

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования «БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ»**

Факультет гражданской авиации

Кафедра технической эксплуатации воздушных судов и двигателей

ОЧИСТКА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ АВИАДВИГАТЕЛЯ

Котович Виталий Алексеевич, курсант очной
формы обучения по специальности
«Техническая эксплуатация воздушных
судов и двигателей», третий курс, учебная
группа М118

Научный руководитель:

Шапорова Елена Анатольевна, кандидат
химических наук

МИНСК, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ ГТД.....	4
ФОРМИРОВАНИЕ ШПИНЕЛЬНЫХ СТРУКТУР В ОКСИДНЫХ СИСТЕМАХ.....	6
ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВРЕМЕНИ КОНТАКТА ГАЗОВ С КАТАЛИЗАТОРОМ	11
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	14
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	14

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. На сегодняшний день наиболее активным источником загрязнения атмосферы является автомобильный транспорт. По данному показателю авиация уступает ему примерно в 15 раз, однако она существенно влияет на экологию верхней тропосферы и нижней стратосферы. На объем загрязнения в значительной степени влияет тип используемых авиадвигателей, режимы работы двигателя, используемое топливо, его фракционный состав [16] и качество [17]. Требования ИКАО к экологическим характеристикам авиационных двигателей возрастают с каждым годом. Так, с момента введения первых ограничений (CAEP/1) авиационного комитета по защите окружающей среды (1986 год), в них уже несколько раз вносились изменения. С первого января 2014 года вступил в силу стандарт (CAEP/8), которому на смену уже готовы более жесткие требования по снижению выбросов NO_x (к 2020 году на 40% по сравнению с (CAEP/2)). Аналогичная тенденция и по остальным загрязняющим веществам (CO, HC, SN) [14].

В результате работы газотурбинных двигателей (ГТД) выделяются окиси азота (NO_x), оксиды углерода (CO), углеводороды (CH) и дым (SN). Окись углерода образуется в результате неполного сгорания топлива, диссоциации CO_2 , наличия холодного пристеночного слоя в результате стандартной схемы охлаждения воздуха и стенок в жаровой трубе. Окиси азота образуются в результате окисления азота, содержащегося в атмосферном воздухе и в топливе.

Объект исследования. Экологические аспекты эксплуатации воздушных судов и двигателей.

Предмет исследования. Каталитическая очистка выхлопных газов ГТД.

Целью работы является разработка предложений по повышению эффективности очистки выхлопных газов ГТД от вредных и токсичных компонентов.

Цель работы достигается посредством решения **следующих задач:**

1. Изучение современных способов снижения концентрации вредных веществ в выхлопных газах ГТД.
2. Выбор каталитических систем для эффективного восстановления NO_x в условиях работы ГТД.
3. Обоснование активности шпинельных структур в качестве катализаторов.
4. Предложения по размещению катализаторов для очистки выхлопных газов от вредных веществ без снижения эффективности работы ГТД.

Научная новизна работы.

1. Впервые предложено нанесение катализатора на лопатки турбины авиадвигателя для снижения концентрации оксидов азота NO_x в выходных газах.

2. Изучен процесс образования шпинельных структур в каталитических системах, содержащих ионы Cr, Zn, Sc.

Практическая значимость работы заключается в минимизации содержания оксидов азота в выхлопных газах авиационных ГТД с целью уменьшения негативного воздействия на атмосферу.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ ГТД

Современные решения по снижению вредных выбросов заключаются в реализации определенных схем камер сгорания (КС) ГТД и схем горения. Ниже представлены наиболее распространённые и эффективные варианты:

1. Сжигание обеднённой топливной смеси в «сухих» КС. Суть метода заключается в создании равномерного горения и снижении температуры пламени. Отсутствие локальных очагов горения с высокой температурой уменьшит выброс NO_x . В данном подходе предусматривают полное испарение жидкого топлива и мелкомасштабное перемешивание газообразного топлива с воздухом до начала горения.

2. Схема горения RQL (Rich-burn, Quick-mix, Lean-burn). Заключается в предварительном сжигании богатой топливной смеси при $\alpha = 0,5 \dots 0,7$, дальнейшим охлаждением продуктов сгорания и быстрым переходе из богатой смеси в бедную. Заключительный этап – горение бедной смеси. Получение низкой концентрации NO_x происходит в обеспечении закона выгорания диффузионного факела по длине жаровой трубы с температурой пламени, не превышающей температуры окисления азота ($\approx 1800 \text{ K}$) [15].

