

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

С. С. МАТВЕЕВ, Д. В. ИДРИСОВ

ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ И УСТАНОВКАХ: ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ АСПЕКТЫ

Монография

Одобрено редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве дополнительной литературы для обучающихся по основной образовательной программе по специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

САМАРА
Издательство Самарского университета
2026

УДК 621.452.3.02
ББК О551.41-043-011
М333

Рецензенты: д-р техн. наук, проф., профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского университета **В. А. Зрелов**;
канд. техн. наук, доц., заместитель начальника факультета летательных аппаратов Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
Т. В. Грасько

Матвеев, Сергей Сергеевич

М333 Водородное топливо в газотурбинных двигателях и установках: энергетические, экологические и конструктивные аспекты:
монография / *С. С. Матвеев, Д. В. Идрисов.* – Самара: Издательство Самарского университета, 2026. – 180 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-2309-1

В монографии рассмотрены вопросы применения водорода и метано-водородных смесей в камерах сгорания газотурбинных установок. Приведен обзор современных подходов к организации малоэмиссионного горения водородосодержащих топлив, проанализированы особенности их воспламенения, устойчивости горения и образования вредных выбросов. Описаны экспериментальная база, системы подготовки и подачи топлива, меры обеспечения безопасности при работе с водородом, а также результаты исследований модельных горелочных устройств и камер сгорания. Сформулированы практические рекомендации по разработке перспективных камер сгорания для газотурбинных установок, работающих на природном газе, метано-водородных смесях и водороде.

УДК 621.452.3.02
ББК О551.41-043-011

ISBN 978-5-7883-2309-1

© Самарский университет, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. ВОДОРОД И МЕТАНО-ВОДОРОДНЫЕ СМЕСИ КАК ТОПЛИВО ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК.....	12
1.1. Роль водорода в современной энергетике	12
1.2. Основные способы получения водорода	14
1.3. Хранение и транспортировка водорода	17
1.4. Метано-водородные смеси как переходное топливо	19
1.5. Преимущества и ограничения применения водорода в газотурбинных установках.....	22
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА И МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ	24
2.1. Основные свойства водорода как топлива	25
2.2. Пределы воспламеняемости и условия устойчивого горения.....	26
2.3. Нормальная скорость распространения пламени	28
2.4. Влияние доли водорода на воспламенение и развитие пламени.....	31
2.5. Особенности образования оксидов азота, оксида углерода и диоксида углерода	33
2.6. Проблемы протекания и срыва пламени при сжигании водородосодержащих топлив	34
ГЛАВА 3. СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТУ	38
3.1. Диффузионные схемы горения.....	39
3.2. Камеры сгорания с предварительным смешением	41

3.3. Пилотный и основной контуры	43
3.4. Быстрое смесеобразование	45
3.5. Кластерные горелочные устройства	47
3.6. Выбор схемы горения.....	50
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРЕНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ	
4.1. Назначение и структура экспериментального стенда	53
4.2. Система подготовки и подачи воздуха.....	55
4.3. Система подачи природного газа и водорода.....	58
4.4. Узел приготовления метано-водородных смесей.....	61
4.5. Подготовка стенда к испытаниям.....	64
4.6. Система измерения и регистрации параметров.....	68
4.7. Методика проведения испытаний	75
4.8. Результаты экспериментальных исследований.....	79
ГЛАВА 5. МОДЕЛЬНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И КАМЕРЫ СГОРАНИЯ	
5.1. Принципы построения модельных горелочных устройств	86
5.2. Горелочное устройство с двухконтурной подачей топлива	91
5.3. Конструкция модельной камеры сгорания	97
5.4. Жаровая труба и элементы охлаждения	100
5.5. Особенности изготовления и сборки экспериментальных образцов.....	104
5.6. Пусконаладочные работы и подготовка к огневым испытаниям	107

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ	111
6.1. Программа и условия проведения экспериментов	112
6.2. Диапазоны изменения состава топлива и режимных параметров	116
6.3. Влияние доли водорода на устойчивость горения.....	119
6.4. Влияние распределения топлива между контурами горелочного устройства	123
6.5. Влияние доли водорода в метано-водородном топливе на эмиссионные характеристики.....	127
6.6. Обобщение результатов и практические выводы	130
ГЛАВА 7. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ВОДОРОДНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ	137
7.1. Подходы к выбору схемы горелочного устройства	139
7.2. Рекомендации по организации предварительного смешения.....	144
7.3. Рекомендации по снижению эмиссии NOx	150
7.4. Рекомендации по обеспечению устойчивого горения.....	155
7.5. Направления дальнейшего развития камер сгорания на водороде и метано-водородных смесях	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	168
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	173

*Книга посвящается нашему Учителю,
Новатору, Ученому
Сергею Викторовичу Лукачеву*



Сергей Викторович Лукачев (07.08.1949 – 04.03.2026)

доктор технических наук, профессор,
член Поволжского отделения Российской академии космонавтики
имени К.Э. Циолковского (РАКЦ), председатель Самарского отделения
Российского общества тепло- и массообмена (РОТИМО),
заслуженный работник высшей школы РФ,
заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей
Самарского университета

ОТ АВТОРОВ

Сергей Викторович Лукачев более полувека своей жизни посвятил Самарскому университету, где состоялся как ученый, педагог и руководитель. Он был заведующим кафедрой теплотехники и тепловых двигателей, многие годы работал проректором университета, являлся заслуженным работником высшей школы Российской Федерации и автором свыше 240 научных трудов и более 25 учебных изданий.

Его отличали глубокая преданность университету, высокая научная культура, требовательность к себе и окружающим, внимание к людям и редкий талант наставника. Для коллег, учеников и последователей Сергей Викторович навсегда останется примером подлинного служения науке, высшей школе и Отечеству.

Настоящую книгу авторы посвящают светлой памяти своего Учителя – человека, чье научное и человеческое наследие продолжает жить в его трудах, учениках и в развитии той научной школы, которой он отдал всю свою жизнь.

Авторы выражают искреннюю благодарность кандидату технических наук, профессору кафедры теплотехники и тепловых двигателей Сергею Геннадьевичу Матвееву за ценные советы, заинтересованное внимание к работе и существенную помощь в подготовке настоящей монографии. Его профессиональный опыт и рекомендации способствовали содержательному и структурному совершенствованию книги. Авторы также выражают благодарность заведующему лабораторией исследования моделей камер сгорания ГТД НОЦ ГДИ Валерию Юрьевичу Абрашкину и инженеру НОЦ ГДИ Олегу Владимировичу Коломзарову за большую помощь в организации и проведении экспериментальных исследований.

