сызбалық материалды слайдпен дайындау



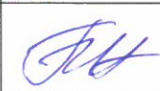
Ұсынылатын негізгі әдебиеттер 17 атау



Дипломдық жұмысты дайындау  
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Жану камерасын ауыстырғандағы газ турбинасының есебі	11.03.2019	шоқ
Жану өнімдерінің рециркуляциясы	25.03.2019	шоқ
Газ турбиналы қондырғыны есептеу алгоритмі	8.04.2019	шоқ
Экономикалық тиімділігін анықтау	25.04.2019	шоқ

Дипломдық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа қойған қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер, аты, әкесінің аты, тегі (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Негізгі бөлім	Балғаев Н.Е PhD докторы, сениор-лектор	25.04.1924	
Экономика бөлімі	Балғаев Н.Е PhD докторы, сениор-лектор	25.04.1924	
Норма бақылау	Балғаев Н.Е, PhD доктор, сениор-лектор	25.04.1924	

Ғылыми жетекші

  
\_\_\_\_\_

Н.Е. Балғаев

Тапсырманы орындауға алған білім алушы

  
\_\_\_\_\_

Б.Б.Жәнәділ

Күні

« 15 » 03 2019 ж.

## **АНДАТПА**

Бұл дипломдық жобада нашар ағулы денелердің негізіндегі зиянды заттардың шығуы төмен газ турбиналық қондырғылардың жану камераларын қарастырдым. Негізгі бөлімде ГТҚ-ның жану камералары табиғи отынның жануы кезінде зиянды заттардың пайда болу себептеріне талдау жүргізілді, жану процесінің жалпы принциптері және тізбекті реакциялар қарастырылды. Сонымен қатар бөлімде микрофакельді қағидатты пайдаланудың әртүрлі нұсқаларына талдау жүргізілді. Жану камерасын ауыстырғандағы газ турбинасының есебі келтірілген.

Экономикалық бөлімде жану камерасына кететін шығын мен оның экономикалық тиімділігін анықталды.

## **АННОТАЦИЯ**

В этом дипломном проекте рассмотрены камеры сгорания газотурбинных установок с пониженным образованием токсичных веществ. В основной части проведен анализ причин образования токсичных веществ при сгорании природного топлива в камерах сгорания ГТУ, рассмотрены общие принципы процесса горения и цепные реакции. Также в отделе проведен анализ различных вариантов использования микрофакельного принципа. Приведен расчет газовой турбины при замене камеры сгорания. В экономической части определяем затраты на камеру сгорания и его экономическую эффективность.

## **ANNOTATION**

In this diploma project considered the combustion chamber of gas turbine plants with reduced formation of toxic substances. In the main part of the analysis of the causes of formation of harmful substances in the combustion of natural fuel in the combustion chambers of GTP, the General principles of the combustion process and chain reactions are considered. Also the department carried out analysis of various options for the use of microfocusing principle. The calculation of the gas turbine when replacing the combustion chamber is given. In the economic part, we determine the cost of the combustion chamber and its economic efficiency.

## МАЗМҰНЫ

	Кіріспе	7
1	Газ тәрізді отынды жағу кезінде азот оксидтерінің пайда болу механизмдері	9
1.1	Термиялық азот	10
1.1.1	Жылдам азот оксидтері	12
1.1.2	Отындық азот	13
1.1.3	Азот диоксиді	13
1.2	Азот оксидтерінің түзілуін басудың технологиялық әдістері	13
1.2.1	Су бүрку және су буы	14
1.2.2	Жану өнімдерінің рециркуляциясы	16
1.2.3	Ауаны оңтайлы бөлу	16
1.2.4	Қоспалардың түзілуін интенсификациялау	17
1.3	Азот оксидтерінің түзілуін басудың конструктивтік әдістері	17
1.3.1	Сатылы жану камералары	18
1.3.2	Өзгеретін геометриясы бар жану камералары	19
1.3.3	Каталитикалық жану камералары	19
1.3.4	Алдын ала дайындалған “кедей” қоспасын жағу (гомогенді жану камералары)	22
2	Жағу және құрылғының микрофакельді әдісі	25
2.1	Микромодульді жану камералары және оттықтар	25
2.2	Жағудың ағынды-тұрақтандырғыш әдісі	29
2.3	Бұрыштар түріндегі нашар ағулы денелер негізіндегі оттық құрылғылары	33
3	Бұрыштық тұрақтандырғыштардан жану процестерін сандық модельдеу	38
3.1	Математикалық модель	38
3.2	Азот оксидтерінің пайда болу моделі	39
3.3	Микрофакельді оттықтарда жану процестерін зерттеу	40
3.4	Газ турбиналы қондырғыны есептеу алгоритмі	42
3.5	Жану камерасын ауыстырғандағы газ турбиначасының есебі	45
4	Жобаның экономикалық тиімді екенінің дәлелі	48
4.1	Жану камерасын жасауға кететін капиталды шығын	48
4.2	ГТҚ-ның жылдық энергиясын есептеу	48
4.3	Жобаның экономикалық тиімділігін анықтау	51
	Қорытынды	52
	Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	53

## КІРІСПЕ

Соңғы жылдары жану теориясының және жанатын құрылғылардың жаңа түрлерін дайындау мәселелері отынның нашарлайтын түрлерін пайдалану және энергетика мен көлік жүйелерінде отынды жағу кезінде қоршаған ортаның ластану деңгейін азайтуға қойылатын талаптардың артуы салдарынан кеңейді. Әрбір ағынның тұрақты жануын қамтамасыздандыру шартымен жанып жатқан отын саны көп кіші ағыстарға бөлінген кезде ғылымда және тәжірибеде жанудың микрофакельді принципіне аса қызығушылықпен мән беріледі.

Газтурбиналық қондырғылар жыл сайын энергетика, өнеркәсіп, сондай-ақ теңіз және жер үсті көліктерінде кеңінен таралып жатыр. Газтурбиналық қондырғылар пайдаланылған газдардағы зиянды компоненттердің болуы іштен жану қозғалтқыштарына қарағанда төмен. Қазіргі заманғы газтурбиналық қондырғылар автомобильдердің зияндылығы бойынша нормаға сәйкес салынады, бірақ оларды одан әрі қатаңдату ескере отырып, сондай-ақ перспективті қозғалтқыштар үшін турбина алдындағы газ температуралардың жоғарылауын назарға ала отырып, қазірдің өзінде пайдаланылған газдардағы зиянды заттардың, ең бастысы негізгі зиянды компонент болып табылатын және жұмыс режиміндегі газтурбиналық қондырғылар жалпы зияндылығы 85-95% -ын анықтайтын азот оксидтерінің мөлшерін азайту шаралары мен мүмкіндіктерін қарастыру керек. Егер қондырғының үнемділігі, жалпы оның барлық жекелеген тораптарын жетілдірумен анықталса, онда зияндылық деңгейі мен жану камерасында отынды жағу процесін ұйымдастыруды жетілдірумен анықталады. Жұмыс процесінің жоғары сипаттамасы және зияндылық деңгейі төмен жану камераларын құру мәселесі қазіргі уақытта жану камераларында қоспалауды жаңа тәсілдермен әзірлеуді және зерттеуді, жану процесін ұйымдастыруды талап етеді. Сондықтан ГТҚ-ның жану камераларын жобалау кезінде форсунды және фронтты құрылғыларды, қазіргі заманғы қозғалтқыштарға арналған жаңа талаптарды ескере отырып, жану камерасының барлық схемасын негізді таңдау қажет: қуаттың өлшемін арттыру, отынның барлық нашарлайтын түрлерін қолдану мүмкіндігі, қызмет көрсетудің еңбек сыйымдылығын азайту және пайдаланылған газдардағы зиянды компоненттердің құрамын азайту. Отынды микрофакельді жағуға арналған құрылғылардың принципті жаңа конструктивтік схемаларын әзірлеу дәстүрлі форсуно-жанарғы құрылғылары мен жану камераларының жұмыс процесін сипаттайтын бірқатар ережелерді қайта қарауды талап етеді. Мұнда жұмыс аймағының қимасы бойынша жану ошақтарын орналастыру және жанарғы құрылғыларының элементтерінде алдын ала қоспа түсуді ұйымдастыру керек. Әр түрлі мақсаттағы отын жағатын құрылғыларды іске асыруға мүмкіндік беретін іс-шараларды атап көрсетуге болады: үнемділікті көтеру, зияндылықты азайту, металлсыйымдылық, масса, көлік қозғалтқыштарында жану камерасының өлшемдерін азайту, сондай-ақ жоғары жануын қамтамасыз ету, азот қышқылдарының пайда болуын және

күйе түзілуін азайту.Осылайша көлік қозғалтқыштарының жану камераларына және алаулы жанарғы құрылғыларына арналған микрофакельді жүйелерді одан әрі жетілдіруге бағытталған шаралардың халық шаруашылығы мен әлеуметтік маңызы зор.

Жану камераларына келетін болсақ, айтылғандарға байланысты олардың конструкциясына және жетілдіру жұмыстарының бағытына белгілі бір өзгерістер қажет етіледі. Негізінен бұл әртүрлі отындарда тиімді жұмыс істей алатын,сондай-ақ ең аз зиянды қосылыстарды қамтамасыз ететін жану процесін ұйымдастыруға байланысты.

ГТҚ-да отынның төмен сортты және арзан түрлерін пайдалану кезінде туындайтын негізгі мәселелер жану процесінің жеткіліксіз тиімділігі және камераны іске қосу қиындықтары болып табылады. Осының нәтижесінде қозғалтқыштардың түтіндеуі,форсункаларда зиянды қосылыстар мен күйіктің едәуір пайда болуымен байланысты қиындықтар туындайды,бұл одан әрі ГТҚ-ның жұмысының үнемсіз болуына әкеледі.

## 1 Газ тәрізді отынды жағу кезінде азот оксидтерінің пайда болу механизмдері

Араласу процестерін, белсенді заттардың реакциясын, сондай-ақ ілеспе химиялық реакцияларды зерделеу жану процестерін және зиянды заттардың, атап айтқанда азот оксидтерінің түзілуін басқару, тану үшін негіз болып табылады. Алайда, олардың жылдамдығы мен күрделілігіне байланысты осы үдерістердің жеткіліксіз зерттелуі жататын бірқатар проблемалар бар.

Жану процестерін зерттеуге еңбек сіңірген авторлар Зельдович Я. Б., Пчелкин Ю. М., Манушин Э. А., Лефевр А., Сигал И. Я., Гупта А. және басқалары.

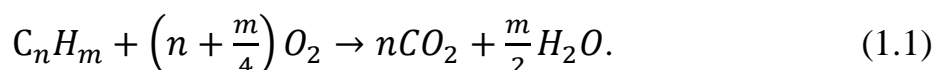
Жоғарыда ұсынылған авторлардың жұмыстарынан және басқа да бірқатар жұмыстардан жану процесінің тиімділігі мен жану камераларын жетілдіру критерийі бойынша бағаланады - жану процесінің соңғы сатысында отын қалай жанады деген қорытынды жасауға болады. Мәселелердің күрделілігі осындай процестер тез өтіп, қазіргі уақытта осы процестерді толық бағалауға мүмкіндік беретін жақсы әзірленген эмпирикалық әдістемелер жоқ.

Жану процестерін анықтап қарау және оған әр түрлі факторлардың әсері әр түрлі жұмыстарда қарастырылады. Мұнда газ тәрізді отынның жану процесін және азот оксидтерінің пайда болуын сипаттаудың жалпы тәсілдерін қарастырамыз. Бұл процестердің өте күрделі екенін атап өткен жөн. Көмірсутекті отындардың жану реакциясы тармақталған тізбекті реакциялар қатарына жататыны белгілі. Процестің өту сипатына қысым, температура, жылдамдық, отынның ауамен араласуы және басқалар сияқты әртүрлі факторлар әсер етеді.

Ұзақ уақыт бойы азот оксидтеріне жеткілікті түрде көп көңіл бөлінбеді. Ауада азот оксидтерінің болуы Қазақстанның өнеркәсіптік аудандары мен ірі қалаларында түгіннің пайда болу себептерінің бірі болып табылады. Бірақ бүгін де Қазақстан Республикасында автомобильдердің зияндылығын өлшеу тек пайдаланылған газдарда СО-ны ұстауға жүргізіледі.

Отынның потенциалдық химиялық энергиясы оның жану камераларының жануы процесінде жылу энергиясына айналады. Химиялық элементтерді жылу энергиясына түрлендіру процесі жану камераларының элементтеріне күшті жүктеме береді.

Зиянды компоненттердің пайда болу себептерін қарастырамыз. Жану камераларындағы көмірсутектердің жану реакциялары өте күрделі болып табылады. Көмірсутектердің жану реакциялары тізбекті реакцияларға жататыны белгілі. Көмірсутектің толық жануының химиялық реакциясы келесі теңдеумен көрсетілуі мүмкін:



Ұсынылған теңдеу отын молекуласы  $n + \frac{m}{4}$  оттегінің молекулаларымен бір мезгілде соқтығысқан жағдайда ғана қолданылады. Мұндай соқтығысудың ықтималдығы соншалықты аз, бұл тізбекті реакция теориясының сәйкес назарға алынуы мүмкін емес. Отынды дайындау кезеңінде көмірсутектердің кейбір молекулалары ыдырауға ұшырайды және бұл ретте тұтанудың өте белсенді тұрақсыз радикалдары бөлінеді. Олар оттегі молекулаларымен өзара әрекеттеседі және органикалық асқын тотықтар мен альдегидтерді құрайды. Бұл реакция өнімдерінің концентрациясы критикалық шамаға жеткенде, олардың жарылу ыдырауы пайда болады және жану реакцияларының тізбегі басталады. Тотығу реакциясы тотықтың пайда болуына әкелуі мүмкін, яғни формальдегид жасай отырып ыдырауға ұшырайтын тотығудың тұрақты белсенді аралық өнімдері.

Белсенді аралық тотығу өнімдері тізбектердің жаңа бөлімшелерін бастайтын бос радикалдар бөліп, мезгіл-мезгіл ыдырауға ұшырайды. Бұл процесс лавин тәрізді сипатқа ие болады. Бұл процесте СО және асқын тотықтың ыдырауын тудыратын белсенді радикалдар пайда болады. Реакция дамуының соңғы кезеңі отынның тұтануын тудыратын жарылыспен сипатталады. Көрсетілген схеманың негізінде көмірсутектердің тотығу реакциясының дәйектілігін былайша ұсынуға болады: алдымен оттегімен реакцияға түсетін белсенді радикалдардың кейбір саны пайда болады, содан кейін сутегі тотығының молекулаларында пайда болатын белсенді асқын тотықтар пайда болады. Асқын тотықтың белсенді радикалы пайда болғаннан кейін тотығу реакциясы асқын тотықтың немесе радикалдардың пайда болу схемасына сәйкес дами алады, олардың даму сипаты радикал пайда болған сәтке байланысты. Жоғары температурамен жану процесінде ауадағы азот реакцияға қабілетті болады және NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O сияқты оксидтерді құрайды. Жану өнімдерінде негізінен NO, NO<sub>2</sub> орындары бар, олар жиі NO<sub>x</sub>-пен біріктіріледі. Азот оксидтерінің пайда болуы бірнеше жағдайларда мүмкін, бірінші жағдай-азот, яғни молекулалық азоттан пайда болған ауа, екінші-аралық радикалдар арқылы жоғары жылдамдықты реакция, үшінші жағдай-отын азоты деп аталатын отын құрамындағы азот. Осылайша, азот түзілуінің үш түрі бар екенін білеміз, олар термиялық, жылдам және отындық. Олардың әрбір түрін бөлек қарастырамыз.

### 1.1 Термиялық азот

Термиялық азоттың пайда болу кинетикасы келесі теңдеулермен сипатталады:



Алғашқы екі реакция 1946 жылы Зельдович механизмі бойынша анықталды, ал үшінші реакция 1970 жылы қосылды, яғни атомдық оттегінің саны аз бай қоспаларды ескергенде. Бұл теңдеулер Зельдовичтің кеңейтілген механизмі ретінде сипатталады.

Зельдович механизміндегі (1.2) реакция (1.3) реакцияға қарағанда әлдеқайда баяу өтеді, сондықтан азот оксидтерінің пайда болуы кезіндегі (1.2) реакция анықтау реакциясы болып табылады. Баяу реакцияның себебі  $N_2$  молекуласының байланысын көрсетудің жоғары энергиясы болып табылады. Жану процесімен салыстырғанда және азот оксидтерінің түзілуі аймағында болды.

Молекулалардың термиялық диссоциациясы кезінде оттегі атомдарының пайда болу кинетикасы қарастырылған. Авторлар диссоциация мен рекомбинация процесінің тиімділігі үшінші компоненттің табиғатына байланысты емес деп болжады. Диссоциация кезіндегі концентрацияның өзгеру жылдамдығы келесі түрде жазылады:

$$\frac{dc_o}{dt} = K_{11} \cdot C_{O_2} \cdot C_M - K_{14} \cdot C_o^2 \cdot C_M, \quad (1.5)$$

мұндағы  $C_{O_2}$ ,  $C_o$ ,  $C_M$  - тиісті компоненттің мольдік үлесі;

$K_{11}$  және  $K_{14}$  - тура және кері химиялық реакция жылдамдығының константалары.