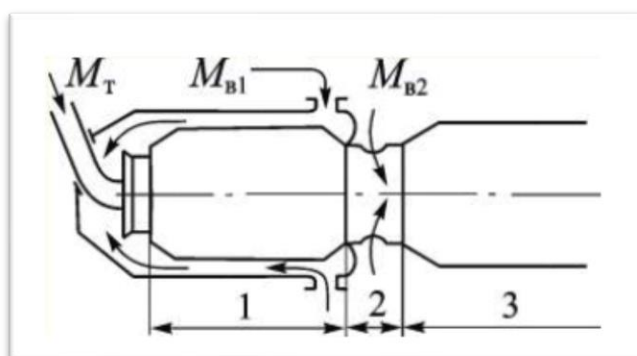


Рис. 1 – КС по схеме RQL. 1 – зона богатого горения, 2 – зона смешения, 3 – зона бедного горения [15]

3. Схема горения LPP (Lean Premixed Prevaporized burner). Горение обедненной предварительно смешанной смеси и испаренной смеси воплощено в конструкции двузонной КС. Её конструкция имеет наибольший потенциал в уменьшении выбросов NO_x по сравнению с другими конструкциями. Основная зона (ОЗ) на режимах больших тяг обеспечивает малые выбросы NO_x за счёт бедного состава смеси ($\alpha \approx 1,8$), при котором температура пламени поддерживается на низком уровне (1800 ... 1900 К). Дежурная зона (ДЗ) предназначена для обеспечения низкого уровня выбросов СО на режимах малого газа. Такая схема реализована в турбовентиляторном двигателе CFM-56 с двойной кольцевой камерой сгорания [15].

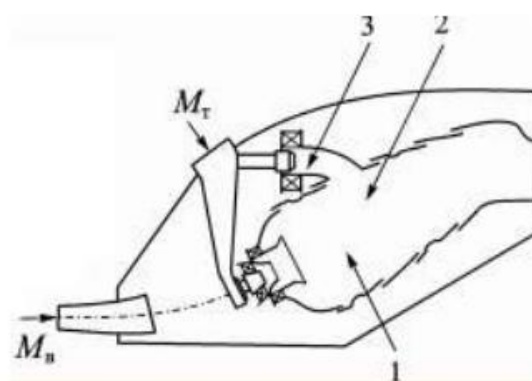


Рис. 2 – КС по схеме LPP. 1 – основная зона, 2 – зона смешения, 3 – дежурная зона

4. Каталитическое горение. Заключается в использовании катализаторов, которые уменьшают температуру воспламенения топлива до значений в 1200...1500 °К. Однако такие КС имеют ограниченный ресурс и сложную конструкцию.

Помимо представленных методов, существует способ очистки газовых выбросов на адсорбционном, абсорбционном и каталитическом методах. Наиболее эффективным методом является метод каталитической очистки.

К катализаторам очистки газов предъявляются весьма жесткие требования: высокая активность и избирательность каталитического действия, термостабильность, устойчивость к действию ядов, высокая механическая прочность, большая теплопроводность. Данные требования в нашем случае обусловлены температурами более 1000 °С и низким временем контакта воздуха с катализатором в силу скорости потока. Помимо этого катализаторы не должны быть потенциально опасными, а их производство не должно приносить

дополнительное загрязнение в окружающую среду. В настоящее время все большее распространение получают монокаталитические многокомпонентные системы, содержащие активные металлы на различных носителях. В качестве активного компонента используют один или несколько металлов: Mn, Fe, Cr, V, Mo, Co, Ce, Ni, W, Cu, Sn, Au, Pt, Pd, Rh и Ir. Существующие методы каталитической очистки газовых выбросов от оксидов азота основаны на восстановлении NO_x такими соединениями как аммиак, углеводороды, монооксид углерода и др. Для практического использования в этом процессе пригодны только те катализаторы, которые сохраняют свою активность в присутствии кислорода, являющегося конкурентом NO_x при взаимодействии с оксидом углерода. Поэтому большой избыток кислорода резко снижает конверсию NO_x [1].