ВВЕДЕНИЕ

В начале XXI века развитие энергетики определяется необходимостью одновременно обеспечивать надёжное энергоснабжение и снижать техногенную нагрузку на окружающую среду. Для газотурбинных установок это особенно актуально, поскольку к ним предъявляются высокие требования по эффективности, манёвренности и ресурсу при одновременном жёстком контроле выбросов NO_x , CO и CO_2 . В условиях декарбонизации и роста доли возобновляемых источников энергии усиливается интерес к топливам и схемам рабочего процесса, позволяющим совмещать низкие выбросы с высокой гибкостью газотурбинной техники.

Водород и метано-водородные смеси рассматриваются как одно из ключевых направлений такого развития. Водород рассматривается как важный энергоноситель низко-углеродной экономики. Его использование стало возможным благодаря длительному развитию технологий получения, хранения и транспортировки [1]. В переходный период особое значение приобретают метано-водородные смеси, позволяющие постепенно вводить водород в существующую газовую инфраструктуру без резкого отказа от природного газа и поэтапно отрабатывать вопросы рабочего процесса, безопасности и ресурса оборудования.

С точки зрения горения водород обладает рядом преимуществ: уменьшает углеродную составляющую процесса, расширяет пределы воспламеняемости, повышает нормальную скорость распространения пламени и улучшает устойчивость бедного горения, что особенно важно для малоэмиссионных камер сгорания [2, 3]. Одновременно высокая реакционная способность, широкие пределы воспламеняемости, повышенная скорость пламени и склонность

к проскоку в смесительные каналы усложняют проектирование горелочных устройств и требуют пересмотра традиционных подходов к смесеобразованию, стабилизации факела, распределению топлива между контурами и контролю коэффициента избытка воздуха и локальных температур.

Для промышленных газотурбинных камер сгорания эти особенности означают, что переход к водородосодержащим топливам не может сводиться к простой замене одного газа другим. Современные малоэмиссионные камеры, работающие на бедных предварительно перемешанных смесях, при добавке водорода сталкиваются с риском проскока пламени, изменением условий стабилизации и усилением влияния температурных пиков на эмиссию NOx [4]. Это требует целенаправленного развития как конструктивных решений, так и экспериментально-расчётной методологии их исследования [5-7].

Обзор литературных и экспериментальных данных показывает, что добавка водорода к метану увеличивает нормальную скорость распространения пламени и расширяет область устойчивого сжигания бедных смесей, снижая ограничения по составу топливно-воздушной смеси и открывая возможность уменьшения выбросов CO₂ [8]. Одновременно отмечаются проблемы высокой адиабатической температуры пламени, термического механизма образования NOx, проскока и срыва пламени, термоакустической чувствительности и повышенных требований к геометрии смесительных каналов и охлаждению элементов камеры [9, 10]. Достижение одновременно низких выбросов, высокой устойчивости и топливной гибкости оказывается возможным лишь при точной настройке схемы подвода топлива, структуры горелочного устройства и режимных параметров [11].

В мировой практике для решения этих задач развиваются схемы с предварительным смешением, комбинированные pilot/premix-подходы, многоконтурные малоэмиссионные горелки, микрофакельные

и кластерные концепции, ориентированные на снижение риска проскока пламени и расширение области устойчивой работы при высоких долях водорода [12-14]. Для отечественной науки и техники переход к водородосодержащим топливам требует не только освоения зарубежного опыта, но и создания собственной экспериментальной и методической базы: специализированных стендов, магистралей подачи водорода, узлов приготовления метано-водородных смесей, систем газового анализа и безопасности. Уже накопленные в этой области данные по горению смесей CH_4/H_2 и отработке модельных горелочных устройств создают основу для дальнейшего развития исследований.

Важную роль играют экспериментальные исследования при подогреве воздуха, варьировании состава топлива, наличии нескольких топливных контуров и изменении коэффициента избытка воздуха. Они позволяют перейти от общих представлений о свойствах водорода к конкретным инженерным выводам о допустимых режимах, устойчивости факела, эмиссионных характеристиках и требованиях к конструкции камеры сгорания. В этих условиях особое значение приобретает комплексный подход, сочетающий обзор современных представлений о водороде как перспективном топливе, анализ физико-химических и инженерных особенностей горения метано-водородных смесей, описание экспериментальной базы и модельных горелочных устройств и обобщение результатов исследований, направленных на создание устойчивых и малоэмиссионных камер сгорания.

Объектом исследования в монографии являются процессы горения водорода и метано-водородных смесей в модельных горелочных устройствах и камерах сгорания перспективных малоэмиссионных газотурбинных установок. Предмет исследования составляют закономерности влияния состава топлива, схемы его подачи, коэф-

фициента избытка воздуха, распределения между контурами и конструктивных особенностей горелочного устройства на устойчивость процесса горения и состав продуктов сгорания. Целью монографии является обобщение современных научных и инженерных представлений о сжигании водорода и метано-водородных смесей в газотурбинных установках и формирование на этой основе подходов к созданию малоэмиссионных камер сгорания и горелочных устройств, обеспечивающих устойчивое и безопасное горение в широком диапазоне режимов.

В работе сопоставляются фундаментальные представления о горении водорода и метано-водородных смесей, современные технические решения и результаты собственных экспериментальных исследований на специализированной стендовой базе. Акцент сделан на взаимосвязи состава топлива, схемы смесеобразования, устойчивости факела и эмиссионных характеристик малоэмиссионной камеры сгорания, а также на влиянии доли водорода, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха на входе и распределения топлива между пилотным и основным контурами на характеристики рабочего процесса. Полученные результаты и предложенные подходы могут быть использованы при создании и модернизации камер сгорания промышленных газотурбинных установок, рассчитанных на поэтапный переход от природного газа к метано-водородным смесям и высоким долям водорода.

ГЛАВА 1. ВОДОРОД И МЕТАНО-ВОДОРОДНЫЕ СМЕСИ КАК ТОПЛИВО ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Переход мировой энергетики к низкоуглеродному развитию связан с необходимостью одновременного снижения выбросов парниковых газов, повышения гибкости энергосистем и расширения использования возобновляемых источников энергии. При этом сами по себе солнечная и ветровая генерация не способны в полной мере обеспечить стабильное и управляемое энергоснабжение, поэтому все большее внимание уделяется энергоносителям, способным выполнять функцию накопления энергии и балансировки нагрузки. В этом контексте водород рассматривается как один из ключевых элементов будущей энергетической инфраструктуры, способный связывать производство, хранение, транспортировку и конечное потребление энергии в единую технологическую цепочку.