Камералардың жану аймағына тән температура саласында  $C_o \ll C_{O_2}$ , сондықан  $C_{O_2} = \text{const}$  және  $C_M = 1$  болып саналады.

Онда  $C_o$ -ді  $x$  арқылы өрнектеп аламыз:

$$\frac{dx}{dt} = K_{11} \cdot C_{O_2} \cdot C_M - K_{14} \cdot x^2 \quad (1.6)$$

болмаса,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{2 \cdot t} (1 - x^2), \quad (1.7)$$

$$\text{мұндағы } t = \frac{1}{4 \cdot K_{14} \cdot \sqrt{K_{O_2} \cdot C_{O_2}}} \quad (1.8)$$

$K_{O_2}$  - диссоциация реакциясының тепе-теңдік константасы.  
 $\tau=1$  және  $t=0$  бастапқы шарты бойынша (1.6)-ны біріктіреміз:

$$x = \frac{1 - \exp(-\frac{\tau}{t})}{1 + \exp(-\frac{\tau}{t})}. \quad (1.9)$$

Есептеулердің нәтижелері атомдық оттегінің химиялық тепе-теңдігіне қол жеткізу жоғары емес жылдамдықпен жүретінін көрсетеді. Осыған орай, қорытынды жасауға болады, реакция (1.5) оттегі атомдарының негізгі көзі болып табылмайды, демек, басқа реакциялардың – оттегі тасымалдаушылары



бар. Сондықтан көптеген жұмыстарда азот оксидтерінің түзілу механизмін сипаттау үшін теңдеуді қосымша тартады.

Теңдеудің реакция жылдамдығының константасы (1.4) шамамен 2000 К кезінде реакция константасына тең (1.3). Бұдан басқа, гидроксильді топтардың концентрациясы О оттегінің концентрациясымен салыстырғанда жоғары мөлшерге ие. Сондықтан реакция (1.4) ауаның артық азаюында азот оксидтерінің түзілуінде маңызды рөл атқара алады. Демек, Зельдовичтің кеңейтілген механизмі барлық үш реакцияны қамтиды (1.2), (1.3), (1.4). Зертханалық жанарғылардың жалынды аймағынан кейін NO түзілуінің қазіргі тәжірибелік зерттеулері жоғарыда тұжырымдалған Зельдовичтің кеңейтілген механизмін растады.

Алайда азот оксидтерінің түзілуінің өлшенген жылдамдығы мен жоғарыда көрсетілген схемалар бойынша болжанған жылдамдықтары арасында келіспеушіліктер бар. Ең үлкен келіспеушілік "бай" отындар жанған кезде орын алады. "Кедей" тайпаларда азот оксидтерінің түзілуін зерттеу кезінде, жану аймағына жақын жерде NO түзудің ұлғайтылған жылдамдығы О және ОН радикалдарының тепе-тең концентрацияларымен байланысты екендігі анықталды.

Термиялық азоттың түзілуін анықтайтын басты фактор жану аймағындағы температура болып табылады. Жоғары температураның жергілікті аймақтары болса, камераның жану аймағында орташа температураның қолайлы төмендеуіне жету жеткіліксіз. Әртүрлі авторлармен келтірілген үдерістер мен жүргізілген эксперименттер нәтижелерінің теңдеулерін талдай отырып, NO білім беру шарттары жеткілікті терең зерттелмеген және әрі қарай зерттеуді талап етеді.

Әдебиетті талдау және әртүрлі авторлар жасаған эксперимент нәтижелері негізінде келесідей қорытынды жасауға болады:

- "термиялық" NO-ның пайда болуы жалынды аймақта емес, тікелей жану аймағында басталады. Сонымен қатар, термиялық азоттың пайда болуы жану кезінде пайда болатын әр түрлі процестер мен радикалдарға байланысты;

- алауда атомдық оттегінің пайда болуы тек  $O_2$  диссоциациясы есебінен ғана емес, сонымен қатар басқа да реакцияларда да болады, жану аймағындағы О концентрациясының есептік көрсеткіштен бірнеше есе артық екенін ескереміз;

- "термиялық" азоттың түзілуінің пайда болуы төмен температураға тәуелділігі.

### *1.1.1 Жылдам азот оксидтері*

"Жылдам" азот оксидтерінің болуы Фенимор жұмысында алғаш рет көрсетілді. Тәжірибе көрсеткендей, азот оксидтерінің тез түзілуі жалын фронтындағы реакциялардан (1.2), (1.3), (1.4) бастау алар еді. Химиялық реакциялар кезінде көмірсутектер мен азот сынықтарының қатысуымен

атмосфералық ауадан құрамында азоты бар радикалдар пайда болады деп болжам жасалды, олар содан кейін NOx –ке дейін тотығады.

### *1.1.2 Отындық азот*

"Отындық" азот оксидтері өзінің негізгі бөлігінде құрамына азоттың әртүрлі қосылыстары кіретін немесе газ тәрізді отында аммиак болған кезде қатты және сұйық отынға таралады. Зерттеулер азот оксиді концентрациясының артуы отындағы азот құрамының ұлғаюымен өсетіндігін көрсетті. Мұндай азот түзілу жылдамдығы температураға байланысты. Осы жұмыста пайдаланылатын отынның құрамында азоттың болмауы немесе аздаған дәрежеде болуы, "отындық" азоттың пайда болуының одан әрі механизмі қарастырылмайды.

### *1.1.3 Азот диоксиді*

Азот тотығуының бастапқы өнімі болып табылатын азот оксиді осы экзотермиялық реакцияның өтуі үшін талап етілетін төмен температураға жеткен кезде диоксидке дейін тотықтандырылады. Осыған байланысты, NO<sub>2</sub>-ге өту процесі әдетте ГТҚ-ның шығару жолында, сондай-ақ жану камераларының төменгі температуралы аймақтарында, мысалы, жалын құбырының салқындатқыш қабырғаларына іске асырылады. Зерттеу нәтижелеріне сәйкес, атомдық оттегі және пероксидтік радикал HO<sub>2</sub> болып табылатын NO мен NO<sub>2</sub>-дегі екі ықтимал тотықтырғыштардың ішінен практикалық маңызы зор тек HO<sub>2</sub> болып саналады. Бұл плазмадағы NO мен NO<sub>2</sub>-де молекулалық оттегімен тотығу процесінің реакцияларды белсендірудің жоғары энергиясы және қадағалаудың көп уақыты болуына байланысты бұл процесс NO<sub>2</sub>-нің елеулі мөлшерін бере алмайды. Пероксидті радикал атомдық сутегінің жоғалу аймағында және оған жақын жерлерде көмірсутекті отындар едәуір мөлшерде пайда болады. Жұмыстарда көрсетілгендей, жану аймағындағы ең аз температуралар аймағында 100-120 мг/м<sup>3</sup> жану өнімдеріндегі NO құрамы кезінде HO<sub>2</sub>, NO болған кезде іс жүзінде NO<sub>2</sub>-ге бірден ауысып, пероксидті радиалдың (HO<sub>2</sub>) жеткіліксіз мөлшері NO мен NO<sub>2</sub>-ге толық тотығуға кедергі жасайды деп есептеуге болады.

## **1.2 Азот оксидтерінің түзілуін басудың технологиялық әдістері**

Азот оксидтерінің түзілуін басудың әдістері технологиялық және конструктивтік болып бөлінеді. Азот оксидтерінің түзілуін басудың негізгі технологиялық әдістеріне мыналар жатады:

1. Су бүрку және бу жану камерасы;
2. Жану өнімдерінің рециркуляциясы;
3. Ауаны оңтайлы бөлу;

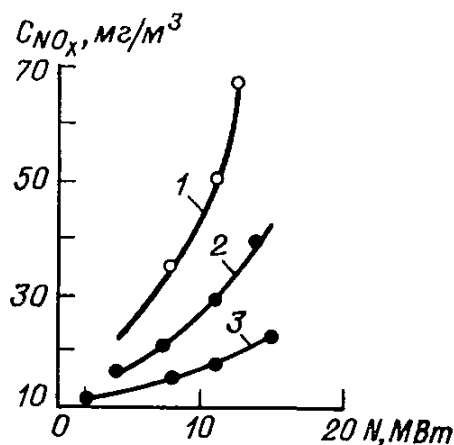
4. Жану камерасындағы қоспалардың интенсификациясы;
5. Сатылы жағу;
6. Каталитикалық жағу.

### 1.2.1 Су бүрку және су буы

Бу немесе суды бүрку-бұрыннан белгілі және кеңінен қолданылатын технология. Жану камераларында берілетін су жоғары меншікті жылу сыйымдылығына шамамен екі есеге ие бола отырып, жылудың бір бөлігін алады, бұл жану камераларының көлемінде газдардың жалпы температурасын төмендетеді, демек термиялық азоттың түзілуі азаяды. Сондай-ақ су бүрку жұмыс денесінің массалық шығынын арттырады, яғни қондырғының қуаты артады. Жану камераларындағы суды немесе буды бүрку жалынды құбырдың қабырғаларында орнатылған фронт құрылғылары немесе форсункалар арқылы жүзеге асырылуы мүмкін, сондай-ақ су жылытатын эмульсия түрінде отынмен енгізілуі мүмкін (тек сумен болған жағдайда).  $\text{NO}_x$  шығарындыларының төмендеуі технологияға, судың агрегаттық жағдайына және бүрку орнына байланысты. Буды немесе су бүрку жану камераларында, сол сияқты газтурбиналық қондырғылардың басқа да жерлерінде жүзеге асырылуы мүмкін. Суды енгізу орнына байланысты ГТҚ-ның көрсеткіштері де тәуелді. Азот оксидтерінің төмендеуінің ең үлкен әсері арнайы құрастырылған отын форсункасының көмегімен жану камераларының жану аймағына су буын енгізген кезде өндіріледі. Жану камераларында сулық буды бүрку кезінде азот оксидтерінің тастамалары орта есеппен 20-30%-ға төмендейді, сондай-ақ тастамаларды 3-5 есе төмендету бойынша жұмыстардың нәтижелері бар, яғни суды ГТҚ-ның ағынды бөлігіне бүрку кезінде ауа шығынының 25% мөлшеріне тең.

1.1-суретте ГТҚ-ның жану өнімдеріндегі азот оксидтерінің құрамындағы будың  $\text{N}$  жүктемеге тәуелділігі келтірілген.

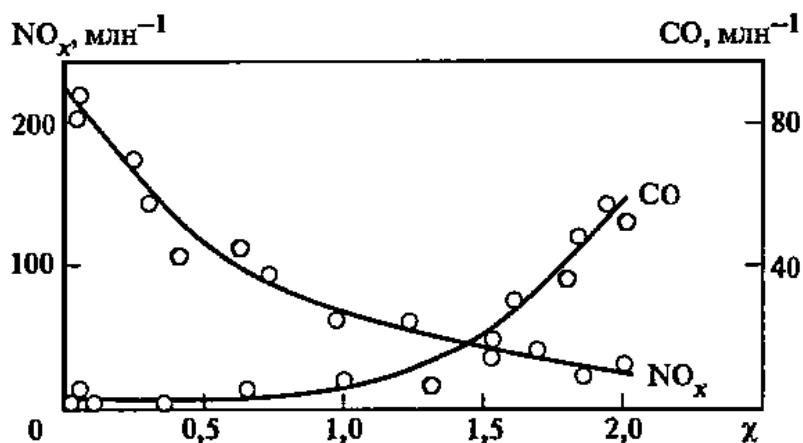
Су немесе бу бүрку кезінде камерадағы қысым пульсациясының амплитудасының ұлғаюына әкелуі мүмкін, осылайша Дженерал Электрик фирмасының мәліметтері бойынша  $G_B/G_T = 1,0 \div 1,5$  пульсацияның амплитудасы 1,2-1,5 есе өседі (2-сурет). Алайда табиғи газды жағу кезінде MS-7001E қондырғысының жану камераларында  $\text{NO}_x$ -ті төмендету мақсатында буды бүрку бойынша өнеркәсіптік тексерулер  $G_{\text{пар}}/G_T = 1,0$  амплитудасы қысым тербелісінен едәуір өскен жоқ, ал  $\text{NO}_x$  концентрациясы 3,0 - 3,5 есе азайған. Буды бүрку бугаз қондырғысына қарағанда ГТҚ-да пайдаланған неғұрлым қолайлы болып табылады, өйткені қосымша ыстық суды немесе буды өңдеуге мүмкіндік береді.



1-3 жағу режимдері: 1-бусыз; 2-3-будың берілісі

### 1.1-сурет - $N$ жүктемеге байланысты ГТҚ-ның жану өнімдеріндегі $NO_x$ құрамына бу берілуінің әсері

Алайда бу бүркудің бірнеше кемшіліктері бар, олар: жұмыс денелерінің арақатынасының елеулі өзгеруі, бұл ағынның бойлық қимасының ұлғаюын немесе жұмыс денесінің жылдамдығын арттыруды талап етеді. Жылдамдықты арттыру ПӘК-тің азаюына әкеліп соғады. Буды бүрку жанудың қарқындылығы мен толықтығының төмендеуіне әкелуі мүмкін, бұл көмірқышқыл газының шығарылуын арттырады. Сонымен қатар буды бүрку: жану камерасында діріл жұмысының ықтималдығын арттыру, қарқынды тоттану. Бұл мәселе тоттануға қарсы қоспаларды енгізу жолымен шешілсе де, қысқы пайдалануды қиындату, тазартылған су шығынын ұлғайту, дірілдің ұлғаюы, тұрақты жану диапазонының тарылуы, күрделенуі және тиісінше схеманың қымбаттауына әкеліп соғады.



### 1.2-сурет – Жану камерасынан шығатын $NO_x$ және $CO$ шығысына су буының берілуінің әсері ( $\chi = V_{пар}/V_{топл.}$ )

### 1.2.2 Жану өнімдерінің рециркуляциясы

Жану өнімдерінің рециркуляциясы кеңінен танымал және бұрыннан қолданылатын технология болып саналады. Әдістің мағынасы жанудың инертті өнімдерін бастапқы жану аймағына қайтару болып табылады. Азот тотығының түзілуі екі процесс есебінен төмендейді:

- жану аймағындағы газдардың ең жоғары температуралық деңгейін суық газдармен араластыру жолдарының төмендеуі
- жану өнімдерінің қатысуынан әсер ететін заттардың (оттегінің) концентрациясының төмендеуі.

Келтірілген процестердің әрқайсысының әсер ету дәрежесі рециркуляцияға қатысатын газдардың санына байланысты. Алайда, азот оксидтерінің белгілі азаюына салқындатылған газдарды беру кезінде қол жеткізуге болады.

Рециркуляция әдісінің жақсы жақтарының біріне оның қарапайымдылығы мен 30-35% - ға дейін жете алатын азот оксидтерінің шығарындыларының жоғары деңгейін жатқызуға болады. Осы әдісті қолдану кемшіліктерінің бірі, азот оксидтерінің және СО түзілуін төмендету болып табылады.

Сонымен қатар, бұл әдіс ГТҚ-ның негізгі жану камераларында іске асыру өте қиын, себебі конструкция айтарлықтай күрделене түседі және жоғары емес қысымы бар төмен температуралы жану өнімдерін беруге арналған қосымша шығындар екені сөзсіз, бұл жалпы газтурбиналық қондырғының қуаты мен ПӘК құлдырауына алып келеді.

### 1.2.3 Ауаны оңтайлы бөлу

Азот оксидтерінің ең жоғары деңгейі  $\alpha=1,0-1,1$  диапазонында тұрғанын ескере отырып, ол 2000 К температураға сәйкес келеді, бұл қоспаның байытылуы отынның жанасуына, температураның төмендеуіне және түтіндеуіне әкеледі. Ауаның артық көбеюі, яғни қоспаның "азаюы" температураның төмендеуіне және азот оксидтерінің түзілуінің төмендеуіне әкеледі, алайда турбина төмен жүктемеде жұмыс істейтін жағдайларда, қоспатым" кедей" болады, және бұл СО көміртегі оксидтерінің және канцерогендік заттардың түзілуінің өсуіне әкеледі.

Кейбір нәтижелер бастапқы жану аймағындағы ауаның артық артуы азот оксидтерінің түзілуін төмендетуге мүмкіндік беретіндігін көрсетеді. Алайда бұл жанудың толық емес ұлғаюына байланысты СО және СН түзілуінің артуына әкеледі. Бұл факторлар зиянды заттардың жиынтық концентрациясының мәндеріне әкеледі. Осы факторлармен қатар турбиналардың іске қосу сипаттамалары төмендейді.

Бұл эксперимент көрсеткендей,  $\alpha$  оңтайлы мәні жақсы нәтижелерге әкеледі. Азот оксидтерінің концентрациясы  $\alpha=1$  кезінде максималды және артық ауаның ұлғаюымен біртіндеп азаяды. Ал СО және НС шоғырлануы кең ауқымда өсетін "кедей" үзілу шегіне дейін айтарлықтай өзгермейді.