Одними из наиболее перспективных на наш взгляд являются каталитические системы, содержащие в качестве основных компонентов следующие металлы: Ni, Zn, Co, Al, Fe и др. При их совместном присутствии на поверхности носителя при температуре 400 – 600 °C формируются соединения шпинельной структуры, активные в окислительно-восстановительных превращениях смеси CO и NO_x .

Нами были изучены системы, содержащие ионы Cr, Zn, Sc, в которых при определенных соотношениях формируется шпинель.

ФОРМИРОВАНИЕ ШПИНЕЛЬНЫХ СТРУКТУР В ОКСИДНЫХ СИСТЕМАХ

Создание новых катализаторов обеспечивает технический прогресс в важнейших отраслях промышленности, в том числе и в авиации. В связи с этим вопросу создания селективных каталитических систем для очистки газовых выбросов от оксидов азота и углерода, сохраняющих свои характеристики в различных, в том числе высокотемпературных, условиях эксплуатации посвящено значительное количество работ [1-3]. Как было показано выше наиболее перспективными катализаторами очистки газовых выбросов от таких вредных и токсичных веществ как монооксид углерода и оксиды азота различного состава являются шпинельные структуры.

Нами были изучены оксидные системы, содержащие ионы Al, Cr, Sc, Fe, Zn, Ni, Cu, в которых при определенных соотношениях формируется шпинель типа $\text{M(III)}_2\text{M(II)}\text{O}_4$. Это подтверждают результаты, полученные с помощью ИК-

спектроскопии, дифференциально-термического, рентгенофазового и химического анализов гидроксидно-оксидных систем Cr(III)-Zn(II), Fe(III)-Cu(II), Fe(III)-Ni(II) [4-7].

В практике использования катализаторов одним из важных моментов является получение развитой пористой структуры и значительной величины удельной поверхности [8], а также способ нанесения каталитически активного вещества на поверхность.

Исследование кислотно-основных характеристик, закономерностей их изменения в зависимости от внешних факторов позволит углубить представления о природе и структуре активных центров, приблизиться к пониманию их взаимосвязей с механизмом реакций, протекающих на поверхности, выявить закономерности изменения кислотности в зависимости от условий получения и состава материалов.

В качестве модельной системы был изучен оксид хрома(III), распределение на поверхности которого кислотно-основных центров Бренстеда и Льюиса по силе и количеству исследовалось спектрофотометрическим методом с помощью набора индикаторов, проявляющих кислотно-основные свойства в интервале значений pH от 4,4 до 17,2 [9].

Использованная при этом методика исследования кислотно-основных свойств поверхности позволила выполнить количественное определение суммарной кислотности по Льюису и Бренстеду с дифференциацией реакционных центров по типу и силе в зависимости от pK_a применяемого индикатора. Результаты представлены в таблице. Знак “–” соответствует однонаправленному изменению D_1 и D_2 относительно D_0 , т. е. D_1 и $D_2 < D_0$ или D_1 и $D_2 > D_0$. Знак “+” соответствует разнонаправленному изменению D_1 и D_2 относительно D_0 , т. е. $D_1 > D_0$, $D_2 < D_0$ или $D_1 < D_0$, $D_2 > D_0$.

Активность поверхности твердых оксидных соединений в различных химических реакциях можно описать набором Льюисовских и Бренстедовских кислотных и основных центров. В общем случае на поверхности твердого оксида металла можно выделить такие типы центров, с участием которых протекают процессы адсорбции, как электроноакцепторные орбитали катионов металла, электронодонорные ионы кислорода, гидроксильно-гидратный покров, образующийся при различных формах адсорбции молекул воды и других ионов из водного раствора [10].

Полученные экспериментальные данные, представленные в таблице и на рисунке 3, показывают, что распределение активных центров носит немонотонный и неоднородный характер, что проявляется в дискретности и достаточно четкой дифференциации полос адсорбции с максимумами разной интенсивности, отвечающими определенному значению pK_a .