Интерес к водороду определяется не только его экологическим потенциалом, но и универсальностью применения. Он может использоваться в химической промышленности, транспорте, распределенной и централизованной энергетике, а также в газотурбинных установках различного назначения. Особое значение для настоящей работы имеет применение водорода и метано-водородных смесей в камерах сгорания ГТУ, где они могут выступать как средство снижения углеродного следа и одновременно как инструмент повышения устойчивости горения бедных смесей.

1.1. Роль водорода в современной энергетике

В настоящее время водород уже широко используется в промышленности, однако основная часть его потребления приходится

не на электроэнергетику, а на нефтепереработку и химическое производство, прежде всего на выпуск аммиака и метанола. По данным, приведенным в имеющемся обзоре, использование водорода непосредственно в энергетическом секторе пока оценивается не более чем 2 % от общего объема его потребления (рисунок 1.1). Это означает, что энергетика остается не основным, а перспективным направлением развития водородных технологий [1].

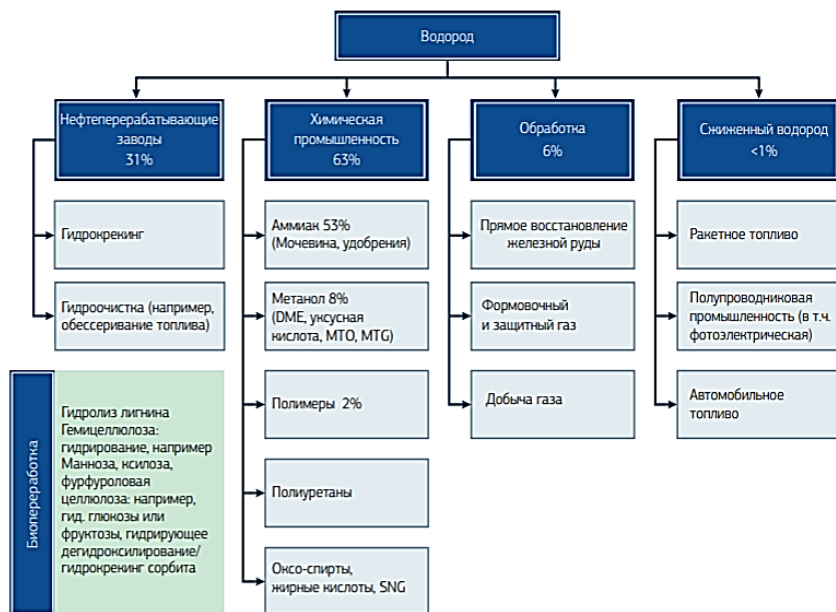


Рисунок 1.1. Структура мирового спроса на водород по основным направлениям использования по данным International Energy Agency (IEA)

По приведенным данным, мировой объем производства водорода составляет около 70 млн т в год, а среднегодовые темпы роста за последние два десятилетия остаются сравнительно умеренными – порядка 1,6 %. Более 90 % водорода производится непосредственно

в местах потребления, тогда как на рынок промышленных поставок приходится менее 10 %. Такая структура показывает, что сегодня водородная экономика еще не является полноценно распределенной и в значительной степени привязана к локальным промышленным площадкам.

В энергетике водород особенно интересен как средство долгосрочного аккумулирования энергии и как топливо для регулируемой генерации. Высокая топливная гибкость современных газовых турбин позволяет использовать не только природный газ, но и смеси с водородом, что открывает путь к постепенному снижению углеродных выбросов без немедленного отказа от существующей газовой инфраструктуры. В обзоре также отмечено, что газовые турбины играют важную роль в балансировке энергосистем, особенно в условиях роста доли нестабильной возобновляемой генерации.

Одновременно водород не следует рассматривать как универсальное решение без ограничений. Его широкое внедрение сдерживается высокой стоимостью низкоуглеродного производства, сложностями хранения и транспортировки, требованиями к безопасности, а также необходимостью модернизации камер сгорания и топливной аппаратуры. Поэтому на современном этапе наиболее реалистичным направлением является не мгновенный переход на чистый водород, а постепенное расширение применения водородосодержащих топливных смесей.

1.2. Основные способы получения водорода

В настоящее время основная часть водорода производится из ископаемого углеводородного сырья (рисунок 1.2). Лишь 2 % производства водорода приходится на электролиз воды [15]. Эта структура обусловлена прежде всего экономикой процесса: производство водорода из природного газа пока остается существенно дешевле электролиза.

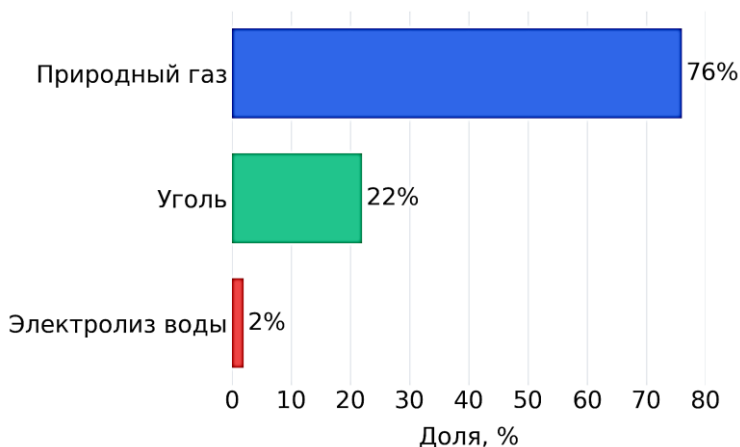


Рисунок 1.2. Структура мирового производства водорода по основным способам получения, %

Наиболее распространенной промышленной технологией является паровой риформинг метана (SMR). В этом процессе метан взаимодействует с водяным паром при температурах 700–1000 °С и давлениях 3–25 бар с образованием смеси водорода, оксида углерода и диоксида углерода, а ключевую роль в процессе играет никелевый катализатор. Преимуществами данной технологии являются зрелость, высокая производительность и сравнительно низкие капитальные затраты, однако ее существенным недостатком остаются выбросы CO₂, из-за чего все большее значение приобретают схемы с улавливанием углерода.