Сондай-ақ, пайда болу СО реакцияларының салдарынан НС-ның пайда болу ерекшеліктері байқалады. Жану камерасының бастапқы аймағында қоспаны дайындау қарастырылады. Бұл әдіс азот оксидтерінің түзілуін төмендетудің ең қарапайым және тиімді тәсілі ретінде қарастырылады. Дегенмен, ағынның бұрылуы қоспалардың қарқындылығын арттырады деген пікір таралған, бірақ тәжірибеде оның азот оксидтерінің түзілуіне әсері бірдей емес. Эксперименттер келесі нәтижелерді көрсетеді:

- ыстық газдардың суық қоспамен араласу қарқындылығы, жану аймағындағы орташа температураны төмендетеді, бұл термиялық азот оксидтерінің пайда болу жылдамдығын азайтады;

- термиялық азоттың пайда болу жылдамдығының жоғарылауына ықпал ететін екінші қоспа түзілу аймағында жергілікті температуралардың өсуі;

- оттегінің жергілікті шоғырлануының артуы термиялық азоттың пайда болу жылдамдығының артуына ықпал етеді.

Осы үдерістердің әрқайсысының әсер ету дәрежесі нақты жағдайларға байланысты, сондықтан кез келген жағдайда соңғы нәтиже әртүрлі болуы мүмкін.

Егер көлденең құйындарға қосымша тұрақтандырғыштың артынан бойлық құйын ағыстарын ұйымдастырса, рециркуляциялық аймақта араластыру одан да күшейе түседі.

#### *1.2.4 Қоспалардың түзілуін интенсификациялау*

Жану камераларында қоспалардың қарқындылығы оңтайлы отын-ауа қоспасының пайда болу уақытын қысқартады. Бұл процесс отынның "бай" шоғырлануы бар жергілікті аймақтардың пайда болу ықтималдығын төмендетеді. Сол сияқты алаудың ұзындығы да қысқарады. Бұл әдіс жоғары температура аймағында газдың қысқа болу уақытын қамтамасыз етеді. Негізгі саптамалардың тікелей бұрышында орналасқан қосымша шүмектер жану камераларында бар. Бұл жағдайда отынның бір бөлігі төменгі бөліктен жану аймағына беріледі, бұл қосымша қозғалыс жасайды және отынды ауамен араластыру процесін жақсартады.

### **1.3 Азот оксидтерінің түзілуін басудың конструктивтік әдістері**

$NO_x$  түзілуін басудың негізгі конструктивтік әдістеріне мыналар жатады:

1. Сатылы жану камералары;
2. Өзгертін геометриясы бар жану камералары;
3. Каталитикалық жану камералары;
4. Алдын ала дайындалған "кедей" қоспасын жағу.

### 1.3.1 Сатылы жану камералары

Сатылы, көп сатылы жағу немесе аймақтық жану кеңінен танымал әдіс болып табылады. Әдіс принципі дискретті аймақтарда жануды бөлу болып табылады. Әдетте екі аймақ болады, яғни бастапқы және екінші аймақ. Үшаймақтық жану әдістерін де атауға болады. Аймақтардың радиалды, осьтік және округтік орналасу әдістері бар. Мысалы, жұмыста екі аймақ – пилотты, ол осьте орналасқан және пилоттың айналасында аксиальды орналасқан негізгі аймақ. Сатылы жану ауа беруді немесе отын беруді қамтамасыз етеді. Қоспа құрамдарының таралуына байланысты жану камераларының схемалары келесідей бөлінеді:

- «бай-кедей»;
- «кедей-кедей».

Бірінші жағдайда бірінші аймаққа ауа жетіспеушілігі бар отын беріледі ( $\alpha=0,3\div 0,7$ ), жану шарты температураны төмендетуге және бос оттегінің мөлшерін азайтуға мүмкіндік береді, бұл NOx түзілуін қысқартады, сондай-ақ алаудың ұзындығы мен жарығын арттыруға мүмкіндік береді. Жанғаннан кейін, жақсы араласқан (гомогенделген) қоспа екінші аймаққа түседі, онда ауа артық беріледі ( $\alpha=2\div 2,5$ ). Жанудың екінші аймағында азот оксидтерінің түзілуіне бірінші аймақта ауаның артық болуы қатты әсер етеді. Ауа артықшылығының оңтайлы мәні  $\alpha=0,8\div 0,8$  болып табылады. Жұмыста азаматтық авиация ұшақтары үшін сатылы жану камераларымен эксперимент жүргізілді. Эксперименттің мақсаты жану параметрлерін және зиянды заттардың шығарылуын анықтау болды. Бұл жұмыста жану камераларының "кедей-кедей" жануы қолданылды. Сондай-ақ жану симуляциясы жүргізілді және экспериментпен салыстыру үшін азот оксидтерінің шығарылу нәтижелері айтылды. Олардан келесі нәтижелер алынды:

- сатылы жағу камерасы 0,0049 отынға, ауаға қатысты оңай тұтануы мүмкін, бұл "кедей" шегінің өте төмен мәні туралы айтады;

- Халықаралық Азаматтық авиация Ұйымының Қоршаған ортаны қорғау жөніндегі авиациялық комитетінің талаптарымен салыстырғанда CO және HC тастамасы 70% - ға дейін төмендетілді және 40% - ға дейін азот оксидтерінің тастамалары төмендетілді;

- азот оксидтерінің одан әрі 50% - ға дейін төмендеуі мүмкін.

Мақалада сатылы жағу қолданылатын "құйынды тұзағы бар жану камералары" деп аталады. Осы жұмыста, жану камералары пилоттық және негізгі болып бөлінеді. Пилоттық аймақта жалын тұрақтандыруға қажетті газдардың рециркуляциялық аймағы құрылады. Жану камераларында бастапқы ауаның бір бөлігі отын берілетін және жеке ауа берілетін арнайы қуысқа бұралады. Жұмыстың мақсаты жану камераларында оңтайлы режимде жұмыс істеуге мүмкіндік беретін ауа мен отынның арақатынасын анықтау болып табылады. Бұл әдіс азот оксидтерінің тастамаларын азайтуға және отын/ауа қатынасындағы кең ауқымда жұмыс істеуге мүмкіндік береді. Авиациялық фирмалар жану камераларға көп көңіл бөлді, ондағы әрбір саты белгілі бір ұшу және жану режиміне оңтайландырылды. Авиациялық

қозғалтқыштарды айырбастаудың бүгінгі процестері сатылы жағу процестерін зерттеу үшін жаңа жолдарды ашады. Негізгі аймақта ең жоғары жану қуаты 90% - ға дейінгі режимдерде ауаның артық коэффициенті  $\alpha=1,8$  болғанда аз болу уақыты бар, бұл төмен NOx-ті қамтамасыз етеді.

Екі жану аймағын немесе отынды бөлу жолымен реттелетін бірнеше жану құрылғыларын енгізу жолымен жану камералары конструкцияларының күрделенуі отын мен ауаның оңтайлы таралуын анықтау үшін жеткілікті есептерді талап етеді. Отынды алдын ала араластыра отырып, жанарғы және фронтты құрылғылардың әр түрлі құрылымдарына жүргізілген зерттеулер нақты мақсаттарға жану камераларын оңтайландыруға мүмкіндік бере отырып, отынды ауамен жеткілікті дәрежеде бөлуге мүмкіндік береді. Мұндай камералардың мысалы болып химиялық күйдірілмеген жылу шығынын 2% - ға дейін, ал азот оксиді концентрациясын 10-20 мг/м<sup>3</sup> деңгейінде төмендетуге мүмкіндік беретін жану камералары табылады. Мұндай әдістің кемшіліктеріне мыналар жатады: төмен (номиналды жүктемелерден 20%) жүктемелер кезіндегі тастамалардың жоғары деңгейі, сұйық отынды пайдалану кезінде тастамалардың төмендеу деңгейі, отын беруді реттеу күрделілігі, жану камераларының мөлшерін ұлғайту.

### *1.3.2 Өзгеретін геометриясы бар жану камералары*

Өзгеретін геометриясы бар жану камералары ластаушы заттардың шығарылу проблемасына дейін бұрыннан қаралды. Өзгеретін геометриясы бар жану камералары-бұл азот оксидтерінің ең аз түзілу деңгейіне сәйкес келетін температуралық деңгей мен артық ауа ұстауға мүмкіндік беретін бастапқы және қайталама ауаның реттелетін таралуы бар камералар болып табылады. Бастапқы ауаның күрт төмендеуі кезіндегі реттеу күрделілігі сатылы жануы бар жану камераларының негізгі мәселесі болып табылады. Өзгеретін геометриясы бар жану камералары жиі ұшу аппараттарында қолданылады. Олардың айырмашылығы тартым ұлғайған кезде ауаның едәуір мөлшері азоттың және күйенің оксидтерінің төмен шығарылуын қамтамасыз ету үшін жану аймағының алдыңғы бөлігіне, ал тартым төмендеген кезде жану камерасындағы оңтайлы температуралық деңгейді қамтамасыз ету үшін ауа соңына берілді. Өзгеретін геометриясы бар жану камералары әдеттегі жану камералармен салыстырғанда кең ауқымда жұмыс істеуге мүмкіндік береді. Бұл қондырғының ең қызықты және ерекшеленетін бөлшегі ауа немесе отын беруді реттейтін құрылғы болып табылады. Мұндай құрылғы клапан немесе тармақтағыш болуы мүмкін. Сондай-ақ, ауа немесе отын беруді реттеу өлшемдері өзгертілетін ыстық құбыр арқылы мүмкін болады.

### *1.3.3 Каталитикалық жану камералары*

ГТҚ-ның дамуының қазіргі кезеңінде инженерлердің негізгі мақсаты зиянды заттар шығарындыларының оңтайлы деңгейінде жоғары



температураларда жұмыс істейтін турбиналарды әзірлеу болып табылады. Бірақ жану камерасынан шыққан газ температурасының 1700-1800 0C дейін жоғарылауы кезінде азот оксидтерінің шығарылу деңгейі 80-150 ppm дейін өседі.

Бұл ГТҚ-ның жану камераларында өте қызықты және перспективалы балама жағу технологиясы, яғни  $\text{NO}_x$ , CO және көміртегінің өте төмен деңгейін бере алатын каталитикалық жану болып табылады.

Каталитикалық жану отын/ауа қатынасының кең диапазонында жану камерасында газ қозғалысының дәл осындай жылдамдығында отынның жану температурасын төмендетуі мүмкін немесе жану камерасының температуралық деңгейде жану жылдамдығын арттыруы мүмкін. Бірінші нұсқа азот оксидтерінің түзілуін төмендетуге мүмкіндік береді, екіншісі CO түзілуін төмендетуге мүмкіндік береді, яғни жанудың жоғары деңгейін қамтамасыз етеді. Катализаторлар қосылған кезде жану камералары температураларының біркелкі таралуын қамтамасыз ету мүмкіндігі бар.

Жану камераларында катализаторларды қолданудың екі жолы бар.

Жану камераларының толық каталитикалық жануы бар. Мұндай жағдайларда әдетте бірнеше катализаторлар қолданылады. Біріншісі, өте белсенді "тұтану" катализаторы кірер кезде, ал екіншісі ағыстан төмен тұрады. Мұндай жану камералары алдын ала дайындалған гомогенді қоспаны береді.

Гибридті каталитикалық жану камералары. Мұнда жану камераларындағы жану процестері сатылы түрде өтеді. Бірінші сатыда каталитикалық жанады, ал екінші сатыда гомогенді қоспа жанады. Екінші сатыда жану температурасы өте төмен, бұл  $\text{NO}_x$  түзілуін төмендетеді. Сұйық отында каталитикалық жану камерасының жұмыс істеу принципі жұмыста сипатталған. Отын буланатын, араласатын және каталитикалық торға берілетін дайындық аймағына беріледі. Катализатордың бірнеше сатылары жану камераларында орын алады. Катализаторлардың саны жану камераларының өлшемдері мен талаптарына байланысты. Катализатордан кейінгі катализаторда бастама болған жылу реакциялары аймағы көзделеді. Жану камераларының маңызды элементтерінің бірі катализаторлар болып табылады. Олар жоғары температураларда және қолайсыз ортада ұзақ жұмыс істеу кезеңіне төзуі тиіс. Катализатордың материалы үйкелуге кедергі қасиетіне ие болуы тиіс. Қысымның аз шығындалуын қамтамасыз ету қажет. Катализатор жақсы көрсеткіштерді қамтамасыз ету үшін жеткілікті ұзақ уақыт кезеңде белсенді болуы тиіс.

Жану катализаторы келесі элементтерден тұрады: Төсеніш немесе тірек конструкциясы, жуылатын жабынды және белсенді компонент.

Төсем катализатордың механикалық орнықтылығын қамтамасыз етеді, жуылатын жабын белсенді компоненттің орналасуы үшін қамтамасыз етеді. Төсенішке арналған материалдар әдетте керамикадан немесе металдан жасалады. Жуылатын жабыны әдетте алюминий, цирконий, кремний сияқты металл оксидінен жасалады.

Қолданылатын катализаторлар үш топқа бөлінеді:

- бағалы металдар - платина,родий;
- сирек кездесетін элементтер – хром,кобальт;
- лантан және цезий тотықтары.

Каталитикалық жану камерасы бар ГТҚ-ларды өнеркәсіптік қолдану 2000 жылдардың басында басталды. XONON -каталитикалық жүйесі бар танымал ГТҚ Калифорниядағы Кавасаки M1A-13X болып табылады. ГТҚ-ның 8000 сағат жұмысы және  $NO_x < 3 \text{ppm}$ ,  $CO < 6 \text{ppm}$  эмиссиясы бар. Siemens, Alstom, General Electric компанияларының каталитикалық жану камералары бар ГТҚ-лары белгілі.

Жұмыс барысында гибриді каталитикалық жану камераларын пайдалану кезінде азот оксидтерінің шығарындыларын едәуір қысқартуға қол жеткізілді.  $\varphi=0,34$  (0,33) кезінде Rover 60/65 ВНР қозғалтқыш шығарындылары 38 г/кг отын құрады, ал 400 ұшықтан катализаторды пайдалану кезінде шығарындылар 0,03 г/кг отынды құрады. Барлық қалған негізгі зиянды заттардың шығарылу деңгейі де айтарлықтай азайды.

CATHLEAN (CatalyticHybridLeanBurner) – "каталитикалық гибриді кедей жанарғы" схемасы қолданылған жұмыс өте қызықты көрінеді. Жұмыста зиянды заттардың шығарылуын төмендетуге мүмкіндік беретін каталитикалық жанарғы ұсынылды. Эксперимент нәтижелері 1.1-кестеде келтірілген.

### 1.1-кесте – Эксперимент нәтижелері

Жұмыс күйі	Катализаторсыз	Катализатормен
Катализаторға кірген температура, К	690	690
Катализатордан шыққан температура, К	-	1160
Жалынның адиабаталық температурасы, К	1779	1779
$NO_x$ , ppm	4,1	3,0

1-кестенің мәліметтеріне сүйене отырып, камераның жұмыс режимінде азот оксидтерінің шығарындыларын 25% - ға төмендетуге қол жеткізілді. 1620К режимінде 1,9-дан 1,0-ге дейін төмендеді, бұл 45% - ға тең. Бұл осы әдістеменің үлкен потенциалы туралы айтады. Жұмыста атмосфералық қысым кезінде, яғни жұмыс жүргізу кезінде катализатордың жұмысы кезінде "кедей" үзілу шегінің онсызда аз мәні бар екені анықталды. Зиянды заттардың пайда болу орны болып табылатын пилоттық аймақ өзгерген кезде  $NO_x$  тастамаларының төмендеуін күтуге болады. Қуаты 150 МВт американдық Pastoria ЖЭС Американың Калифорния штатында орнатылғаны белгілі. Онда каталитикалық жану камераларымен жабдықталған екі ГТҚ орнатылған. Турбинаның CO мен  $NO_x$  тастамалары 25 ppm, ал стандартты жүктемелерде 6ppm –нен аз. Катализатордың кепілді қызмет мерзімі 8 мың

сағат. Каталитикалық жағуды бірінші қолданған кезде температурасы 1470-1570 К, ал қысым 15,5-ке және ауа шығыны 432 кг/с тең.

Әр түрлі катализаторларды сынау материал түрімен қатар катализаторды орындау маңызды рөл атқаратынын көрсетті. Арнайы матрицалар мен торлар түрінде катализаторлық аймақтың тиімді орындалуы жоғары сенімділікті көрсетеді. Әдебиетте автомобильдік ГТҚ-ның жану камералары жағдайында платина катализаторы бар торлардың бірнеше түрін сынау нәтижелері сипатталған. Каталитикалық аймақтың өлшемдері: ұзындығы 76,2 мм болатын диаметрі 102мм, ол Катализдің бетін шамамен 1,3 млн.мм<sup>2</sup> және тордың алдындағы температураны 417 °С қамтамасыз етеді. Азот оксидтерінің бөлінуі 0,5 г/кг құрады.