Таблица – Результаты экспериментального изучения кислотно-основных свойств поверхности оксида хрома

Наименование индикатора	pK _a	λ _{max} , нм	C _{ind} , моль/мл	V _{ind} , мл	D ₀	a ₁ , г	D ₁	a ₃ , г	D ₂	q(pK _a) · 10 ⁴
2,4-Динитроанилин (ДНА)	– 4,4	340	0,928	0,5	0,608	0,02	0,622	0,02	0,618	1,526
о-нитроанилин (ОНА)	-0,29	410	0,838	0,5	0,312	0,02	0,317	0,02	0,336	12,758
Кристаллический фиолетовый (КФ)	+ 0,80	580	0,205	0,2	0,314	0,02	0,266	0,02	0,199	4,481
Фуксин (основной) (Ф-Н)	+ 2,1	540	0,173	0,2	0,134	0,02	0,144	0,02	0,157	1,552
Метанитроанилин (МНА)	+2,5	340	0,623	0,5	0,076	0,02	0,074	0,02	0,095	44,211
Метилловый оранжевый (МО)	+ 3,46	460	0,179	0,5	0,319	0,02	0,331	0,02	0,332	41,407
Бромфеноловый синий (БФС)	+ 4,10	590	0,307	0,2	0,863	0,02	0,744	0,02	0,830	3,059
Метилловый красный (МК)	+ 5,0	430	0,119	1,0	0,111	0,02	0,093	0,02	0,117	12,865
Бромкрезоловый пурпур (БКП)	+ 6,4	540	0,149	0,2	0,114	0,02	0,040	0,02	0,115	9,803
о-нитрофенол (ОНФ)	+6,9	280	0,899	1,0	0,281	0,02	0,311	0,02	0,257	86,477
Бромтимоловый синий (БТС)	+ 7,3	430	0,260	0,5	0,201	0,02	0,215	0,02	0,163	7,761
Феноловый красный (ФК)	+ 8,0	430	0,173	0,5	0,312	0,02	0,325	0,02	0,327	0,288
м-нитрофенол (МНФ)	+ 8,4	280	0,899	0,5	0,203	0,02	0,231	0,02	0,243	5,911
Тимоловый синий (ТС)	+ 8,8	430	0,296	0,3	0,200	0,02	0,216	0,02	0,209	15,750
Фенол (Ф-Л)	+ 10,0	270	0,212	2,0	0,169	0,02	0,161	0,02	0,247	101,775
Тропеолин О (ТО)	+ 12,0	440	0,207	0,5	0,381	0,02	0,263	0,02	0,350	10,157
Индигокармин (НК)	+ 12,8	610	0,199	0,2	0,120	0,02	0,128	0,02	0,127	0,166
Маннит (МН)	+ 13,13	200	0,112	1,5	0,257	0,02	0,031	0,02	0,274	581,498
Этиленгликоль (ЭГ)	+ 14,2	200	0,144	1,5	0,311	0,02	0,078	0,02	0,285	479,228
Динитротолуол (ДНТ)	+ 17,2	250	1,000	0,2	0,057	0,02	0,040	0,02	0,090	87,719