Альтернативой паровому риформингу является частичное окисление метана (POX). Этот процесс протекает быстрее и требует меньше внешнего подвода тепла, но характеризуется меньшим выходом водорода на единицу сырья. Поэтому выбор между SMR и POX определяется не только термодинамическими, но и технологическими, экономическими и компоновочными соображениями (рисунок 1.3).

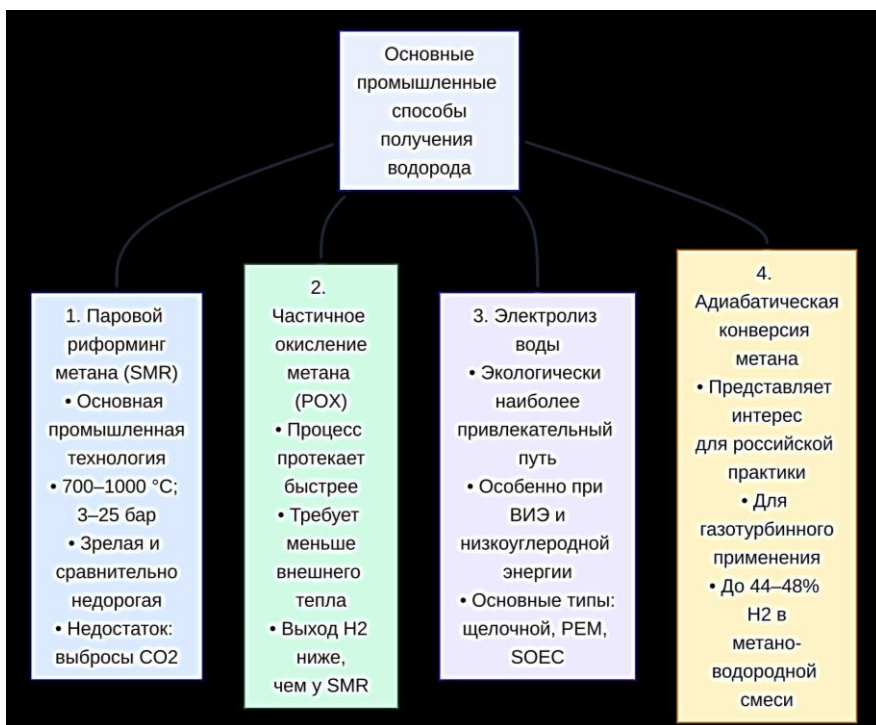


Рисунок 1.3. Основные промышленные способы получения водорода

Наиболее привлекательным с экологической точки зрения является электролиз воды, особенно при питании от возобновляемых источников энергии. Выделяют три основные группы электролизеров: щелочные, PEM-электролизеры и твёрдооксидные системы, различающиеся по температурному диапазону, рабочему давлению, стоимости и эффективности. Щелочные электролизеры рассматриваются как наиболее зрелые и относительно недорогие, PEM-системы – как более гибкие и пригодные для переменных режимов, а SOEC – как наиболее перспективные по эффективности, но более сложные по материалам и эксплуатации.

Для российской практики особый интерес представляет также адиабатическая конверсия метана, позволяющая получать метано-водородные смеси при меньших температурах и без столь энергоёмких стадий, как электролиз воды и производство кислорода. Данная технология может обеспечивать содержание водорода в смеси в диапазоне до 44–48 % по объему в зависимости от режима процесса. Именно поэтому она представляет интерес не только как способ получения водорода, но и как технологическая база для выработки переходного топлива, непосредственно пригодного для газотурбинного применения.

1.3. Хранение и транспортировка водорода

Одной из ключевых проблем водородной энергетики является не столько сам факт получения водорода, сколько обеспечение его безопасного и экономически оправданного хранения и транспортировки. Это связано с низкой объемной плотностью водорода, его высокой диффузионной способностью и жесткими требованиями к материалам и герметичности оборудования. Поэтому выбор формы хранения во многом определяет будущую область применения водорода.

Наиболее распространенным вариантом для крупных масштабов считается транспортировка сжатого водорода по трубопроводам. В материалах главы указано, что рабочее давление в трубопроводах может составлять 30–100 бар, а для хранения и транспортировки в специальных сосудах применяются давления до 700 бар [16]. Достоинством такого подхода является технологическая понятность и возможность накопления значительных объемов, однако компримирование требует дополнительных энергетических затрат.

Другим важным направлением является использование жидкого водорода. При температуре ниже $-252,87^{\circ}\text{C}$ водород переходит

в жидкое состояние, а плотность хранения по сравнению с газообразным водородом при нормальных условиях возрастает примерно в 800 раз [17]. Однако это преимущество достигается ценой сложной криогенной инфраструктуры, высоких энергозатрат на сжижение и необходимости предотвращения потерь на испарение.

Помимо хранения самого водорода, активно рассматриваются химические носители. Аммиак интересен благодаря высокой плотности хранения и более мягким условиям сжижения, а жидкие органические носители водорода (ЛОНС) – благодаря безопасности и совместимости с инфраструктурой жидких топлив [18]. В то же время оба варианта требуют дополнительных стадий выделения водорода, что снижает суммарную энергетическую эффективность цепочки [19].

По оценкам IEA, выбор способа транспортировки водорода определяется прежде всего расстоянием поставки и необходимостью дополнительных стадий конверсии и реконверсии. При сравнительно небольших расстояниях более выгодным обычно оказывается трубопроводный транспорт газообразного водорода, тогда как при дальних, особенно морских, перевозках возрастают преимущества аммиака и жидких органических носителей водорода. Стоимости транспортировки по оценкам IEA представлена в таблице 1.1.

С точки зрения газотурбинной энергетики наиболее привлекательными являются варианты, минимизирующие число промежуточных стадий между производством и сжиганием топлива. Именно поэтому в ряде случаев рациональным оказывается совместное размещение установок производства водорода, систем подготовки смеси и энергетического оборудования на одной площадке. Такой подход уменьшает транспортные риски, снижает инфраструктурные издержки и облегчает внедрение опытно-промышленных схем.