Алайда, осы типті камералардың басқа сипаттамалары бойынша оларды газтурбиналық қондырғылар мен газтурбиналық қозғалтқыштар қолдануға мүмкіндік беретін кемелдікке дейін жеткізілмеген. Осылайша, жану өнімдерінің ортасында катализаторлардың ұзақ белсенділігін сақтау, оларды діріл жүктемелерінен, температуралық градиенттерден, әсіресе ауыспалы режимдерде және т. б. қорғау мәселелері шешілмеген. Катализ аймағына түсетін қоспаның гомогенизациясы, сондай-ақ іске қосудың күрделенуі де белгілі бір қиындықтар тудырады. Дегенмен, олардың көмегімен зияндылық мәселелерін түбегейлі шешудің принципті мүмкіндігі күш-жігерді ақтайды.

Теріс жақтардың біріне, авторлар катализатордың қызып кету қаупін тудырады. Сондай-ақ, қысымның төмендеуін төмендету үшін катализатордың аэродинамикалық сипаттамаларын жақсарту және ескіртуді азайту қажет. Осы технологияның кемшіліктеріне де жатқызуға болады:

- каталитикалық материалдар жұмысының шектеулі ресурсы;
- жоғары баға;
- катализаторда тотығуды қамтамасыз ету үшін оттықтардың қажеттілігі;
- жүктеме өзгергенде төмен маневрлік;
- конструкциялардың күрделілігі;
- жану камерасындағы газдардың рециркуляциясы кезіндегі жұмыстың күрделілігі.

#### *1.3.4 Алдын ала дайындалған "кедей" қоспасын жағу (гомогенді жану камералары)*

ПБС жағу кезінде отынды ауамен араластыру процесі олардың жану аймағына келіп түскенге дейін жүзеге асырылады. Отынның гомогенизациясы температураны төмендетуге ғана емес, сонымен қатар араластырылуын жақсартуға мүмкіндік береді, бұл азот оксидтерінің пайда болуына себеп болып табылатын жоғары температуралардың жергілікті көлемінің түзілуін төмендетеді. Жұмыс нәтижелеріне қарағанда, азот оксидтерінің тастамаларын барынша төмендетуге гомогенді жану

камерасында алдын ала "азаюмен" ТВС қол жеткізуге болады. Оның себебі диффузиялық жану кезінде жоғары температураның жергілікті көлемі түзіледі, олардың себебі газдардың бастапқы ауамен араласуының жеткіліксіздігі болып табылады. Жұмыста оттықтардың EV (Environmental) – Alstom жұмысына талдау жүргізілді. Оттықтардың бұл түрлері жақында ғана қолданылды. Оттықтардың осы түрінің ерекшелігі – бұл жану камерасына берілгенге дейін ТВС араластыру. Жанарғы екі конустан тұрады, олардың арасында газды бастапқы ауамен араластырады. Бұл спецификалық пішін, жанарғы жақсы араластыруды қамтамасыз етеді, осылайша қоспаның гомогендігін арттырады, бұл жоғары температуралардың жергілікті көлемінің түзілуін азайтады және жанудың тұрақтылығын жақсартады. Жалынның тұрақтылығы жанарғыдан шығуда құйынды бұзумен ұсталады.

Эксперимент нәтижелері бойынша жұмыста жану камералары шығу кезінде 1000 °С температурада жұмыс істейтін ГТҚ-да ППБС технологиясын қолдана отырып, NO<sub>x</sub> тастамаларын 116-тен 63 ppm-ге дейін төмендетуге қол жеткізілді, бұл 45% - ға тең. Жұмыста алдын ала араласу жану камерасынан шығудағы температуралық профильді тегістейді және ГТҚ жұмысының сенімділігін жақсартады деген ақпарат келтіріледі. Сатылық өртеу және ППБС қолдана отырып, NO<sub>x</sub> пайда болатын төмен жүктеме режимдерін кеңейтуге қол жеткізуге болады.

ВТИ-да сыналған жану камераларының конструкцияларын алдын ала араластыру нұсқалары, алдын ала араластыру жанарғылары ( $V_{\text{диф}} = 5-7\%$ ), таза диффузиялық жағудан өткен кезде  $ek=1100^{\circ}\text{C}$  режимдерінде ток шоғырлануының 4-5 есе төмендегенін көрсетті.

Гомогенді жану камералары негізгі қиындық ауыспалы режимдерде немесе ауа жеткіліксіз болған кезде аз тарту режимдерінде тұрақты алауды қамтамасыз ету болып табылады. Азот оксидтерінің пайда болу кинетикасы мен жану процестеріне жүргізілген талдаудан NO<sub>x</sub> түзілуінің түбегейлі төмендеуін қамтамасыз ету үшін ауаның артық коэффициенті  $\alpha=2,4-3,0$  кезінде ТВС толық немесе ішінара араластыру қажет екені анық. Отынды ауамен араластыру процесі әр түрлі тәсілдермен ұйымдастырылуы мүмкін, мысалы, жану құрылғысында немесе екі зоналы жану камераларының жағдайларында, алдын ала камераларда.

Мұндай схемаларды іске асыру кезінде маңызды мәселе алдын ала дайындалған ТВС жағу кезінде диффузиялық жанумен салыстырғанда, алаудың тұрақты жану диапазоны өте төмен.

Гомогенизация кезінде, сондай-ақ жану камерасында жалын жарылу қаупі бар. Отынды ауамен алдын ала араластыру азот оксидтерінің шығарылу деңгейі өте төмен жану камерасына тән.

Сондай-ақ, бұл әдісті іске асыру арнайы жанарғыларды қоспағанда, сыртқы қоспа түзетін құрылғыларды пайдалану қажеттілігімен байланысты, бұл көп режимді ГТҚ үшін едәуір техникалық қиындықтарды тудырады және "кедей" қоспаларда жану камераларының сенімді және тұрақты

жұмысын қамтамасыз етуді талап етеді. Сондай-ақ, жалынның секіру қаупі мен араласу аймағында күйіктің пайда болу қаупін атап өтуге болады.

Қазіргі заманғы жану камералары келесі көрсеткіштерге ие болуы тиіс:

- отынның толық жануының жоғары коэффициенті;
- шағын гидравликалық қысымның шығындары;
- жұмыс көлемінің жоғары жылу сыйымдылығы
- турбинаның сенімді жұмысын қамтамасыз ету үшін жану камерасынан шығатын температуралардың біркелкі болмауы
- жедел және сенімді іске қосылу
- конструкциялардың беріктілігі
- түтін, күйік және улы заттардың болмауы

Жоғарыда көрсетілген көрсеткіштерді барынша толық орындайтын технологиялық микрофакельді жағу принципі болып табылады. Осы принципті және оның базасындағы шешімдерді қарастырамыз.

## **2 Жағу және құрылғының микрофакельді әдісі**

Жану камераларының заманауи әдістері мен құрылымдарына жүргізілген талдау оларға негізгі талаптарды талдауға және қоюға мүмкіндік береді. Қазіргі заманғы газ турбиналарының жану камералары келесі критерийлерге сәйкес келуі тиіс:

Отынның толық жануының жоғары коэффициенті. Заманауи жану камералары  $\eta_c = 98 \div 99\%$  болу керек;

қысымның шағын гидравликалық шығындары;

жану камерасынан шығатын температуралардың біркелкі болмауы турбинаның жұмысын сенімді түрде қамтамасыз етеді;

жылдам және сенімді іске қосылуы. Барлық жүктеме диапазоны бойынша тұрақты жұмыс;

конструкциялардың беріктігі және жоғары сенімділік

түтін, күйік және зиянды заттардың болмауы;

Микрофакельді құрылғылардың жануының әр түрлі тәсілдері мен принциптерін талдау микрофакельді жағу ерекшеліктерін көрсетеді, ол жоғарыда көрсетілген жану камераларына қойылатын талаптарға барынша сәйкес келеді. Микрофакельді жанудың жану аймағында әр түрі болады.

Әр түрлі құрылғыларда азот оксидтерінің пайда болуының негізгі себептерін және энергетиканың даму перспективтерін талдау отынды жағудың дәстүрлі тәсілдері талап етілетін параметрлерді қамтамасыз етпейді. Отынды жағу тиімділігін арттыру микрофакельді жану кезінде қолдануға болады.

Жану камерасында микрофакельді жағуды қолдану бойынша эксперименттік анықтаулардың шектеулі көлеміне қарамастан, әр түрлі авторлар осы әдістің келесідей оң сапасын белгілейді: газ арынның төмен шығыны, конструкциялардың өлшемдерін азайту, жану камераларынан шығатын температуралық өрістің төмен әркелкілігі, жану өнімдерінен шығатын азот оксидтерінің төмен көрсеткіштері, радиациялық шығынды азайту.

Жиырмамыншы ғасырдың ортасынан белгілі бола бастаған микрофакельді жағу технологиясы жақында ғалымдар назарын аударып бастады. Қазіргі уақытта микрофакельді жағудың бірнеше негізгі бағыттары бар, бірақ барлығында бір ортақ нәрсе – бұл фронт және жану көлемі бойынша факелді "тұтату" болып табылады.

### **2.1 Микромодульді жану камералары және оттықтар**

NOx тастамаларын төмендетуге сәйкес  $\alpha I > 1,6 \div 1,8$  бастапқы ауасы артық кезде от жағу процесін жүргізуге және жану камераларының фронт бөлігіндегі қоспалардың қарқындылығын қамтамасыз етуге қол жеткізуге болады. Мұндай талаптарды орындау жану аймағындағы жергілікті ең жоғары температураны төмендетуге және оларды факелдің орташа

температурасына жақындатуға және отынның жану уақытын едәуір қысқартуға мүмкіндік береді. Белгілі ALSTOM компаниясының жану камералары көп оттықтарды қолданады. Осы оттықтарды пайдалану кезінде ГТҚ-ның NOx тастамалары 15 ppm аспайды. Егер ГТҚ АВ GT10 (23 МВт) тек 18 оттық болса, онда АВ GT 13 E (>150 МВт) екі айналмалы қатар түрінде орнатылған 72 оттық болады.

GeneralElectricLM6000 газ турбиналарының оттықтары белгілі. Осы фирма шығарған жану камералары екі сақина түрінде орындалған. Сыртқы екі сақинада 60 фронт, ал ішкі сақинада 15 орнатылған. Сақиналардың осылай орналасуы ішінара жүктеме кезінде жұмысты жеңілдетеді. LM6000-PD турбиналарының 50 МВт қуат кезінде 25 ppm-ге жақын NOx тастамалары бар.

Қазіргі кезде DLE технологиясы кеңінен танымал. DLE жүйесінде NOx пен CO аз пайда болатын отын мен ауаның "алдын ала араластырылған қоспасы" жағылады. "Біріктірілген қоспаны алдын ала араластыру" жүйесінде CO түзілуі қоспаның "араласуы" салдарынан жалын жарылу жағдайына дейін жақындайды да салыстырмалы түрде төмен болып қалады. Бұл жүйеде NOx және CO шоғырлануы газдың ауаға және тар диапазондағы жалын температурасының ара қатынасын ұстап тұру жолымен бақыланады, онда тұрақты жану тастамаларының төмен деңгейінде сақталады.

NASA - ның көп оттықты құрылғыларды зерттеу жұмыстары қызықты. Микрофакельдің шартты түрде "Пратт-Уитни" қозғалтқыштары үшін әзірленген 120 модульді сақиналы жану камераларын жатқызуға болады. Әрбір модуль араластырғыштан, дірілдеткіштен және тұрақтандырғыштан тұрады. Осы жану камераларының анықтамалары алдын ала және екінші араласу дәрежесімен қамтамасыз етілетін алаулардың ең аз ұзақтығы азот оксидтерінің түзілуін төмендететінін көрсетті. Камераны сынау кезінде NOx концентрациясының көрсеткіштері әдеттегі камерадан екі есе төмен болды. Мұндай жану камералардың минусы зияндылығы аз жұмыстың концентрациялық диапазоны болып табылады.

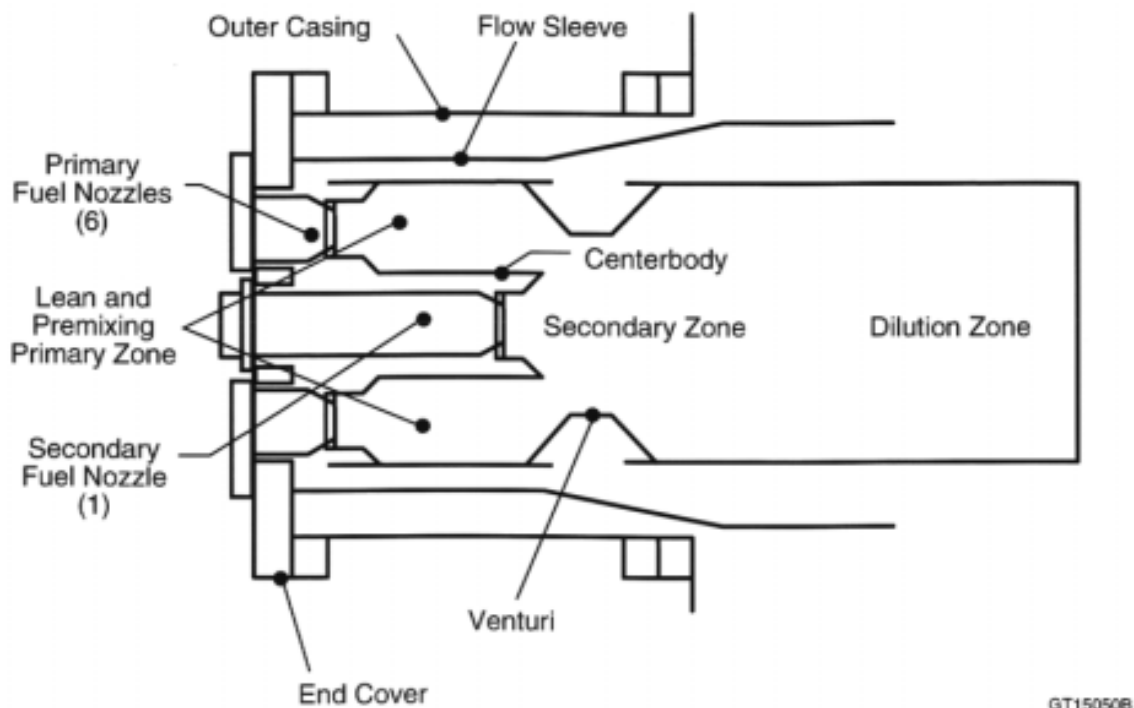
Мұндай жану камералар GeneralElectricLM6000-тың жану камераларына ұқсас. Тек NASA-ның жану камералары сақиналардың орнына ярустарды пайдаланады. Төмен жүктеме кезінде тек сыртқы қабаттың оттықтары, ал толық оттықтар жұмыс істейді. NOx тастамаларында ярустарды (сақиналарды) қосудың сатылылығы ғана емес, сонымен қатар отын/ауа арақатынасы да әсер ететінін атап өтуге болады. Жану камераларында осындай атқарудың ең кемшілігі-ярустарды (сақиналарды) ауыстырып қосу қажеттігіне байланысты жүйенің күрделенуі болып табылады. Сондай-ақ, мұндай жүйелер модульдер мен құбырлардың зиянды үрдісі, модульдерді іске қосу қиындығы және мұнай отындарында жұмыс істеу кезінде бір режимнен екіншісіне ауысу кезінде динамикалық сипаттамалардың нашарлауы байқалады.

General Electric компаниясы DLN (Dry Low NOx)деп аталатын жану камераларын және фронттық құрылғылардың жаңа түрлерін ұсынды.

Мұндай жүйелерді әзірлеу өткен ғасырдың 70-жылдарында басталды. Онда азот оксиді эмиссияларының ең аз мәндері 15%, ал  $O_2$  кезінде 70 ppm жетті.

DLN-1 жүйесі бар жану камерасының жалпы сұлбасы 2.1-суретте келтірілген.

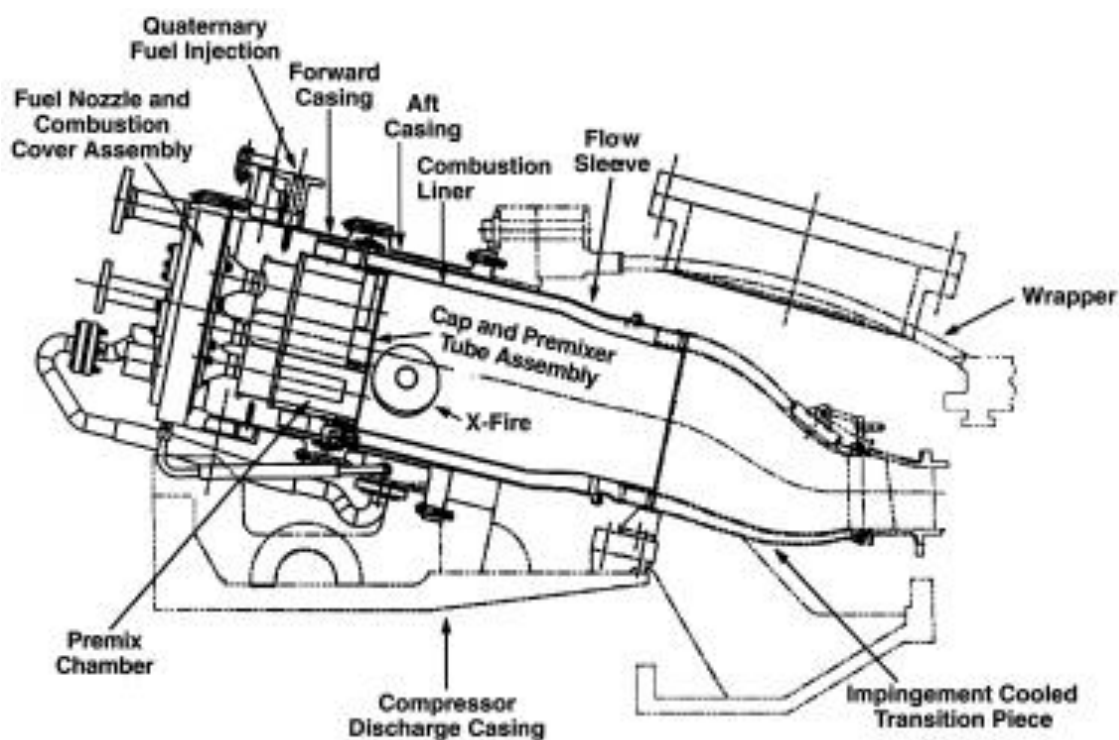
Жүйе негізгі және екінші форсункалық құрылғылардан тұрады. Жану жүйенің тиісті бөліктерінде өтеді. Отын форсункаларға тиісінше 70-пен 30 қатынасында беріледі. Алайда бұл сан газ турбинасына түсетін жүктемелерге байланысты өзгереді. Айта кетер болсақ, форсункалы құрылғылар мен жану аймақтарының әртүрлі комбинациялары болады.