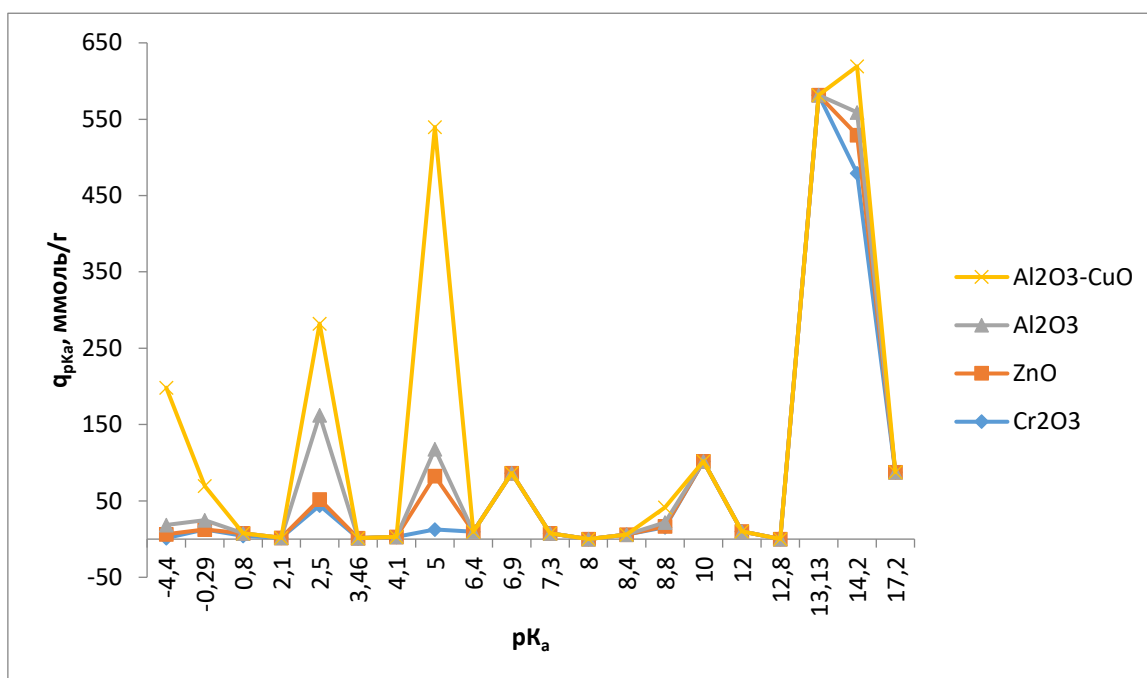


Рис. 3 – Распределение кислотно-основных центров на поверхности Cr₂O₃, ZnO [10], Al₂O₃ [11], Al₂O₃-CuO [11]

Область Льюисовских основных центров соответствует атомам кислорода, выходящим на поверхность. Причем таких центров на поверхности частиц оксида хрома(III) сравнительно немного (рис. 3). Льюисовских кислотных центров – атомов металла, выходящих на поверхность, преимущественное большинство в анализируемом образце. Присутствуют также Бренstedовские центры, формирующиеся на поверхности твердой фазы, а именно, на атомах металла кристаллической решетки оксида, в результате гидратации Льюисовских центров: это кислотные центры в виде OH^{δ+}-групп с частичным положительным зарядом на атоме водорода, нейтральные центры в виде OH-групп, и основные в виде O^{δ-}H-групп с частичным отрицательным зарядом на атоме кислорода гидроксогруппы. Их примерно одинаковое количество. Исследования [10, 11] кислотно-основных свойств поверхности оксида цинка, оксида алюминия и двойной системы Al(III)-Cu(II) указывают на аналогичное распределение кислотных и основных центров Льюиса и Бренстеда, что свидетельствует о близкой структуре поверхности рассматриваемых оксидов.

Сравнение кривых распределения кислотно-основных центров Al₂O₃ и в шпинельной фазе Al₂O₃-CuO свидетельствует о значительном увеличении активных центров в двойной системе, что обусловлено на наш взгляд формированием шпинельной структуры.

Известно, что структура шпинели состоит из тетраэдров и октаэдров (рис. 4), каждый ион кислорода принадлежит одновременно одному тетраэдру и трем октаэдрам. Все тетраэдры в шпинельной структуре обособлены друг от друга.

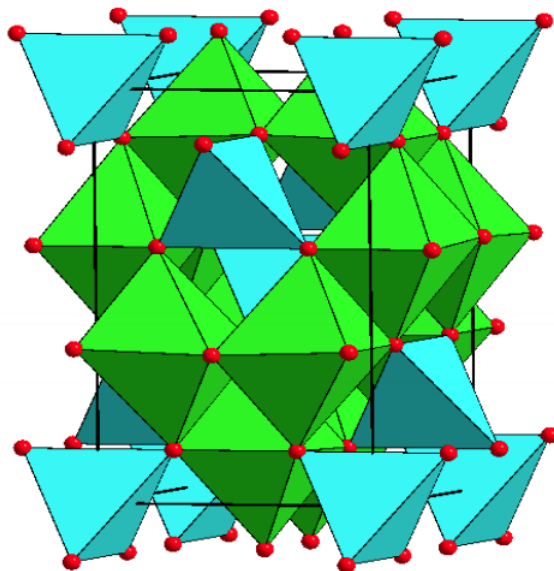
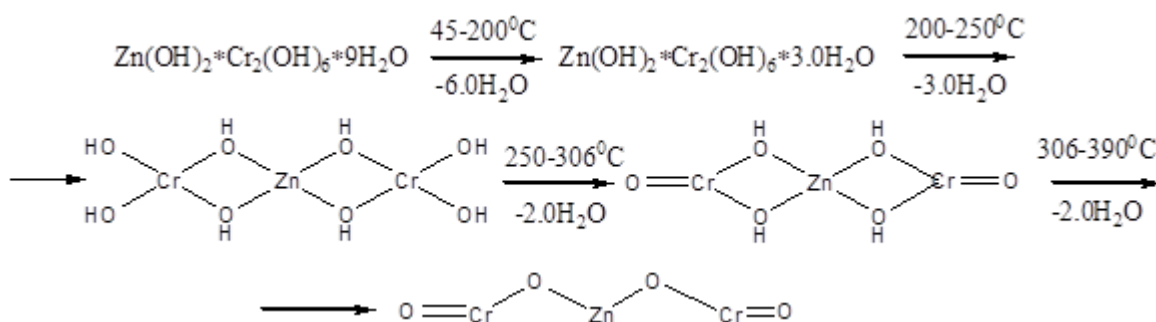