Таблица 1.1. Стоимостные оценки IEA для основных способов транспортировки водорода

Способ транспортировки	Стоимость, USD/кг H₂	Примечание
Газообразный водород по трубопроводу	1.0	Ориентир для магистральной передачи водорода
Аммиак: конверсия и транспортировка	1.5	Включает превращение водорода в аммиак и его передачу
ЛОНС: морская транспортировка и конверсия	0.6	Без учета обратного превращения в чистый водород
Аммиак: морская транспортировка и конверсия	1.2	Без учета обратного превращения в чистый водород
Жидкий водород: морская транспортировка и сжижение	2.0	Более высокая стоимость связана с энергоёмким сжижением

1.4. Метано-водородные смеси как переходное топливо

На современном этапе развития энергетики метано-водородные смеси представляют собой наиболее реалистичный путь перехода от традиционного газового топлива к водородной энергетике. Такой подход позволяет использовать существующие газотурбинные установки и топливную инфраструктуру, постепенно увеличивая долю низкоуглеродной компоненты в топливе. Кроме того, добавка водорода меняет характеристики горения смеси в благоприятную для малоэмиссионных камер сгорания сторону.

В обзорных материалах отмечено, что даже небольшие добавки водорода улучшают воспламеняемость и устойчивость горения бедных метано-воздушных смесей [20]. В частности, наличие водородной компоненты позволяет расширить пределы устойчивой работы горелочных устройств и снизить ограничения по составу топливно-воздушной смеси. Для малоэмиссионных камер сгорания это особенно важно, поскольку именно работа на бедных смесях является основным средством ограничения эмиссии NO_x .

Свойства метана и водорода существенно различаются (рисунок 1.4). Низшая теплота сгорания водорода составляет около 120 МДж/кг, тогда как для метана она составляет около 50 МДж/кг, а нормальная скорость распространения пламени у водорода на порядок выше, чем у метана [21]. Поэтому добавление водорода к природному газу одновременно повышает реакционную способность смеси и изменяет требования к организации смесеобразования и стабилизации пламени.

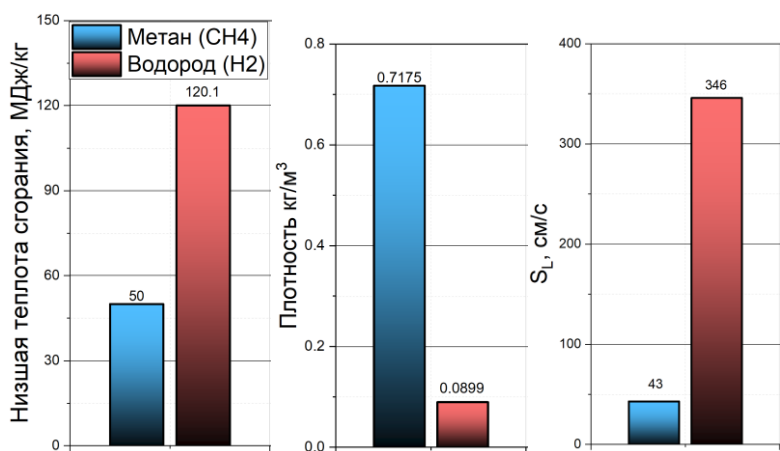


Рисунок 1.4. Сравнение свойств метана, водорода и метано-водородных смесей

С практической точки зрения метано-водородные смеси интересны еще и тем, что позволяют снижать углеродный индекс топлива. В обзоре отмечено, что повышение доли водорода в топливе сопровождается снижением выбросов CO_2 , причем эта зависимость носит закономерный характер и может быть наглядно показана графически. Дополнительно в российских материалах указывается, что использование МВС, полученной адиабатической конверсией метана, в ряде случаев позволяло снижать выбросы CO_2 примерно на 30 % (рисунок 1.5).

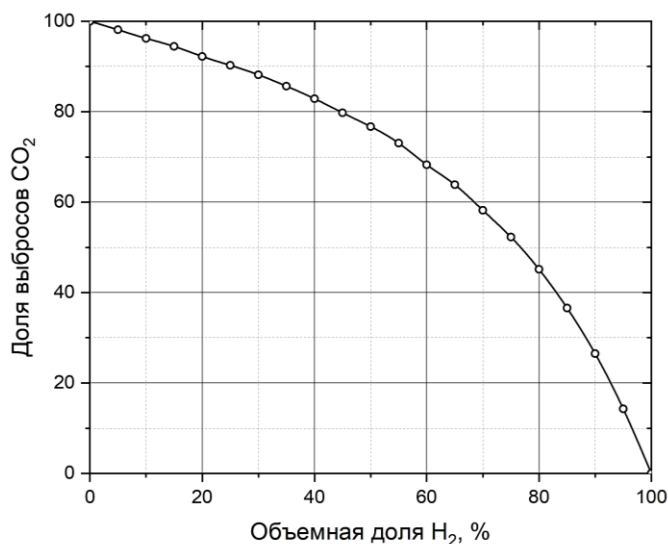


Рисунок 1.5. Выбросы CO_2 в зависимости от доли водорода в топливе

В одном из приведенных исследований отмечено, что применение метано-водородных смесей позволило получить низкие значения токсичных выбросов NO_x порядка 11 мг/м³ и CO порядка 20 мг/м³ при одновременном расширении диапазона устойчивой ра-

боты горелки примерно в два раза [22]. Для новых мощных газотурбинных агрегатов также указывалась возможность снижения расхода газа на 8–16 % и уменьшения выбросов NOx до уровня ниже 25 мг/нм³ в зависимости от принятых проектных решений [23]. Эти результаты подтверждают, что МВС может рассматриваться не только как промежуточное, но и как технологически полезное топливо с точки зрения совершенствования рабочего процесса камер сгорания.

1.5. Преимущества и ограничения применения водорода в газотурбинных установках

Применение водорода и водородосодержащих смесей в ГТУ обладает рядом очевидных преимуществ. Прежде всего это снижение выбросов CO₂, возможность интеграции с возобновляемой энергетикой, а также повышение гибкости энергосистем за счет использования газотурбинных установок в регулируемом режиме. Дополнительным достоинством является возможность постепенной модернизации существующих турбин без немедленного отказа от уже освоенной производственной и эксплуатационной базы.

В имеющихся материалах отмечено, что первые этапы модернизации могут быть связаны с введением умеренных долей водорода в природный газ. Указывается, что добавление до 30 % водорода по объему может обеспечивать заметное снижение углеродной составляющей топлива, а дальнейшее развитие технологий должно привести к созданию камер сгорания для 100 % водорода. Тем самым метано-водородные смеси выступают естественным промежуточным этапом между традиционной газовой и будущей водородной энергетикой.