**2.1-сурет – DLN-1 жүйесі бар жану камерасының принципиалды көрінісі**

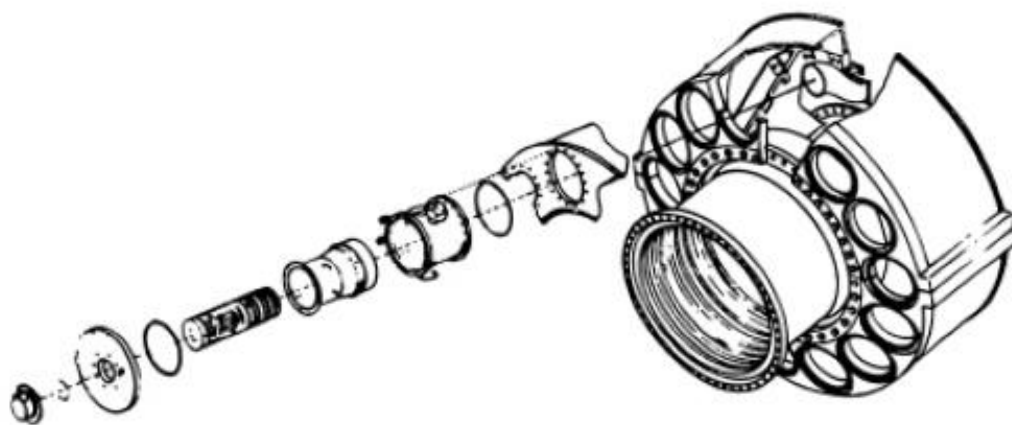
Жану камерасының осының айналасындағы DLN-2 жүйесі радиалды орналасқан бес форсункадан тұрады. Мұндай жүйе 50 ppm дейін азот оксидтерінің эмиссиясын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Жану камерасының оттығы бар DLN-2 жүйесінің жалпы көрінісі 2.2-суретте келтірілген.





**2.2-сурет – Оттығы бар жану камерасының DLN-2 жүйесінің бойлық қимасы**

Қазіргі заманғы DLN жүйелері көп нұсқалы орындалған жану камерасы болып табылады. Мұндай камералар белгілі бір режимдерде 9 ppm дейін азот оксидінің эмиссиясын қамтамасыз ете алады. Оттығы бар жану камерасының жалпы түрі 2.3-суретте келтірілген.



GT1856

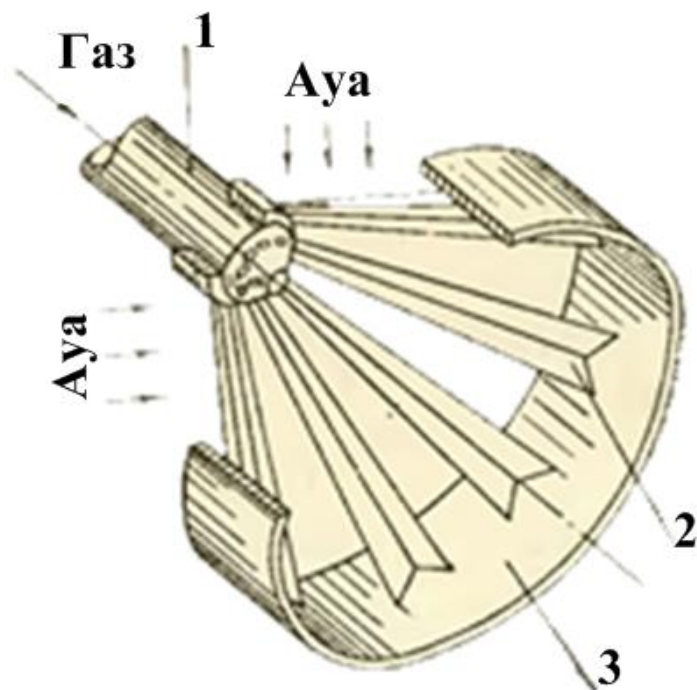
**2.3-сурет – Микромодульді форсункасы бар жану камерасының жалпы түрі**

Микромодульді конструкциялардың кемшіліктеріне отын жеткізу жүйелерінің күрделілігін, технологиялық ауытқулардың жану

камераларының жұмысына үлкен әсерін жатқызуға болады, бұл турбина алдындағы температуралық өрістің біркелкі еместігіне әкелуі мүмкін. Сондай-ақ, ТВС алдын ала араластыру жалын секіру ықтималдығының артуына және тұрақты жұмыс ауқымының қысқаруына әкеледі.

## 2.2 Жағудың ағынды-тұрақтандырғыш әдісі

В. А. Христичтің авторлық ұсынысы бойынша Киев политехникалық институтында газ бен ауаны бөлек беретін газ жанарғыларының бірегей конструкциясы құрылды. Мұндай оттықтардың ерекшелігі, ол газ бен ауаны бөлек беру кезінде алдын ала араластыру оттықтары сияқты қысқа және мөлдір алауды қамтамасыз етеді және сонымен қатар бір мезгілде алаудың өте жоғары тұрақтылығына ие, ол алдын ала араластыру оттықтарына қарағанда жоғары. Газ жанарғының принципиалды сұлбасы 6-суретте көрсетілген. Оттықтардың негізгі бөлшектері газ форсункалары және бандажға дәнекерленген бұрыштық тұрақтандырғыштардан жасалған тұрақтандырғыш құрылғы болып табылады. Тұрақтандырғыштар радиусы бойынша орналасады және  $45^\circ$  бұрышпен оттықтың бойлық осіне жатқызылған, сондықтан тұрақтандырғыштар жүйесі  $90^\circ$  ұшында толық конустың түрі болады. Газ форсункасы тұрақтандырғыш құрылғының ортасында орналасқан және әрқайсысы тиісті тұрақтандырғыштың артында орналасады, содан оның осінің бойымен дами отырып, жеке ағыстар түріндегі тесіктер арқылы газды береді.



2.4-сурет – Ағынды-тұрақтандырғыш типті газ оттығының принципті сұлбасы

Газ алауларына тұрақтандырғыштарға ағынды газ берілісінің арқасында олардың барлық бойында жоғары турбуленттік өріс салынады. Бұдан басқа, газ ағыстары осы аймақтарға және тұрақтандырғыштың артындағы массаалмасудың жоғары қарқындылығын негіздейтін турбуленттік ауытқулар үлесін сипаттайды. Бұл қоспалардың түзілуі мен жануын қарқындатып қана қоймай, сонымен қатар, оттыққа ауаның артық айнымалы коэффициенттерінің кең диапазонында жұмыс істеуге және азот оксидтерінің төмен эмиссиясына мүмкіндік беретін өзін-өзі реттеудің өзіндік қасиетін береді. Газ шығыны 550 м<sup>3</sup>/сағ ГТҚ-ның жану камерасында ағынды – тұрақтандырғыш әдіс принциптерімен жүргізілген эксперименттер жоғары көрсеткіштерді көрсетті: яғни, ауаның артық коэффициентінің жұмыс диапазоны – 1,2÷20; жанудың толықтығы -99,5%.

Ағынты-тұрақтандырғыш жанатын құрылғының жалпы жану аймағының қатты дамыған жалынының қосынды беті бар және оның камера бойымен ұзындығы аз қарапайым радиалды факелдердің жиынтығы болып табылады, бұл реакция аймағында газдың болу уақытын қысқартады.

Бұл аймақтағы орташа температуралық деңгей тұрақтандырғыштар арасындағы саңылаулар немесе перфорация тесіктері арқылы өтетін артық ауаны тікелей пайдалану арқылы NO<sub>x</sub>-тың қарқынды түзілуін болдырмайтын деңгейге дейін төмендейді. Камераның төмен жылу жүктемелерінде зиянды СО және СН түзілуі қарапайым алауларда қоспа құрамының өзін-өзі реттеу қасиетіне тән ағынды-тұрақтандырғыш әдісіне жол бермейді. Бұл тұрақтандырғыштардың немесе секторлардың артындағы рециркуляциялық аймақтар қуысында оларды дамыту кезінде қарапайым факелдердің ұзындығы отын шығынына тәуелді және камерадағы жалпы артықшылық ауаның артуы кезінде қысқарады:

$$\bar{l}_\Phi = \frac{l_\Phi}{l_{ст}} = \frac{k}{\alpha_0^m}, \quad (2.1)$$

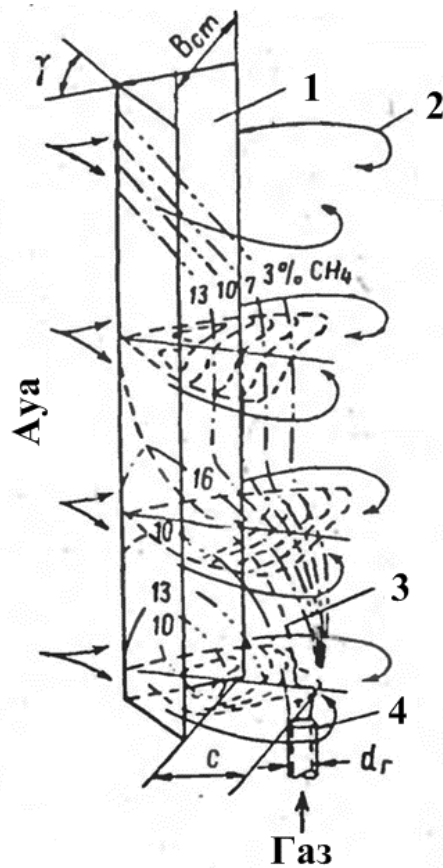
мұндағы,  $k$  алдыңғы құрылғының түріне және онда қабылданған жылдамдықтар деңгейіне байланысты;

$m$  – тұрақтандырғыштар нысанына (немесе секторларға) байланысты.

Жұмыс істеу және жану өнімдерінің төмен зияндылығы осы әдісті қолдану, сондай-ақ түрлі зиянды өнеркәсіптік тастамаларды термиялық залалсыздандыру үшін де перспективті етеді.

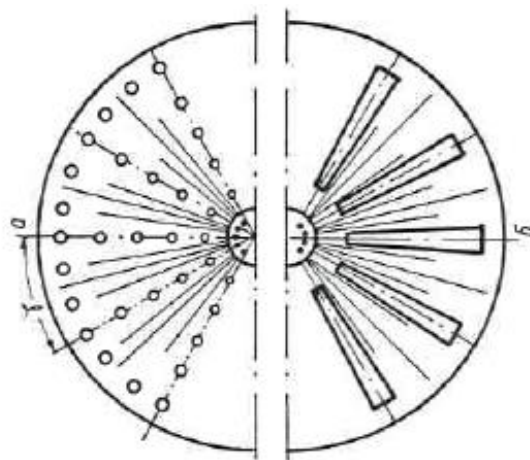
2.5-суретте жанудың ағынды-тұрақтандырғыш тәсілі кезінде бұрыштық тұрақтандырғыштың жану схемасы көрсетілген. Мұндай жақындағанда отын симметрия осі бойымен төменгі жағынан беріледі. Отын симметрия осіне перпендикуляр беріледі.

Жоғарыда айтылғандай, жағуды ұйымдастырудың мұндай тәсілі отынның толық жануы мен азот оксидтерінің төмен тастамалары кезінде жанудың жоғары тұрақтылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.



**2.5-сурет – Ағынды-тұрақтандырғыш жанудың бұрыштық тұрақтандырғыш принципі**

Жанудың ағынды-тұрақтандырғыш типтегі тағы бір оттық мысалы - В. А. Христин пен Любчиктің басшылығымен жасалған. Бұл құрылғы 1 -ден 6,0-ға дейін және одан да көп ауаның артықшылық коэффициентінің кең ауқымында тиімді және тұрақты жұмыс істей алады. 2.6-суретте оттықтың жалпы схемасы келтірілген.



**2.6-сурет - Киев политехникалық университетінің ағынды-тұрақтандырғыш газ оттығы**

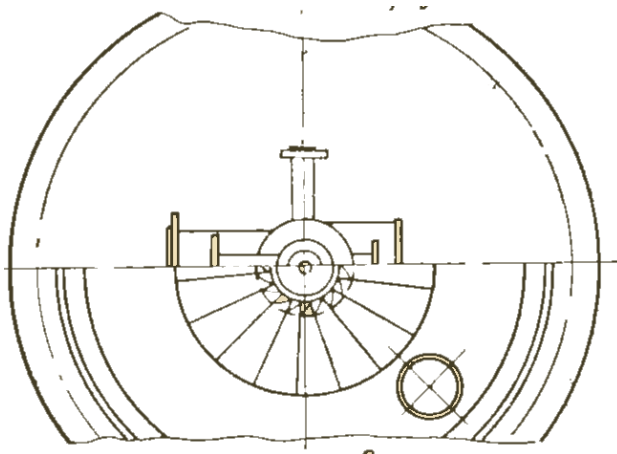
Берілген жанарғы құрамдастырылған принцип бойынша жұмыс істейді, яғни газдың бір бөлігі алдын ала оттықта ауамен араласады, ал қалған бөлігі ауа ағынынан бөлек беріледі. Оттықтың негізгі элементтері-алдын ала ауамен газ араластыруға арналған араластырғыш және оттық құрылғысы. Араластырғыштың кіре берісінде тесілген торы болады. Тордағы тесіктер радиуста орналасқан. Тесіктер арасында ауа ағынына перпендикуляр газ ағыны беріледі. Олар әуе ағынымен бұзылмайды, демек, оның кез келген тереңдігіне кіре алады. Алайда, газды ауамен өте қарқынды араластыру жүріп жатыр.

Араластырғышта әртүрлі диаметрлі үш тесік бар. Осының есебінен газ ағынын берудің әртүрлі тереңдігі қамтамасыз етіледі. Барлық режимдердегі қатарлардың бірі араластырғыш каналының енін жабатын газ ағысын беру тереңдігін қамтамасыз етеді, ал басқаларының беру тереңдігі аз болады.

Газдардың толық жануының, жану құрылғысының қоспалағышпен аралас жұмысы кезінде ауаның артықшылық коэффициентінің диапазонында  $\alpha=1,0\div 3,0$  тиісінше 99-98% құрайды. Ауаның жоғары артықшылығының болуы  $\alpha=3,0$  және одан жоғары режимдерге араластырғышсыз қыздырғыш құрылғымен қызмет көрсетілуі мүмкін. Бұл ретте жану толық 98-96%-ды құрайды. Сынақ кезеңінде бірде-бір режимдерде жалынның араластырғышқа өту құбылыстары байқалмады.

Ағынды-тұрақтандырғыш оттықтарды жасау бойынша орталық қазандық турбиналық институттың жұмыстары белгілі.

2.7-суретте оттықтың түрі келтірілген. Оттықта газды ауамен алдын ала араластыру жүзеге асырылады, ол үшін оттықтың осіне  $42^\circ$  бұрышпен қуыс қалақтар орнатылған. Қалақшалардан шыққан газ кеңістікке ауамен қарқынды араласатын тесіктер арқылы жеке ағыспен шығады.



**2.7-сурет – Ағынды-тұрақтандырғыш типтегі ЦКТИ оттығы**

Мұндай құрылғылардың артықшылықтарына микрофакельді жанудың басқа конструкцияларымен салыстырғанда "кедей" жалынның үзілген шекарасын жылжытатын және жеке кезекші факельдегі қажеттілікті жоятын өзін-өзі реттеу қасиеті, сондай-ақ отындарды құрамдастырылған жағу

мүмкіндігі жатады. Ағынды-тұрақтандырғыш фронтты құрылғылардың өзіндік ерекшелігі микрофакелдермен жұмыстың толық көлемін толтыру болып табылады. Бұл ретте ауаны бастапқы және екінші бөлікке бөлудің қажеті жоқ, бұл камерадағы алау температурасының төмен деңгейін және жануы бойынша азот оксидінің түзілуінің төмендеуін алдын ала анықтайды.