Рис. 4 – Структура шпинели в виде полиэдров (красные шары- атомы кислорода; атомы металлов расположены внутри октаэдров и тетраэдров) [12]

И атомы Cr(III), и атомы Al(III) образуют шпинельные структуры, причем возможны их взаимозамещения без нарушения кристаллической решетки в связи с их близкими размерами.

Рассмотрим процесс термолиза на примере гидроксидно-оксидной системы хрома(III)-цинка(II). Формирование шпинельной фазы при термическом разложении исходных гидроксидов с соотношением компонентов Cr(III):Zn(II)=2:1 происходит в следующей последовательности [4, 13]:



Результаты исследований методом ИК-спектроскопии подтверждают сделанные выводы.

Рентгенофазовый анализ свидетельствует о повышении степени кристалличности осадков с увеличением доли атомов цинка(II), причем все пики имеют хорошую сходимость [4]. В то же время необходимо отметить, что более низкая степень кристалличности двойных оксидных систем говорит о включении в структуру гидроксогрупп, атомов кислорода, обеспечивающих пористость структур оксидов и повышение содержания основных и кислотных центров на поверхности.

При этом основность поверхности, как правило, возрастает с увеличением донорной способности элемента. Сдвиг электронной плотности от атома элемента на орбиталь кислорода соответствует упрочению связи в гидроксогруппе и увеличению основности Бренстедовского центра. При полном переходе электрона от элемента на орбиталь кислорода наблюдается отрыв ОН-группы и образование Льюисовских кислотных центров.

В то же время снижение донорной способности энергетических уровней орбиталей атома выходящего на поверхность сопровождается увеличением кислотности поверхности твердых веществ. При этом происходит сдвиг электронной плотности от атома водорода на орбиталь атома кислорода и повышается кислотность поверхностного центра по Бренстеду [12]. При полном переходе электрона от атома водорода на орбиталь кислорода протон отрывается и образуется основной центр Льюиса.

Проведенные теоретические и практические исследования свойств поверхности шпинелей свидетельствуют об их активности в каталитических процессах и еще раз подтверждают, что в катализе химия поверхности имеет решающее значение.

По температуре эксплуатации шпинельные структуры на основе хрома характеризуются увеличением каталитической активности при $T = 900-950^{\circ}\text{C}$; шпинели на основе алюминия выдерживают температуры $\sim$ до 2000°C .

Температуры газов, проходящих лопатки турбины достигают 1500°C , следовательно, в качестве катализатора, нанесенного на лопатки можем использовать шпинели второго типа.

ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВРЕМЕНИ КОНТАКТА ГАЗОВ С КАТАЛИЗАТОРОМ

К сожалению, в авиации не получится применить известные способы установки катализатора, так как они значительно повлияют на течение газов в ГТД

и сделают его работу неэффективной или невозможной. Однако в ГТД катализатор можно наносить на сопловые аппараты и рабочие колёса.

Но в таком случае мы не сможем увеличить время контакта и объём проходящего воздуха в силу сохранения формы внешней поверхности лопатки. А это является необходимым фактором для повышения эффективности такой системы.

Рассмотрим возможные способы увеличения площади лопаток за счёт изменения их структуры и эффективные способы нанесения катализатора на гладкие лопатки:

1. Пористая структура лопатки (рис 6). Такое решение позволит большему объёму воздуха взаимодействовать с катализатором за счёт увеличения общей площади контакта. С технической точки зрения такой тип лопатки сложно реализуем и неприменим в подвижных частях ГТД из-за относительно низкой прочности.