Однако использование водорода в ГТУ связано и с серьезными ограничениями. Водород характеризуется высокой скоростью распространения пламени, широкими пределами воспламеняемости,

повышенной склонностью к проскоку пламени и необходимостью более строгого контроля за смесеобразованием и подачей топлива [24]. Кроме того, переход на водород требует решения задач, связанных с безопасностью, подбором материалов, герметичностью топливной аппаратуры и ограничением эмиссии оксидов азота.

С инженерной точки зрения особенно важно, что современные диффузионные схемы горения могут обеспечивать работу на водороде, но при этом нередко сопровождаются повышенными выбросами NOx [25]. Поэтому ключевым направлением развития становятся малоэмиссионные технологии сжигания бедных предварительно перемешанных смесей, требующие более сложной конструкции горелочных устройств и точного управления процессом [26-28]. Именно эта задача в дальнейшем определяет переход от общих вопросов применения водорода к анализу физико-химических особенностей его горения и конструктивных решений камер сгорания.

Таким образом, водород и метано-водородные смеси следует рассматривать не как абстрактную альтернативу традиционным топливам, а как реальный технологический ресурс, уже сегодня способный изменить подходы к проектированию и модернизации газотурбинных установок. Наиболее рациональной стратегией на ближайшую перспективу является сочетание развития технологий производства низкоуглеродного водорода, создания безопасной инфраструктуры его хранения и транспортировки, а также поэтапного внедрения метано-водородных смесей в энергетические камеры сгорания. Такой подход позволяет совместить экологические цели с инженерной реализуемостью и формирует основу для дальнейшего исследования рабочих процессов горения водородосодержащих топлив в ГТУ.

ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА И МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ

Применение водорода и метано-водородных смесей в газотурбинных установках определяется не только их экологическим потенциалом, но и существенным отличием их физических и химических свойств от свойств традиционного природного газа. Именно эти отличия определяют требования к смесеобразованию, стабилизации пламени, системам подачи топлива, организации малоэмиссионного горения и обеспечению безопасности эксплуатации. Поэтому для разработки камер сгорания, способных надёжно работать на водородосодержащем топливе, необходимо рассмотреть ключевые особенности воспламенения, распространения пламени, образования вредных веществ, а также характерные пределы устойчивости процесса горения.

Водород обладает высокой удельной теплотой сгорания по массе, малой плотностью, высокой диффузионной способностью и существенно большей скоростью распространения пламени, чем метан (таблица 2.1).

Таблица 2.1. Сравнение свойств метана и водорода

Показатель	Метан	Водород
Плотность при 0 °С, 1 бар	0.717 кг/м ³	0.089 кг/м ³
Низшая теплота сгорания	50 МДж/кг	120 МДж/кг
Стехиометрический коэффициент	17.2	34.3
Нормальная скорость пламени	40 см/с	200 см/с
Пределы воспламеняемости в воздухе	5–15 % об.	4–77 % об.

В приведенных материалах указано, что низшая теплота сгорания водорода составляет около 120 МДж/кг, а для метана – около 50 МДж/кг, при этом нормальная скорость распространения пламени для стехиометрической водородо-воздушной смеси достигает порядка 200 см/с, тогда как для метана она составляет около 40 см/с. Такая совокупность свойств делает водород одновременно перспективным и сложным топливом для газотурбинной техники.

2.1. Основные свойства водорода как топлива

С инженерной точки зрения водород отличается от метана прежде всего сочетанием высокой реакционной способности и малой объемной плотности. Его малая плотность требует повышенных расходов по объему и влияет на работу топливных магистралей, форсунок и систем регулирования, а высокая химическая активность определяет особенности воспламенения и стабилизации пламени. Для камер сгорания ГТУ это означает, что простая замена метана на водород без изменения конструкции, как правило, невозможна.

Особенно важным параметром для практического использования газообразных топлив является индекс Воббе, определяющий энергетическое содержание единицы объема топлива при подаче через дросселирующие элементы (рисунок 2.1).

При переходе от метана к водородосодержащим смесям индекс Воббе изменяется нелинейно, что влияет на тепловой баланс горелки, параметры смесеобразования и настройки системы управления подачей топлива и воздуха. Следовательно, при росте доли водорода требуется не только корректировка расходных характеристик, но и адаптация всей логики управления камерой сгорания.

Индекс Воббе рассчитывается по формуле:

$$WI = \frac{Q_v}{\sqrt{d}},$$

где Q_v – теплота сгорания газа (МДж/м³); d – плотность газа относительно воздуха.

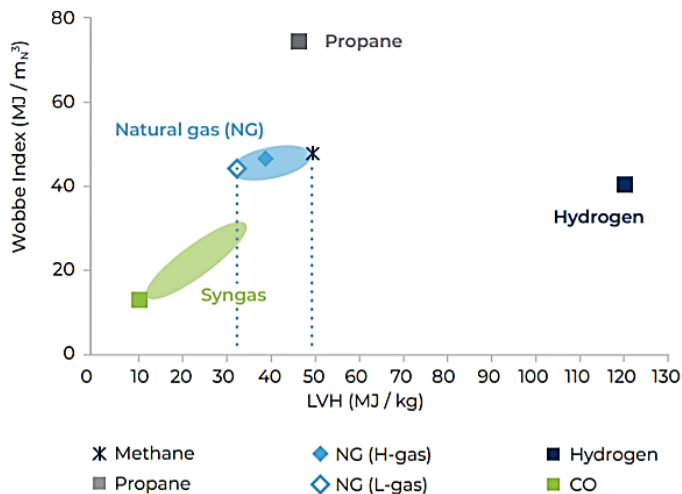


Рисунок 2.1. Индекс Воббе смеси метан-водород
в зависимости от объёмной доли водорода

Еще одной принципиальной особенностью водорода является его высокая диффузионная способность. С одной стороны, это облегчает перемешивание с воздухом и способствует формированию более однородной смеси, а с другой – повышает риск нештатного распространения пламени в зону смесеобразования и предъявляет более жесткие требования к герметичности топливной аппаратуры. Таким образом, физические свойства водорода напрямую переходят в конструктивные ограничения камеры сгорания и топливной системы.

2.2. Пределы воспламеняемости и условия устойчивого горения

Одной из наиболее важных характеристик водорода как топлива являются его широкие пределы воспламеняемости. В имеющихся материалах указано, что концентрация водорода в воздухе

в диапазоне 4–75 % по объему образует воспламеняемую смесь, а пределы детонации составляют примерно 15–59 % по объему. По сравнению с метаном это означает существенно более широкий диапазон потенциально опасных и одновременно потенциально рабочих концентраций.