Сонымен қатар, тұрақтандырғыштардың мөлшері мен орналасуында технологиялық ауытқулардың температуралық өрістің округтік біркелкі еместігіне айтарлықтай әсерін атап өткен жөн, із өлшемінің жылдамдыққа күшті тәуелділігі. Сонымен қатар, тұрақтандырғыштың артындағы үзілу аймағында барлық отынның жануын ұйымдастыру мүмкін емес, нәтижесінде алаудың ұзындығы ұлғаяды.

### **2.3 Бұрыштар түріндегі нашар ағулы денелер негізіндегі оттық құрылғылары**

Соңғы өлшем ағымында тұрған нашар ағатын формадағы денелердің аэродинамикасы мен жылу физикасы, турбуленттіліктің олардың ағу заңдылықтарына әсері жұмыстарда неғұрлым толық зерттелген. Нашар ағулы денелерді пайдалана отырып, жалынның тұрақтануы жану камерасында 100 м/с және одан жоғары жылдамдықпен қозғалатын ағындағы тұрақты жану процесін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Сонымен, Киев политехникалық институтының оттықтарының негізіне газ жағудың диффузиялық әдісі қойылған, оны интенсификациялау үшін қоспаның көп ағынды тәсілі және факелге жоғары турбуленттілік өрісін салу қолданылған, ол нашар ағулы дене – тұрақтандырғыштың артынан рециркуляциялық аймақ арқылы генерацияланатын жоғары температуралы өрісті қолдану қолданылған. Төмен ағулы денелердің артқы жиектерінде ағынның үзілуі пайда болады, ал одан кейін-көлемнің осьтік бөлігіндегі төменгі статикалық қысым аймағы, онда жану аймағының шеткі учаскелерінен ТВС-дан араласатын жану өнімдері ұмтылады, оны қыздырады, жағады және тиімді жануды қамтамасыз етеді. Нашар ағулы денелер ретінде пластиналар, өзектер, конустар, бұрыштық V-тәрізді профильдер қолданылады. Жану тұрақтылығы бойынша қолда бар эксперименттік деректердің басым көпшілігі V-тәрізді тұрақтандырғыштармен алынады, өйткені олар көбінесе форсаждық камераларда және жану құрылғыларында пайдаланылады.

Нашар ағулы дене әр түрлі өнеркәсіптік жану жүйелерінде қолданылады. Олар қазандарда тұтану жүйесі ретінде пайдаланылады, сондай-ақ олар ұшақтардың турбореактивті қозғалтқыштарын күйдіру жүйелерінде қолданылады. Одан басқа, олар жану процестерін іргелі зерттеулерде немесе компьютерлік эксперименттерде жиі қолданылады.

Лонгвелл, Пеннер және Вильямс, Меллор, Герберт, Радхакришнан және Озава сияқты авторлар нашар ағулы денелер бойынша ақпаратты зерттеумен және қорытумен айналысты.

Мысалы, Лонгфелло мен Пеннер және Вильямс нашар ағулы денелері бар жану процестері бойынша жеткілікті көп ақпарат жинады. Меллер, Радхаркришнан, Герберт және Озава негізінен Дамкелер санының тұрақтандыру процесіне ықпалын жасады.

Нашар ағулы денелердің айналасында сұйықтықтың жанғыш ағынын өлшеу жүргізіледі. Диффузиялық жалынның нашар ағулы денелердің ізіне отын шашырауының әсерін зерттеумен айналысады. Авторлардың зерттейтін өте үлкен және күрделі мәселе қозғалыстағы ағында жалын үзілуі болып табылады, олардың негізгі мәселесі – турбулентті жалын жылдамдығы, ТВС ағыны немесе басқа параметрлер арасындағы кинематикалық тепе-теңдіктің жалын үзілуі бақыланады.

Бұрыштық тұрақтандырғыштар микрофакельді құрылғылар элементтерінің біріне жатады. ЗОТ-ның тұрақтануы мен жануы ТВС-ның бұрыштарынан анықталуына байланысты, азот оксидтерінің пайда болуы ТВС-ның араласу сапасымен, жану аймағындағы температурамен және жоғары температура аймағында жану өнімдерінің болу уақытымен анықталады. Ашу бұрышын оңтайлы таңдау кезінде және қабырғалардың ұзындығы, сондай-ақ ықтимал перфорация кезінде ЗОТ оңтайлы мәнін қамтамасыз етуі мүмкін. ЗОТ оңтайлы мәні жану аймағындағы салыстырмалы төмен орташа температураны, жанып кеткен газдардың аз болу уақытын, сондай-ақ жақсы араластырылуын қамтамасыз етеді.

Айву Фан және т.б. нашар ағулы денелердің жану, тұрақтандыру, жылу алмасу процестерін терең зерттеді. Тұрақтандыру процесі бұрыштық тұрақтандырғыштардың артынан түзілетін ЗОТ-қа байланысты екені дәлелденді. ЗОТ-тың пайда болу процесіне отын шығыны, ауа жылдамдығы және тағы да басқа сол сияқты көптеген факторлар әсер етеді. Сутегі отындарымен жүргізілген эксперименталдық жұмыстар отын шоғырлануының артуы мен үзілу шегінің ұлғаятынын көрсетті. Ал газ температурасы алдымен артады, содан кейін төмендейді.

Тұрақтандырғыштардың әр түрлі түрлерінің әсері, сондай-ақ отынды енгізудің, бұрыштардың орналасуы, жалын қалқандарын орнату дамыған бұрыштық тұрақтандырғыштардың ЗОТ-тың есебінен жанудың кең ауқымына ие екенін көрсетті. Сонымен қатар, ЗОТ-қа отын беру тәсілі азот оксидтерінің түзілуіне айтарлықтай әсер етеді.

Әр түрлі нашар ағулы денелерді пайдалану кезінде зиянды заттардың пайда болуын зерттеу бұрыштары нашар ағулы денелерде зиянды заттардың пайда болуын айтарлықтай қысқартуға, сондай-ақ жақсы дамыған ЗОТ есебінен жанудың тұрақтылығын айтарлықтай арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетті.

Азот оксидтері рециркуляция аймақтарында немесе ағыстан төмен пайда болатыны белгілі. Бұл ауа мен отынның мөлшері, яғни  $\phi$  ЗОТ азот оксидінің түзілуінде маңызды рөл атқарады. Сондықтан бұрыштық тұрақтандырғыштарға ЗОТ пен ТВС араластыруға ерекше көңіл бөлу маңызды.

Жарылу процестерін зерттеу жарылу шекарасына жақындағанда, жалын пішіні өзгергенін, сондай-ақ жалынның соңғы учаскесінің пішіні өзгергенін көрсетті. Жұмыста әртүрлі материалдар үшін ламинарлық ағыс кезінде нашар ағулы денелердегі жалынның тұрақтандыру үдерісі зерттелді. Алдын ала араластырылған отынның жалыны жалынды жағу үшін ең қолайлы жағдайлар бар жерде тұрақтанатыны көрсетілген. Мұндай аймақ нашар ағулы дене мен реакция арасындағы жоғары жылу массасының алмасуына байланысты жоғары температураға ие.

Бұрыштық тұрақтандырғыштардың әртүрлі өлшемдерінің және ауа жылдамдығының алау негіздерін тұрақтандыру және орналастыру процесіне әсері жұмыста зерттеледі. Нәтижелері айтқандай, шағын мөлшерде тұрақтандырғыш негізі алаудың артында орналасқан рециркуляциялық аймағы, ал оның орналасуының төменгі ағысы бойынша ұлғайта отырып, ауаның жылдамдығы өзгереді. Тұрақтандырғыштар үлкен мөлшерде, одан кейін факелдің екі негізі болады. Ал жылдамдықты арттыру жалыны негізі ағыс бойымен жоғары қарай, ал рециркуляциялық аймақта төменге қарай қозғалады.

Үшкөмірлі тұрақтандырғыштың көмегімен тұрақтандыру процесіне отын беру тәсілінің әсері және рециркуляциялық аймаққа әсер ететін заттардың жылдам кіруі "кедей" үзіліске әкеп соқтыратынын көрсетеді.

Ньюболд диффузиялық алаулардағы нашар ағатын тұрақтандырғыштарды пайдалануды эксперименталды зерттеді. Тұрақтандырғыштардың күшті рециркуляциялық аймағы азот оксидтерінің түзілуін азайтты, алайда СО-ның түзілуін арттырды. Ким және Ху нашар ағулы денелердің  $\text{CH}_4$  /  $\text{H}_2$  жануын симуляциялау кезінде бұрыштық тұрақтандырғыштарды пайдалану кезіндегі радиациялық шығындар жалынның диффузиялық жануы кезінде азот оксидтерінің эмиссиясына аз әсер ететінін көрсетті.

Тар арнадағы тұрақтандыру процесін зерттеу бойынша жұмыстар қызықты көрінеді, авторлар "кедей" үзіліске жақындағаннан кейін, жалын рециркуляциялық аймақтың кейбір аймақтарында "жарқылдайды" деген қорытындыға келді.

Отын тербелісінің әсерін зерттеу және алдын ала аралас ТВС нашар ағулы денеден кейін жанып жатқан кезде жылу шығару процесі бұрыштың ізіндегі тербелістер мен 10-15 м/с арасындағы жылдамдықпен "кедей" үзілулер арасындағы өзара байланыс бар екенін көрсетті.

Авторлар нашар ағулы денелерде жалынның екі түрі бар деп болжады: 1-отынның басым ағынының жануы, 2-бірлескен ағынмен басым жану процесі.

Жалын түрінің сипатына бұрыштық тұрақтандырғыштардың өлшемдері мен форсунка саптамасының диаметрі әсер етеді. Жұмыста тұрақтандырылған нашар ағулы денемен жалынның әр түрлі нүктелерінде ағын жылдамдығын өлшеу нәтижелері берілген.



Жұмыста отын бұрку және бұрыштық тұрақтандырғыштың жану процесіне араластыру процесінің әсері зерттелді. Нашар ағулы денелерді D әрпі түрінде зерттеуге авторлар өзіне арнады.

Бұл жұмыста нашар ағулы денелерден кейін алдын ала араластырылған метан-сутегі қоспасының жануы зерттелді. Эксперимент нәтижесінде авторлар сутегі қосу отынның жалпы шығыны мен жылу энергиясын төмендетеді деген қорытындыға келді, бұл жоғарғы рециркуляциялық аймақтағы газ температурасының төмендеуіне әкеледі. Сондай-ақ, ең жоғары температура форсунка саптамасының жағына қарай сутегі концентрациясының ұлғаюымен қозғалады. Авторлар газ оттықтарындағы нашар ағулы денелерді пайдалануды зерттеді, олар тұрақтану мен жанудың ұлғаюының жақсы нәтижелерін көрсетті. Нашар ағулы денелерден ағынның аэродинамикалық тұрақсыздығын зерттеу авторларға жел энергетикасы үшін нашар ағулы денелердің ағуын есептейтін теңдеулерді ұсынуға мүмкіндік берді.

Микрофакельді құрылғылардың негізгі артықшылықтары:

- жоғары толық жану ( $\eta_c=0,985\div 0,995$ );
- тұрақты жанудың кең шектері ( $\alpha=2\div 25$ );
- толық қысымды шағын гидравликалық шығындар ( $\sigma=1,5\div 3\%$ );
- жұмыс көлемінің жоғары жылу сыйымдылығы ( $H=1\div 5$  МДж/м<sup>3</sup>\*ч\*Па);
- түтін және азот оксиді шығарындыларының төмен деңгейі (CNO=15 ppm)
- шағын өлшемдер және қозғалтқыш контурында орналасу ыңғайлылығы;
- үлкен ресурс және пайдалану кезінде қызмет көрсетудің қарапайымдылығы.

Олардың қарапайымдылығы мен жоғары экологиялық параметрлеріне байланысты нашар ағулы денелердің негізіндегі құрылғылар ерекше қызығушылық тудырады. Нашар ағулы денелерді пайдалану ауа шығынының кең көлемінде жануды қамтамасыз етеді. Нашар ағулы денелерді пайдаланудың бір нұсқасы-бұрыштық тұрақтандырғыштар.

МФЖ базасындағы әр түрлі құрылғылар мен жағудың микрофакельді әдістеріне жүргізілген талдау келесі қорытындыларды жасауға мүмкіндік береді:

- жану аймағына отын беру, форсункаларды, отын саптамаларын орналастыру, жақсы ағатын немесе нашар ағатын денелер түріндегі кедергілердің орналасуы жану процесіне, оның сипаттамасына және зиянды заттардың, атап айтқанда азот оксидтерінің шығуына айтарлықтай әсер етеді;
- микрофакельді жанудың негізгі принципі алау көлемі бойынша "шаю" болып табылады, алайда мұндай принциптерді жүзеге асыру әр түрлі болуы мүмкін. Кейбір жағдайларда көптеген форсункаларды пайдаланады, ал басқаларда перфорацияланған беттер немесе нашар ағулы денелер қолданылады;

- микрофакельді жағу принципі үлкен потенциалға ие. Принцип негізінде газ диффузиялық және кинетикалық тәсілдермен жанатын әр түрлі құрылғылар әзірленеді;

- диплом идеясына ең жақын ағын-тұрақтандырғыш оттық құрылғылары болып табылады;

- жүргізілген талдаудан МФЖ базасында құрылғының үлкен потенциалы бар орындалуда ең қарапайым-бұрыштық тұрақтандырғыштар анықталды.

### 3 Бұрыштық тұрақтандырғыштардан жану процестерін сандық модельдеу

Модельдеудің негізгі артықшылығы-көрінетін модельде болатын үдерістерді көрнекі көрсету болып табылады. Бағдарламалық өнім ретінде ANSYS Fluent бағдарламасы қолданылды (академиялық нұсқа). Бағдарламалық өнімнің дұрыстығын шетелдік авторлардың көптеген мақалалары растайды, бағдарламалық өнімді Pratt & Whitney, General Electric, Airbus, AREVA, BMW, Daimler AG, John Deere, Mars және Volkswagen сияқты компаниялар пайдаланады.

Микрофакельді оттықтардың артықшылықтарын зерттеу үшін газ оттықтарының сызбалары мен жекелеген негізгі бөліктері пайдаланылады, олардың жаңалығы авторлық куәліктермен расталған: инновациялық патент а.с. № 92515 және пайдалы модель а.с. №93801. Сонымен қатар жоғарғы жағында түрлі формадағы типтері мен бұрыштарының бұрыштық тұрақтандырғыштары пайдаланылады.

#### 3.1 Математикалық модель

Энергия тасымалдау теңдеуі келесідей жазылады:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \bar{v})) + S_h, \quad (3.1)$$

мұндағы  $E$ -энергия ағыны;

$k_{eff}$  - турбуленттілік моделіне байланысты қолданылатын тиімді өткізгіштігі;

$J_j$ - диффузиялық ағын, теңдеудің оң жақ бөлігінің алғашқы үш мүшесі энергияның жылу өткізгіштігімен, бөлшектердің диффузиясымен және тұтқыр диссипациясымен тасымалдануын анықтайды;

$S_h$  – химиялық реакцияның жылуын анықтайды.

(3.1)-дегі энергия теңдеуі келесі түрді анықтайды:

$$E = H - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}, \quad (3.2)$$

мұнда  $H$  энтальпия ретінде анықталады:

$$H = \sum_j Y_j h_j \quad (3.3)$$

Диффузиялық жану үшін адиабаталық емес түпкілікті теңдеу келесідей:

$$\frac{\partial}{\partial t}(pH) + \nabla \cdot (p\bar{v}H) = \nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (3.4)$$

мұндағы  $k_t$  – жылуөткізгіштік коэффициенті.

Диффузиялық жану есептерін шешу үшін бір немесе екі консервативті скалярлық бірлік үшін көлік теңдеуін шешу қажет. Теңдеу қоспаның әрбір жеке бөлшектері үшін шешілмейді.

Турбуленттік процестерді шешу үшін турбуленттіліктің түрлі модельдері қолданылады. Біздің жағдайда  $k$ - $\varepsilon$  realizable модельін қолданамыз. Көлік теңдеуі келесі теңдеулермен анықталады.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (3.6)$$

мұндағы  $G_k$  - жылдамдық градиенттеріне байланысты турбулентті кинетикалық энергия генерациясын анықтайды;

$G_b$  – турбулентті кинетикалық энергия генерациясын анықтайды;

$Y_m, C_{1\varepsilon}, C_2$  – константалар;

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  –  $k$  және  $\varepsilon$  үшін Прандтльдің турбуленттік сандары;

$S_k, S_\varepsilon$  – пайдаланушы анықтаушы сан.

Бірінші (3.5) теңдеу  $k$  турбулентті кинетикалық энергияны анықтайды.

Екінші (3.6) теңдеу кинетикалық энергияның  $\varepsilon$  диссипациялық жылдамдығын анықтайды.