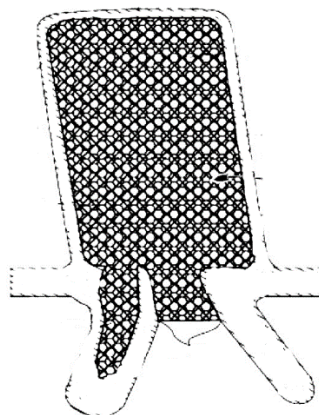


Рис. 6 – пористая лопатка

2. Лопатка с впадинами (рис. 7). Такое решение так же увеличит общую площадь поверхности, однако его реализация легче, нежели создание пористой лопатки. При этом такие впадины не оказывают значительного влияния на прочность лопатки. Однако для их применения необходимо произвести исследование аэродинамики поверхности такой формы и её возможность применения в газовоздушном тракте ГТД.

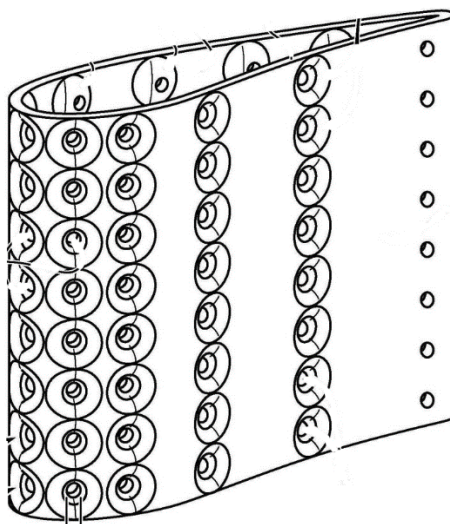


Рис. 7 – лопатка с впадинами

3. Покрытие катализатором с формированием сетчатой поверхности (рис. 8). Такое решение позволяет незначительно увеличить площадь контакта, однако не требует изменения структуры лопатки.

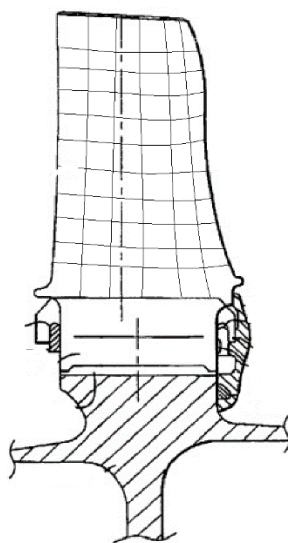


Рис. 8 – сетчатое покрытие катализатором (схематично)

В общем случае, такие виды лопаток и покрытий могут быть применены в выпрямителях потока, которые находятся за последним колесом турбины и не оказывают значительного влияния на поток воздуха внутри турбины ГТД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена разработке предложений по повышению эффективности очистки выхлопных газов ГТД от вредных и токсичных компонентов.

В работе рассмотрены существующие способы очистки выходных газов ГТД, оценена их эффективность. Показано, что наиболее перспективным на современном этапе развития науки и техники является метод каталитической очистки. Суть метода заключается в селективном восстановлении оксидов азота и окислении монооксида углерода с использованием катализаторов. Этот способ реализуем в условиях работы ГТД, то есть, при высокой температуре (более 1000 °С) и низких временах контакта газа и поверхности катализатора.

Нами были рассмотрены гидроксидно-оксидные системы, содержащие атомы хрома, алюминия, скандия, цинка, меди и никеля, образующие при определенных соотношениях шпинельные структуры. На основе результатов исследования рядом методов обоснована структура шпинелей и активность поверхности в каталитических процессах. Показано, что оптимальным является создание каталитических систем окислительно-восстановительных процессов очистки выхлопных газов от вредных компонентов на основе алюминия с рядом 3d-металлов, образующих шпинельные структуры.