Широкие пределы воспламеняемости делают водород привлекательным с точки зрения устойчивого сжигания бедных смесей. В обзорных материалах показано, что добавка водорода может смещать область устойчивого горения в сторону более бедных смесей и более низких температур адиабатического горения, что особенно важно для малоэмиссионных камер сгорания. Именно поэтому водород или метано-водородные смеси рассматриваются как средство повышения устойчивости ультрабедного горения в ГТУ.

В то же время расширение пределов воспламеняемости не означает автоматического расширения рабочего диапазона по всем режимам. В одном из приведенных обзоров отмечено, что при определенных конфигурациях горелок диапазон устойчивости между срывом пламени и проскоком внутрь горелочного устройства при объемной доле водорода 10–50 % может, наоборот, становиться уже, чем при использовании чистого метана [29–31]. Это означает, что влияние водорода на устойчивость всегда должно рассматриваться совместно с конкретной геометрией горелки, распределением воздуха и топлива и режимом работы камеры (рисунок 2.2).

Для практики газотурбинных камер сгорания устойчивое горение определяется не только химическими свойствами топлива, но и аэродинамической организацией течения [32]. Наличие зон рециркуляции, интенсивность закрутки потока, распределение топлива между пилотным и основным контурами, а также температурный уровень воздуха на входе существенно влияют на положение фронта пламени и запас по устойчивости [33, 34].

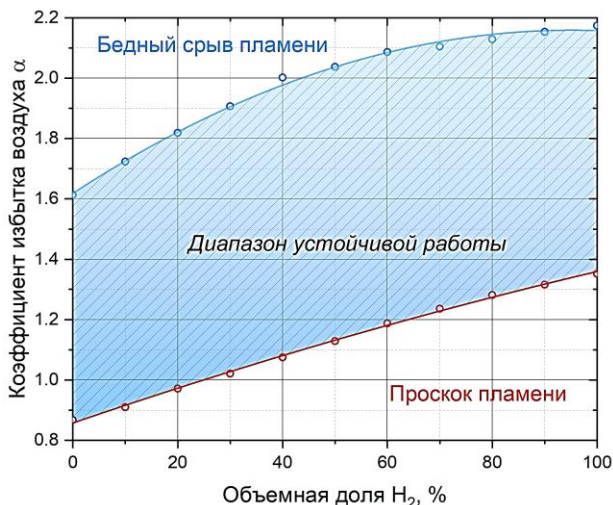


Рисунок 2.2. Карта устойчивой работы при горении метано-водородных смесей в зависимости от содержания водорода и коэффициента избытка воздуха

Именно по этой причине водородосодержащие топлива требуют согласованного выбора и состава смеси, и схемы горелочного устройства.

2.3. Нормальная скорость распространения пламени

Скорость распространения пламени является одним из ключевых параметров, определяющих возможность безопасного и устойчивого сжигания водородосодержащего топлива. По данным обзорных материалов, при стехиометрических условиях нормальная скорость распространения пламени для водорода на порядок выше, чем для метана, что и создает один из главных конструктивных вызовов при переходе на водород. Чем выше скорость пламени, тем выше риск того, что пламя начнет распространяться навстречу потоку в каналы предварительного смешения.

С увеличением доли водорода скорость пламени возрастает, но характер этого роста зависит от давления (рисунок 2.3) и состава смеси (рисунок 2.4). При содержании водорода до примерно 60 % увеличение скорости пламени носит относительно плавный характер, тогда как при высоких долях водорода, особенно свыше 80–90 %, наблюдается более резкий рост, свидетельствующий о доминировании водородной химии окисления. Это означает, что переход от умеренных добавок водорода к высоководородным смесям не является линейным по своим последствиям для конструкции камеры сгорания.

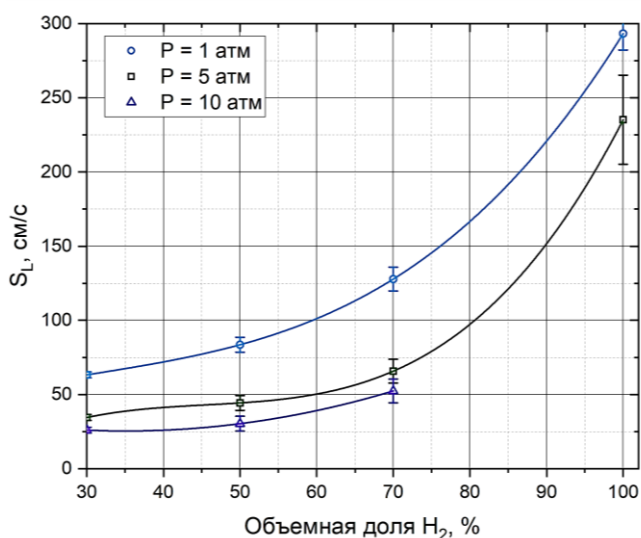


Рисунок 2.3. Нормальная скорость распространения пламени метано-воздушной смеси в зависимости от содержания водорода при различных давлениях

Существенное влияние на скорость пламени оказывает давление. При повышении давления абсолютное значение нормальной

скорости пламени снижается, а эффект добавления водорода становится менее выраженным, чем при атмосферном давлении. Однако даже в этих условиях общая тенденция сохраняется: водородная добавка способствует интенсификации горения и повышению реакционной способности смеси.

Для малоэмиссионных камер сгорания рост скорости пламени имеет двойственное значение. С одной стороны, он позволяет поддерживать горение бедных смесей и снижать эмиссию CO, а с другой – уменьшает запас по проскоку пламени и повышает требования к скоростям потока в смесительном тракте. Поэтому водородная добавка полезна только в том случае, если аэродинамика горелки и циклограмма подачи топлива соответствуют новой кинетике горения.