### 3.2 Азот оксидтерінің пайда болу моделі

$NO_x$  ANSYS Fluent эмиссиясын болжау үшін көлік теңдеуін шешеді (3.7- теңдеу). Отын азот берілген жағдайда, ANSYS Fluent HCN,  $NH_3$  сияқты аралық қосылыстар үшін көліктің қосымша теңдеулерін шешеді.  $NO_x$  көлік теңдеулері ағындар туралы деректер және жану процесінің теңдеулері негізінде шешіледі. Басқаша айтқанда,  $NO_x$  жану теңдеулерін шешкеннен кейін өңделеді.  $NO_x$  эмиссиясы бойынша деректерді алу дәлдігі жану теңдеулерінің дәлдігі жоғары болған сайын соғұрлым жоғары.

ANSYS Fluent конвекция, диффузия,  $NO$  және туыстық қосылыстардың пайда болуы мен ыдырауын ескере отырып,  $NO$  үшін массаны тасымалдау теңдеулерін шешеді. Бұл жалпы тәсіл массаны сақтау заңдарына негізделген. Азот оксидтерінің түзілу механизмдеріне табу уақытының әсері анықтаушы теңдеулерде ауыспалы конвекция арқылы есептеледі. Термиялық және жылдам  $NO_x$  түзілу механизмінің теңдеуі үшін тек бір теңдеу қажет:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D Y_{NO}) + S_{NO}, \quad (3.7)$$

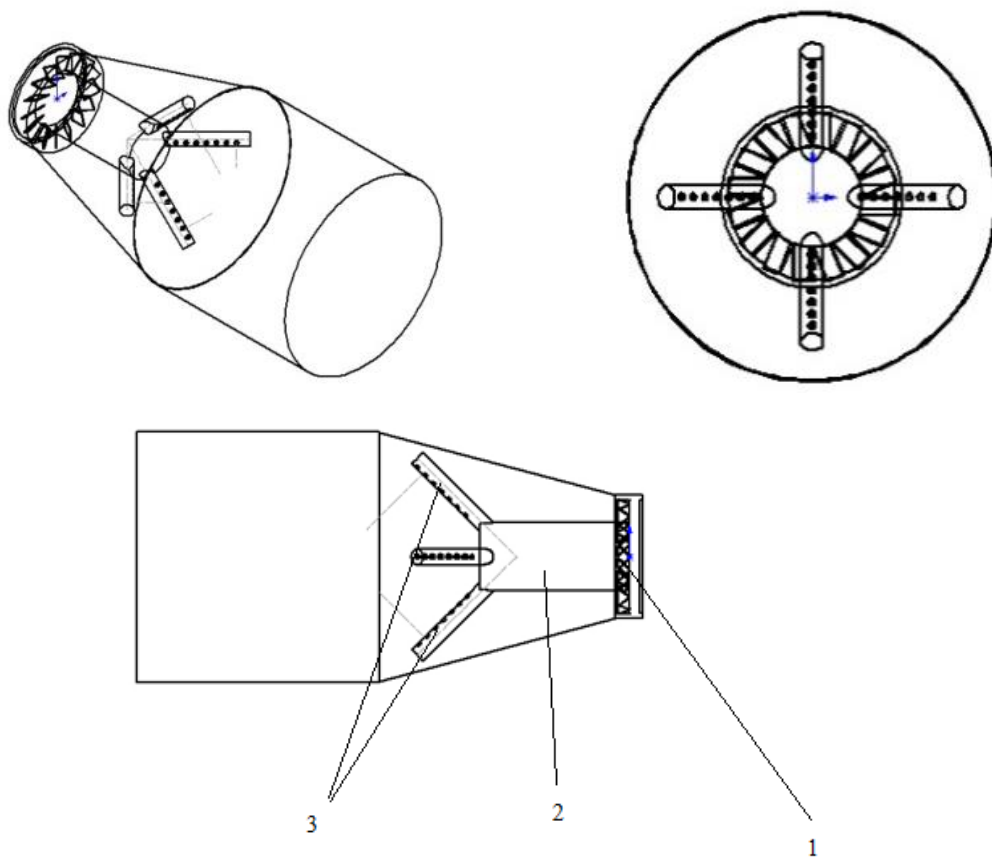
мұндағы,  $Y_{NO}$  – NO-ның массалық фракциясы,  $S_{NO}$  – тұрақты, берілетін пайдаланушы.

Термиялық  $NO_x$ -тің түзілуі Зельдовичтің кеңейтілген механизмі деп аталатын айтарлықтай температураға тәуелді химиялық теңдеулер тобымен анықталады.

### 3.3 Микрофакельді оттықтарда жану процесін зерттеу

3.1-суретте газдық микрофакельді оттықтардың конструкциялары келтірілген. Оттықтардың жұмыс істеу принципі келесідей: компрессордан шыққан ауа оттықтың қуысына 1 ағынын бұрауға арналған күрекше арқылы өтіп, бұрап алады. Газ беруге арналған құбыр арқылы 2 газ түседі де, одан кейін тарату үшін саптамалар орнатылған 3 тарату келте құбырлары бойынша бөлінеді.

Кез келген басқа инженерлік шешім сияқты, газ оттығы жетілдіруді, әлсіз аймақтарды анықтауды талап етеді. Маңызды міндеттердің бірі жану процесіне айнарудың әсерін анықтау және улы заттардың, атап айтқанда азот оксидтерінің түзілуін анықтау болып табылады.



1- ағын бұрауға арналған қалақшалар, 2- отын беруге арналған құбыр,  
3- тесіктері бар тарату келте құбырлары

3.1-сурет – Микрофакельді оттықтардың жалпы түрі

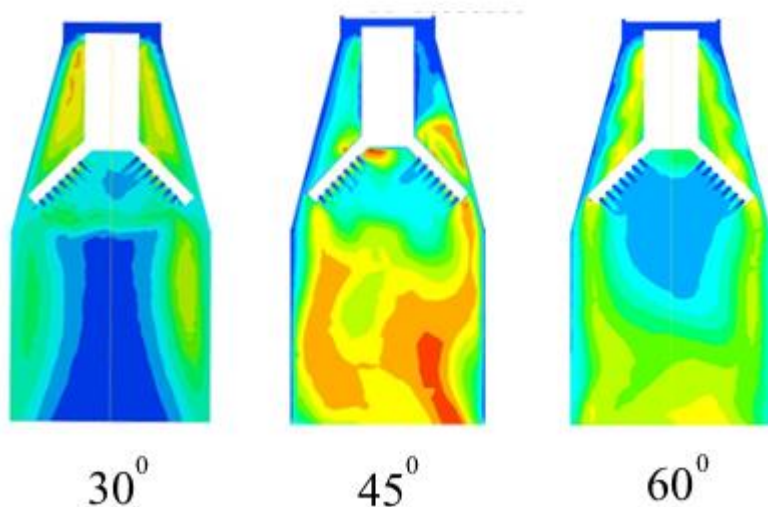
Әрбір саптамалы тарату саптаманың ұзындығында орналасқан диаметрі 2 мм 7 саптаманы қамтиды. Есептеулерді жеңілдету үшін тарату саптамаларының саны 4-ке дейін қысқарды. Қыздырғышты есептеу үшін 3.1-кестеде ұсынылған бастапқы шарттар қолданылады. Отын шығыны барлық саптамалар үшін ортақ қойылды.

### 3.1-кесте - Бастапқы шарттар

Параметрлері	Өлшем бірліктері	Шамасы
Дене ұяшықтарының саны	-	500000
Отынның бастапқы температурасы	К	300
Ауаның бастапқы температурасы	К	450
Ауа берілісінің жылдамдығы	м/с	15
Отын шығыны	кг/с	0,02

Ауа кірісінде шекаралық жағдайлар температурамен және ағын жылдамдығымен берілген. Отын кіре берісіндегі шекаралық жағдайлар жаппай шығынмен және температурамен берілген. Модельдеу аймағынан шығу қысыммен беріледі (pressureoutlet).

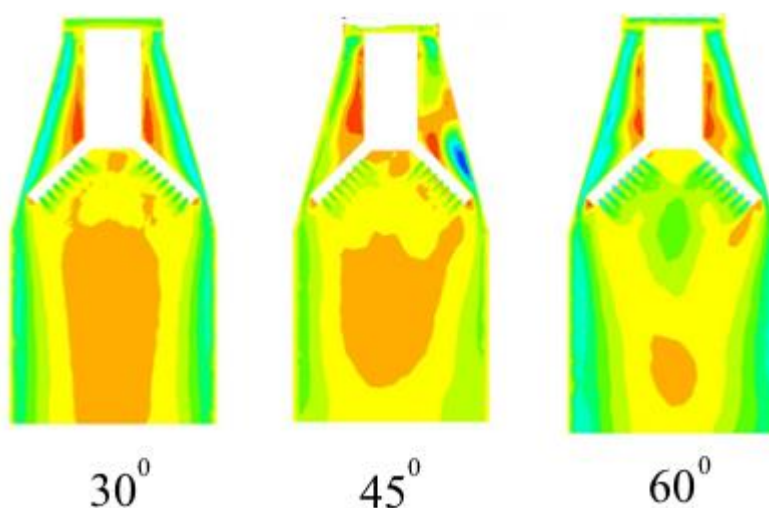
Есептеу нәтижесінде 3.2-суретте көрсетілген ағысты бұрауға арналған қалақшаларды орнатудың әр түрлі бұрыштарында температураның контурлары алынады.



3.2-сурет – Қалақшалардың орналасу бұрышына байланысты температура контурлары

Газ оттығына (30°) кіре берістегі бұрамалы қалақшаларды орнатудың ең өткір бұрышында жоғары температура отын беруге арналған түтікше аймағында тұрғанын көруге болады. Бұл аймақтағы температура 1700 К-ға жетеді. Оттықтың орталық бөлігі өте суық, ондағы температура 500 К-ден аспайды, бұл жану қабырғаға жақын аудандарда орын алатынын көрсетеді. 45°-де жануы біркелкі емес, бірақ жоғары температуралы аймақ оттығының алдыңғы бөлігіне көшті. Қыздырғыштың соңында температура 1900 К-ға жетеді. Отынның бір бөлігі отынды тарату үшін түтікке енгізіледі. 60° кезінде, отын біркелкі жанады. Жоғары температура аймақтары оттықтың фронтында орналасқан. Ең жоғары температура 2000 К-ға жетеді.

Жану процесінің заңдылықтарын отын мен ауа бөлшектерінің қозғалысын анықтайтын жылдамдық контурларын көргенде түсіну оңай. 3.3-суретте қалақшаларды орнатудың түрлі бұрыштарында осьтік жылдамдық контурлары көрсетілген.



**3.3-сурет - Қалақшалардың орналасу бұрышына байланысты жылдамдық контурлары**

### 3.4 Газ турбиналы қондырғыны есептеу алгоритмі

Қысымның жоғарылауының жалпы дәрежесін  $\pi$ -ді 5-6 мәнін біркелкі кадаммен қабылдаймыз. Содан соң компрессордың ауа қысымын табамыз. Ол үшін мына формуланы қабылдаймыз:

$$p_2 = p_1 \sigma_k \delta, \text{ МПа} \quad (3.8)$$

$$p_2 = 101,325 \cdot 1,7 = 709,225 \text{ кПа,}$$

мұндағы:  $p_1$  – КНД алдындағы ауа қысымы;

$\sigma_{k_1}$  – КНД сору кезіндегі гидравликалық шығындардың коэффициенті.

Компрессордың ішіндегі ауа температурасын табу үшін мына формула қолданылады:

$$T_2 = T_1 \cdot \left( 1 + \frac{\pi^{mk} - 1}{\eta_{ik}} \right), \text{ К} \quad (3.9)$$

$$T_2 = 278 \cdot \left( 1 + \frac{7^{0.286} - 1}{0.86} \right) = 518,6 \text{ К},$$

мұндағы  $T_1$  – КНД алдындағы ауа температурасы;

$\eta_{ik1}$  – КНД пайдалы әсер коэффициенті,  $\eta_{ik1} = 0,86$

$k_1$ -отынның жану өнімдерін кеңейту кезіндегі адиабат көрсеткіші

Компрессорды қысудың қажетті жұмысын мына формула арқылы анықтауға болады:

$$I_{ik} = c_{pk} \cdot \frac{T_1}{\eta_{ik}} (\pi^{mk} - 1), \text{ кДж/кг} \quad (3.10)$$

$$I_{ik} = 1.01 \cdot \frac{278}{0.86} (7^{0.286} - 1) = 243,1 \text{ кДж/кг},$$

мұндағы  $c_{pk}$  – атмосфералық ауаның жылу сыйымдылығы,  $c_{pk} = 1,01$  кДж/кг К.

Турбина алдындағы ауа қысымын осы формуламен табуға болады:

$$p_3 = p_2 \cdot \sigma_{kc}, \text{ МПа} \quad (3.11)$$

$$p_3 = 709.225 \cdot 0.98 = 695.04 \text{ кПа},$$

мұндағы  $\sigma_{kc}$  – жану камерасындағы гидравликалық шығындардың коэффициенті.  $\sigma_{kc} = 0.98$

Турбина үшін газдың қысымы мына формула арқылы анықталады:

$$p_4 = \frac{p_1}{\sigma_{k_2}}, \text{ МПа} \quad (3.12)$$

$$p_4 = \frac{101.325}{0.98} = 103,39 \text{ кПа},$$

мұндағы  $p_1$  – КНД алдындағы ауа қысымы;

$\sigma_{k_2}$  – КВД сору кезіндегі гидравликалық шығындардың коэффициенті.



Турбинаның ішіндегі газ температурасын табу үшін мына формуланы қолданамыз:

$$T_4 = T_3 \cdot [1 - \eta_{it} (1 - \pi_t^{-m_t})], \text{ К} \quad (3.13)$$

$$T_4 = 1123 \cdot [1 - 0.86 (1 - 7^{0.286})] = 710 \text{ К},$$

мұндағы  $\eta_{it}$  – жоғары қысымды турбинаның пайдалы әсер коэффициенті,  $\eta_{it} = 0,86$ ;

$T_3$  – жану камерасынан шығатын газ температурасы.

Турбинадағы кеңейту жұмысын табу үшін мынадай формуланы қолдануға болады:

$$I_{it} = c_{pt} \cdot T_3 \cdot \eta_{it} \cdot \beta \cdot (1 - \pi_t^{-m_t}), \text{ кДж/кг} \quad (3.14)$$

$$I_{it} = 1.15 \cdot 1123 \cdot 0.86 \cdot (1 - 7^{0.286}) = 474 \text{ кДж/кг},$$

мұндағы  $c_{pt}$  – отынның жану өнімдерінің жылу сыйымдылығы,  $c_{pt} = 1.15 \cdot 10^3$  кДж/кг К.

Газтурбиналық қондырғыда пайдалы жұмысты былай табуға болады:

$$I_i = I_{it} - I_{ik}, \text{ кДж/кг} \quad (3.15)$$

$$I_i = 474 - 243 = 231 \text{ кДж/кг}.$$

Отынды жағу кезінде жану камерасында циклге тартылған жылуды мына формуламен анықталады:

$$Q = \frac{1}{\eta_{kc}} [c_{pt} \cdot \beta \cdot T_3 - c_{pk} \cdot T_2], \text{ кДж/кг} \quad (3.16)$$

$$Q = \frac{1}{0.99} [1.15 \cdot 1123 - 1.01 \cdot 518.6] = 775, \text{ кДж/кг},$$

мұндағы  $\eta_{kc}$  – жану камерасының пайдалы әсер ету коэффициенті,  $\eta_{kc} = 0,99$ .

Қондырғының ішкі пайдалы әсер коэффициентін табу үшін мына формуланы пайдаланамыз:

$$\eta_i = \frac{I_i}{Q} \quad (3.17)$$

$$\eta_i = \frac{231 \cdot 10^3}{775 \cdot 10^3} = 0,29$$

Отынның меншікті шығынын былай есептеуге болады:

$$b_i = \frac{3600}{Q_p^H \cdot \eta_i}, \text{ кг/ (кВт*сағ)} \quad (3.18)$$

$$b_i = \frac{3600}{50056 \cdot 0.29} = 0,25 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{сағ}).$$

мұндағы  $Q_{PH}$  – отынның төменгі жылу шығару қабілеті (табиғи газ),  
 $Q_{PH} = 50056 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

Отынның сағаттық шығынын есептеу үшін мына формула берілген:

$$B = b_i \cdot N_e, \text{ кг}/\text{сағ} \quad (3.19)$$

$$B = 0,25 \cdot 50 \cdot 10^3 = 12,5 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{сағ}.$$

Ауаның үлестік шығынын мына формуламен есептейміз:

$$d_i = \frac{1}{I_i}, \text{ кг}/\text{кДж} \quad (3.20)$$

$$d_i = \frac{1}{231 \cdot 10^3} = 0,0043 \text{ кг}/\text{кДж}.$$

Газтурбиналық қондырғы цикліндегі ауа шығынын мына формуламен есептеуге болады:

$$D = d_i \cdot N_e, \text{ кг}/\text{сағ} \quad (3.21)$$

$$D = 0.0043 \cdot 50 \cdot 10^6 = 215 \text{ кг}/\text{сағ}.$$

### 3.5 Жану камерасын ауыстырғандағы газ турбинының есебі

Турбинаның ішіндегі газ температурасын табу үшін мына формуланы қолданамыз:

$$T_4 = T_3 \cdot [1 - \eta_{it} (1 - \pi_t^{-m_t})], \text{ К} \quad (3.22)$$

$$T_4 = 1400 \cdot [1 - 0.86 (1 - 7^{0.286})] = 882 \text{ К}$$

мұндағы  $\Pi_{it}$  – жоғары қысымды турбинаның пайдалы әсер коэффициенті,  
 $\Pi_{it} = 0,86$ ;

$T_3$  – жану камерасынан шығатын газ температурасы.