Для достижения наибольшего времени контакта между газом и поверхностью катализатора и увеличения объема контактируемого газа предложены новые решения изменения структуры лопаток выправнителя потока. Предложенные виды лопаток и покрытий могут быть применены в выпрямителях потока, которые находятся за последним колесом турбины и не оказывают значительного влияния на поток воздуха внутри турбины ГТД.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмина Р.И., Севостьянов В.П. Каталитическая очистка газовых выбросов от оксидов азота и углерода // Росс. хим. журн. 2000. -Т. 44, №1. С. 71-77.
2. Гапонов В.Л., Бадалян Л.Х., Курдюков В.Н., Куренкова Т.Н. Современные методы снижения вредных выбросов с отработавшими газами автотранспорта // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – Вып. 6. – <http://ipb.mos.ru/ttb/2008-6/2008-6.html>.
3. Комаров Е.М. Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ // Машиностроение и компьютерные технологии. 2018. № 05. С. 9–29.
4. Телущенко Е.А., Кириллов А.М., Копылович М.Н., Баев А.К. Термолиз совместно осажденных гидроксидов хрома(III)-цинка(II) // Журн. неорг. химии. – 2003. – Т.48. № 9. – С. 305-312.
5. Телущенко Е.А., Кириллов А.М., Копылович М.Н., Баев А.К. Термолиз совместно осажденных гидроксидов хрома(III)-скандия(III) // Журн. неорг. химии. – 2004. – Т.49. № 2. – С. 309-315.
6. Евсей Е.А., Пупкевич В.Р., Кириллов А.М., Телущенко Е.А., Копылович М.Н., Баев А.К. Колебательные спектры совместно осажденных гидроксидов Fe(III)-M(II) (M(II) = Ni, Cu) и продуктов их термолиза // Журн. прикл. спектроскопии. – 2001. – Т.68, №5. – С.563-568.
7. Копылович М.Н., Кириллов А.М., Баев А.К. Термолиз совместно осажденных гидроксидов алюминия(III) и меди(II) // Журн. неорг. химии. – 2001. – Т.46. № 7. – С. 953-958.
8. Комаров В.С. Адсорбенты: Вопросы теории, синтеза и структуры. – Мн.: Беларуская навука, 1997. – 287 с.
9. Сорочкина Е.А., Смотраев Р.В., Калашников Ю.В., Груздева Е.В. Кислотно-основные свойства поверхности сферически гранулированных сорбентов на основе гидратированных оксидов циркония и алюминия // Вопросы химии и химической технологии. – 2013. – №6. – С.102-104.
10. Карпова С.С., Мошников В.А., Максимов А.И., Мякин С.В., Казанцева Н.Е. Исследование влияния кислотно-основных свойств поверхности оксидов ZnO, Fe₂O₃ и ZnFe₂O₄ на их газочувствительность по отношению к парам этанола // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, вып. 8. – С. 1022-1026.
11. Зубкова Д.Н., Зенкова Е.И., Бобохонова Е.Р. Исследование кислотно-основных центров поверхности медных катализаторов в процессе окисления СО // Инновационные процессы в химии, нефтехимии и нефтепереработке. Сборник трудов международной конференции. – ФГБОУ ВО СПбГТИ(ТУ), 20 – 21 октября 2016 года. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2016. – С. 14-16.
12. Шаскольская М.П. Кристаллография. М.: Высшая школа, 1976. – 391 с.

13. Riva A., Trifiro F., Vaccari A., Mintchev L., Busca G. Structure and Reactivity of Zinc-Chromium Mixed Oxides Part 2.- Study of the Surface Reactivity by Temperature-programmed Desorption of Metanol. // J.Chem.Soc.Faraday Trans.1. – 1988. – Vol. 84. - № 5. - P. 1423-1436.
14. Комаров Е.М., Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ // Машиностроение и компьютерные технологии, 2018. № 05. С. 9–29.
15. Матвеев С.Г., Лукачев С.В., Орлов М.Ю., Чечет И.В., Анисимов М.Ю., Красовская Ю.В. Расчет образования СО и NO_x в камерах сгорания ГТД // Самара, 2012.
16. Котович В.А., Юхневич С.Д., Телущенко Е.А., Степаненко В.Н. Некоторые аспекты авиатопливообеспечения // Авиация: история, современность, перспективы развития: сборник материалов III международной научно-практической конференции БГАА. Минск, 2018. С. 144–147.
17. Котович В.А., Стойко С.О., Шапорова Е.А. Оценка возможности моделирования масляной системы воздушного судна // МГТУГА, 2021.