Турбинадағы кеңейту жұмысын табу үшін мынадай формуланы қолдануға болады:

$$I_{it} = c_{pt} \cdot T_3 \cdot \eta_{it} \cdot \beta \cdot (1 - \pi_t^{-m_t}), \text{ кДж}/\text{кг} \quad (3.23)$$

$$I_{it} = 1.15 \cdot 1400 \cdot 0.86 \cdot (1 - 7^{0.286}) = 590 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

мұндағы  $c_{pt}$  – отынның жану өнімдерінің жылу сыйымдылығы,  
 $c_{pt} = 1.15 \cdot 10^3$  кДж/кг К.

Газтурбиналық қондырғыда пайдалы жұмысты былай табуға болады:

$$I_i = I_{it} - I_{ik}, \text{ кДж/кг} \quad (3.24)$$

$$I_i = 590 - 243 = 347 \text{ кДж/кг.}$$

Отынды жағу кезінде жану камерасында циклге тартылған жылуды мына формуламен анықталады:

$$Q = \frac{1}{\eta_{kc}} [c_{pt} \cdot \beta \cdot T_3 - c_{pk} \cdot T_2], \text{ кДж/кг} \quad (3.25)$$

$$Q = \frac{1}{0.99} [1.15 \cdot 1400 - 1.01 \cdot 518.6] = 1075, \text{ кДж/кг,}$$

мұндағы  $\eta_{kc}$  – жану камерасының пайдалы әсер ету коэффициенті  $\eta_{kc} = 0.99$

Қондырғының ішкі пайдалы әсер коэффициентін табу үшін мына формуланы пайдаланамыз:

$$\eta_i = \frac{I_i}{Q} \quad (3.26)$$

$$\eta_i = \frac{347 \cdot 10^3}{775 \cdot 10^3} = 0.44.$$

Отынның меншікті шығынын былай есептеуге болады:

$$b_i = \frac{3600}{Q_P^H \cdot \eta_i}, \text{ кг/ (кВт*сағ)} \quad (3.27)$$

$$b_i = \frac{3600}{50056 \cdot 0.44} = 0.163 \text{ кг/(кВт*сағ),}$$

мұндағы  $Q_{pH}$  – отынның төменгі жылу шығару қабілеті (табиғи газ),

$$Q_{pH} = 50056 \text{ кДж/кг}$$

Отынның сағаттық шығынын есептеу үшін мына формула берілген:

$$B = b_i \cdot N_e, \text{ кг/сағ} \quad (3.28)$$

$$B = 0,163 \cdot 50 \cdot 10^6 = 8.15 \cdot 10^3 \text{ кг/сағ.}$$

Ауаның үлестік шығынын мына формуламен есептейміз:

$$d_i = \frac{1}{I_i}, \text{ кг/кДж} \quad (3.29)$$

$$d_i = \frac{1}{347 \cdot 10^3} = 0.002 \text{ кг/кДж.}$$

Газтурбиналық қондырғы цикліндегі ауа шығынын мына формуламен есептеуге болады:

$$D = d_i \cdot N_e, \text{ кг/сағ} \quad (3.30)$$

$$D = 0.002 \cdot 50 \cdot 10^6 = 170 \text{ кг/сағ.}$$

## 4 Жобаның экономикалық тиімді екенінің дәлелі

### 4.1 Жану камерасын жасауға кететін капиталды шығын

Жалпы шығындарды анықтау. ГТҚ - дағы жабдықтардың құны 4.1-кестеде көрсетілген.

#### 4.1-кесте – ГТҚ - дағы жабдықтардың құны

Жабдықтар	1 данасының құны, млн. теңге	Саны, дана	Жалпы бағасы, млн. теңге
Жану камерасы	300	1	300
Монтаждау жұмыстары			500
Жалпы			800

### 4.2 ГТҚ-ның жылдық энергиясын есептеу

Жылдық отын шығысы, ал ол мынаған тең  $T_y = 6000$  сағат:

$$V_{г1} = 215 \cdot 6000 = 1290000 \text{ кг/жыл} = 1290000 \text{ м}^3/\text{жыл},$$

$$V_{г2} = 170 \cdot 6000 = 1020000 \text{ кг/жыл} = 1020000 \text{ м}^3/\text{жыл},$$

$$\Delta V = 1290000 - 1020000 = 270000 \text{ м}^3/\text{жыл}.$$

1 м<sup>3</sup> газдың құны 50 теңге/м<sup>3</sup> деп ескерсек

$$Ш = 270000 \text{ м}^3/\text{жыл} \cdot 50 = 13,5 \text{ млн. теңге/жыл}.$$

Әр жылдық энергия өндіруге кеткен шығынды анықтау.  
Станцияға қызмет көрсету құны:

$$C_{\text{обслуж.}} = 12(C_{3/\text{пл}} \cdot П + (Q_{\frac{\text{л}}{\text{мес}}} + (V_{\text{карт}} \cdot p)) \cdot Ц_{\text{м}}); \quad (4.1)$$

мұндағы  $C_{3/\text{пл}} = 150000$  тг – қызметкерлердің айлық жалақысы;

$П = 20$  – қызметкерлердің саны, адам;

$Q_{\frac{\text{л}}{\text{мес}}}$  – Бір айлық май шығыны;

$V_{\text{карт}}$  – Барлық қондырғылардың қартерларының көлемі;

$p = \frac{2}{12}$  – май ауыстыру жиілігі (жылына екі рет);

$Ц_{\text{м}}$  – газ турбинасының 1 литр майдың бағасы.

$$C_{\text{обслуж.}} = 12(150000 \cdot 20 + (928,8 \cdot 4 + \left(\frac{2200}{6} \cdot 4\right)) \cdot 910) = \\ = 92\,585\,983 \approx 92,586 \text{ млн. теңге/жыл.}$$

Жылдық отынға кететін шығын:

$$C_T = V_T C_G, \quad (4.2)$$

мұндағы  $C_G = 28 \frac{\text{тг}}{\text{м}^3}$  – табиғи газдың бағасы.

$$C_T = 33024 \cdot 10^3 \cdot 28 = 28,672 \text{ млн. теңге/жыл.}$$

Электр және жылу энергиясының бірлігінің құнын есептеу.  
Электр энергияның бірлігінің құны:

$$S_{\text{ээ}} = (1 - D_{\text{ут}}) \frac{C_{\text{обслуж.}} + C_T}{W_T(1 - K_{\text{CH}})}, \quad (4.3)$$

мұндағы  $D_{\text{ут}}$  – Утилизаторға кететін шығын, газ турбины үшін 0,15;  
 $K_{\text{CH}} = 0,0722$  – станцияның өз қажеттілігінің коэффициенті.

$$S_{\text{ээ}} = (1 - 0,15) \frac{92,586 \cdot 10^6 + 28,672 \cdot 10^6}{300 \cdot 10^6 (1 - 0,0722)} = 3,4 \frac{\text{теңге}}{\text{кВт}} \cdot \text{сағ.}$$

Амортизациялық аударымдар.

ГТҚ - ның пайдалы жұмыс істеу уақыты  $T_{\text{пи}} = 10$  жыл. Басты Ораташа жылдық салымдарды 95% деп алайық. Амортизациялық салымдардың соммасы, теңге/жыл:

$$C_a = \frac{\Phi_{\text{оп.}}}{T_{\text{пи}}}, \quad (4.4)$$

$$C_a = \frac{0,95 \cdot 800}{10} = 7,6 \text{ млн. теңге/жыл;}$$

Энергия өндірудегі жылдық пайдасы. ГТҚ-ның техника-экономикалық көрсеткіштері 4.2-кестеде келтірілген.

#### 4.2-кесте – ГТҚ-ның техника-экономикалық көрсеткіштері

Көрсеткіш атауы	Белгіленуі	Өлшемі	Мөлшері
Қойылған қуаты	$N_y$	МВт	50
Жұмыс істеу уақыты	$h_y$	сағ	6000
Жылдық электір энергия берілуі	$W_0$	кВт·сағат/жыл	$3000 \cdot 10^6$
Электір энергияның нақты шығыны Ө.Қ.	$K_{CH}$	%	7,22
Жалпы капиталды салыным	$K_{CT}$	Млн.теңге	800
Нақты капиталды салымдар	$K_{y\partial}$	млн. тенге / кВт	0,016
Жылдық отын шығыны	$B$	$m^3/жыл$	$1020 \cdot 10^3$
Қарау коэффициенті	$K_{об}$	МВт/адам	0,86
Электір энергияның бірлігінің құны	$S_0^{\partial}$	$тг/кВт \cdot сағ$	3,4
Электір энергиясын өндіргендегі жылдық үнемдеу		Млн.теңге	13,5

**4.3-кесте – ГТҚ-ның шоғырландырылған қаржылық көрсеткіштері**

	і – жылдағы қаржылық нәтиже, млн.теңге									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Жинақ (Экономия)	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
Жөндеу жұмыстарына жинау	0	0	0	0	50	0	0	0	0	75
Жалпы шығындар: $C_T + C_{экеп}$	121	1017	1017	1017	1017	1017	1017	1017	1017	1017
Амортизацияға жинау	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Пайда	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200

### 4.3 Жобаның экономикалық тиімділігін анықтау

Жобаның тиімділігінің ең маңызды көрсеткіші болып таза ағымдағы құн болып табылады (NPV), ол соңғы жоспарлау аралығындағы таза ағымдағы құн шамасына тең.

Таза келтірілген құн дисконт мөлшерлемесін ескере отырып, осы жобаның жалпы шығындарынан жалпы ақша түсімдерінің асып түсуін сипаттайды.

Инвестициялық талдау теориясының ортақ ережелеріне сәйкес, дисконт мөлшерлемесі инфляция деңгейін, кредитордың ең төменгі стандартты пайдасын және нақты жобаның тәуекелдік деңгейін ескеретін түзетуді қамтуы керек деп есептеледі. Біз тек инфляция мен нормативтік пайда деңгейін ескереміз.

$$d = 10 + 3 = 13 \%$$

Жобаның таза ағымдағы құны оң болуы керек.

$$NPV = \sum_1^n \frac{PV}{(1+d)^t} - I_0, \quad (4.5)$$

мұндағы  $PV$  – Жобаның экономикалық қызмет ету мерзімі ішінде ақша ағымының қазіргі заманғы құны;

$I_0$  – жобаның басындағы жалпы инвестиция.

ЧПДС = Сатудан түсетін түсімдер – амортизацияны есептемегенде ағымдағы шығындар.

Станцияны пайдалану кезінде тарифтердің өзгеруі және отын бағасының өсуі бір-бірін өтейді. Осылайша, оларды есептемеуге рұқсат етіледі.

### 4.4-кесте – Жобаның эффективтілігін бағалау

Жобаның эффективтілік көрсеткіші	1 жыл
1. Таза ақша ағымы, млн. теңге	3400
2. Таза ақша ағымы жалпы санының өсуімен, млн. Теңге	3400
3. Дисконт индексі	1
4. Таза қазіргі құн	2800
5. Таза ақшалай кіріс	

Кірістілік индексі:

Қорытынды: Жану камерасын ауыстыру отынды үнемдеудің арқасында 1 жыл шамасында ақталады.



## ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл дипломдық жобада нашар ағулы денелердің негізіндегі зиянды заттардың шығуы төмен газ турбиналық қондырғылардың жану камераларының түрлері жобаланған. Бірінші бөлімде ГТҚ-ның жану камералары табиғи отынның жануы кезінде зиянды заттардың пайда болу себептеріне талдау жүргізілді, жану процесінің жалпы принциптері және тізбекті реакциялар қарастырылды. Азот оксидтерінің пайда болу кинетикасы және оларды анықтау үшін тендеулер туралы жалпы түсінік берілген. Сондай-ақ азот улы оксидінің әртүрлі түрлері ұсынылған: термиялық, жылдам және отындық. Термиялық азот түзілуінің аса маңызды аспектілері – қысым, температура, болу уақыты анықталды.

Сондай-ақ зиянды заттардың түзілуін азайту мен берудің түрлі нұсқалары мен тәсілдері ұсынылған. Басудың технологиялық әдістері қарастырылды, оларға: су бұрку және жану камерасындағы бу, жану өнімдерінің рециркуляциясы, ауаны оңтайлы бөлу, жану камерасында қоспа түзудің интенсификациясы, сатылы жағу, каталитикалық жағу. Зиянды заттардың пайда болуын азайтудың конструктивтік әдістері қарастырылған: сатылы жану камерасы, өзгеретін геометриясы бар жану камерасы, каталитикалық жану камерасы, алдын ала дайындалған "кедей" қоспасын жағу.

Жүргізілген талдаудан кейін әрбір әдістің тиімділігі де, кемшіліктері де бар деген қорытынды жасауға болады. Каталитикалық әдіс жақсы экологиялық көрсеткіштерге ие, алайда бұл технология қымбат, екі зоналық жану камерасы конструкциясы күрделі, бірақ жоғары техникалық және экологиялық көрсеткіштерге ие. Қарастырылған талдауда технологиялардың оң сипаттамаларының көп бөлігін біріктіруге мүмкіндік беретін технологияны әзірлеу қажет екенін көрсетті. Бөлімде микрофакельді қағидатты пайдаланудың әртүрлі нұсқаларына талдау жүргізілді. Жүргізілген талдауды ескере отырып, мынадай міндеттерді қосымша шешу керек:

- толық жану, "кедей" жарылу, азот оксидтерінің пайда болуы сипатынан микрофакельді жағудың ең оңтайлы әдістерін таңдау қажет;

- отын, ауа шығысының әр түрлі режимдері, перфорацияның болуы, перфорацияның орналасуы, бұрыштың жоғарғы жағында бұрыштар, отын берудің орналасуы, қоршаған ауаның қысымы, қондырғыдан шығудағы газ температурасы және рециркуляция аймағына ауа шығысындағы ауаның шығыны кезінде ауаның артықшылығы азотқа байланысты бұрыштық тұрақтандырғыштардан алаудың "кедей" үзілуі бойынша эксперименттік деректерді жинақтау қажет.

- патенттік және әдеби талдау негізінде халық шаруашылығы мен өнеркәсіпте қолданылатын микрофакельді элементтерді пайдаланудың әр түрлі нұсқаларын ұсыну.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. - Л.: Изд-во Недр, 1988. -312 с.
- 2 Охрана окружающей среды и устойчивое развитие Казахстана 2010-2014: Статистический сборник. Астана, 2015. - 106 с.
- 3 Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. - М.: Изд-во Мир, 1986. – 566 с.
- 4 Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. - М.Изд-во Наука,1947. - 146с.
- 5 ГуптаА., ЛиллиД., СайредН. Закрученные потоки. — М. Изд-во Мир, 1987. - 588 с.
- 6 Достяров А.М. Разработка топливосжигающих устройств с микрофакельным горением и методики их расчета: дис. док. техн. наук: 05.14.04 г.Алматы: КазНИИ Энергетики им. Чокина, 2000. - 237с.
- 7 WestbrookС.К., DryerF.L. Chemicalkineticmodellingofhydrocarboncombustion//Prog.EnergyCombust.Sci. – 1984. Vol. 10. – P.1–57.
- 8 ХитринЛ.Н. Физикагоренияивзрыва. –М.: МГУ, 1957.-442с.
- 9 Rubins P.M., Marchionna N.R. Evaluation of NO<sub>x</sub> prediction-correlation equations for small gas turbines// 12<sup>th</sup> Propulsion Conference, Palo Alto, CA, USA, 1976. – P. 612.
- 10 FenimoreC.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames//13-th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh: The Combustion Institute, 1971. -P.373-380.
- 11 Нельсон Н. Образование окиси азота при горении// Ракетная техника и космонавтика.– 1976. - №9. - С.30-36.
- 12 Ловачев Л.А. Кинетика образования NO в метано-воздушных пламенах// Химическая физика. – 1983. - №8. - С.1085-1091.
- 13 Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени / [Н. А. Чигир, Р. Дж. Вейнберг, К. Т. Боумэн и др.]; пер. с англ. под ред. Ю. Ф. Дитякина. - М.: Изд-во Машиностроение, 1981. - 407 с.
- 14 Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович А.Б., Махвиладзе Г.И. Математическая теория горения и взрыва. - М.: Изд-во Наука, 1980. - 478 с.
- 15 Сигал А.И. Образование двуокиси азота в топках водогрейных котлов малой мощности на твердом топливе// В кн.: Окислы азота в продуктах сгорания топлив. - Киев: Изд-во Наукова думка, 1981. – Т.14. - С. 130-134.
- 16 Сигал И.Я., Нижник С.С., Гуревич Н.А. Образование окислов азота в топках котлов// Теплоэнергетика. – 1971. - № 4. -С. 57-60.
- 17 Сигал И.Я. Развитие и задачи исследований по изучению условий образования окислов азота в поточных процессах // Теплоэнергетика. - 1983. - №9.-С. 5-10.