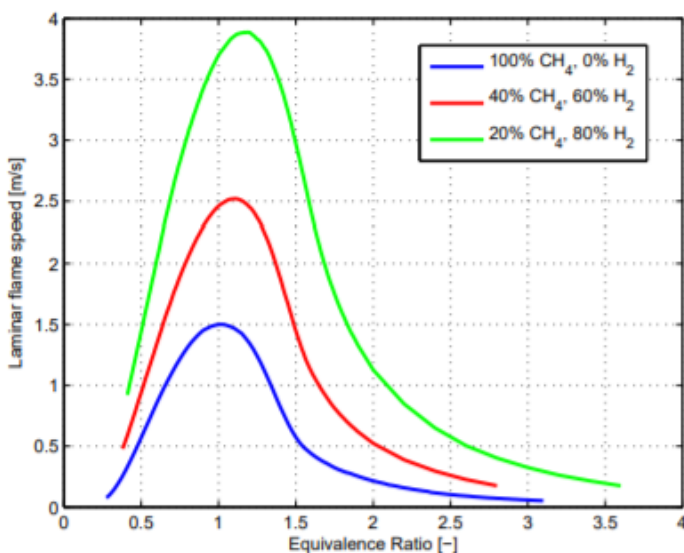


Рисунок 2.4. Нормальная скорость распространения пламени от коэффициента избытка топлива для различного содержания водорода

2.4. Влияние доли водорода на воспламенение и развитие пламени

Одним из важнейших эффектов добавления водорода к метану является изменение времени задержки воспламенения (рисунок 2.5). В обзоре приведены данные, согласно которым добавка водорода к метану может уменьшать время задержки воспламенения в 1,5–2,5 раза в диапазоне начальных температур 1000–2000 К и давлений 5–20 бар. Для камер сгорания это означает более быстрое протекание начальной стадии горения и более высокую склонность смеси к самовоспламенению в неблагоприятных зонах тракта.

Сокращение времени задержки воспламенения особенно важно для высокотемпературных и высоконапорных газотурбинных камер сгорания. В материалах по технологиям сжигания водородосодержащего топлива прямо отмечено, что при высоких долях водорода возрастает риск самовоспламенения из-за меньшего времени индукции и более высокой реакционной способности смеси. Именно поэтому в системах предварительного смешения особое значение приобретают длина канала, температура стенок, локальное время пребывания смеси и распределение рециркуляционных зон [35].

Добавление водорода влияет не только на момент воспламенения, но и на последующее развитие пламени. В литературном обзоре указывается, что водородная компонента позволяет расширить область устойчивого горения, а в ряде исследований ее присутствие примерно вдвое расширяло диапазон устойчивой работы горелки по скорости воздуха. Это делает метано-водородные смеси особенно интересными для камер сгорания, работающих на бедных смесях и подверженных риску срыва пламени на частичных режимах.

Однако этот положительный эффект сопровождается повышенной чувствительностью пламени к геометрии фронтного устройства. При определенных сочетаниях доли водорода, температуры

воздуха и аэродинамики может происходить резкое смещение положения фронта пламени к форсунке или в каналы смешения, что уже относится к режиму проскока. Следовательно, оптимальная доля водорода определяется не только экологическими соображениями, но и запасом устойчивости конкретного горелочного устройства.

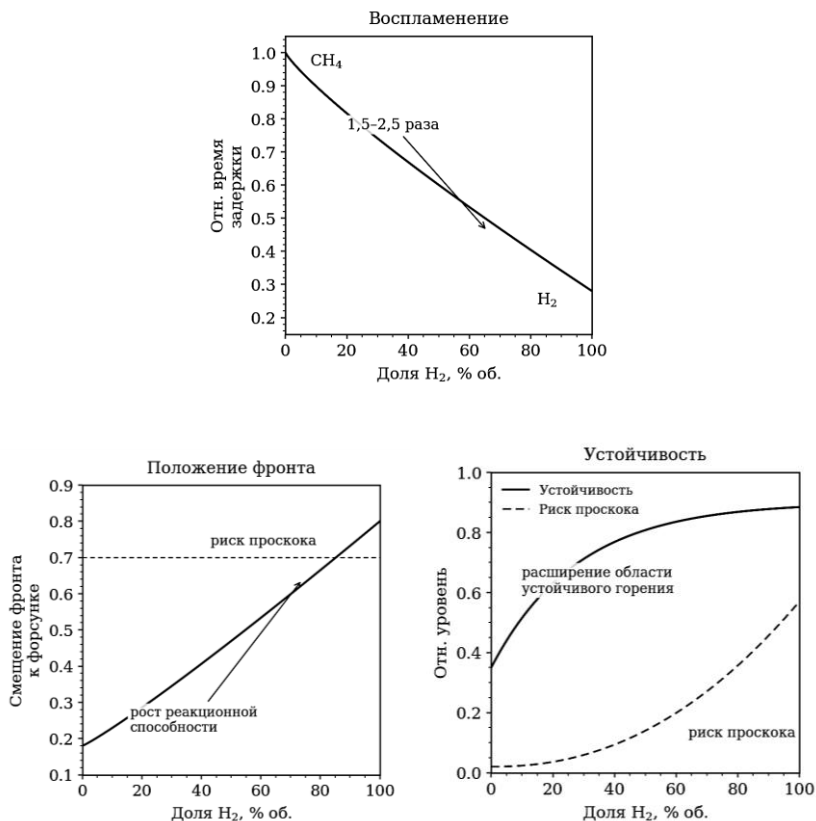


Рисунок 2.5. Схематическое влияние доли водорода на время задержки воспламенения, положение фронта пламени и диапазон устойчивости

2.5. Особенности образования оксидов азота, оксида углерода и диоксида углерода

Основным экологическим преимуществом водорода считается отсутствие прямого образования CO_2 при его полном сгорании. Поэтому при увеличении доли водорода в составе топливной смеси углеродный индекс топлива закономерно снижается, а выбросы углекислого газа уменьшаются. Именно этот эффект делает водород и метано-водородные смеси важным инструментом декарбонизации газотурбинной энергетики.

В то же время при сжигании водорода возникает другой серьезный экологический вызов – образование оксидов азота. В материалах главы 2 отмечено, что более высокая температура пламени водорода и наличие локальных перегретых зон в камере сгорания приводят к интенсификации термического механизма образования NO_x , а стандартные горелки, разработанные под природный газ, при переводе на водород могут давать выбросы порядка 50–100 ppm. При этом современные экологические требования для промышленных установок ориентируют разработчиков на уровни существенно ниже, что и стимулирует развитие технологий dry low emissions [36].

Для малоэмиссионных камер сгорания ключевым способом подавления NO_x остается снижение температуры в зоне горения за счет предварительного смешения и обеднения смеси. Сухой метод снижения выбросов основан на гомогенизации и обеднении топливовоздушной смеси, однако при температурах горения ниже определенного уровня возрастает риск срыва пламени и ухудшается полнота сгорания топлива [37]. Отсюда возникает фундаментальное противоречие: меры по снижению NO_x часто приближают систему к границе устойчивости, а добавка водорода помогает восстановить устойчивость, но одновременно может снова повысить склонность к образованию NO_x (рисунок 2.6).

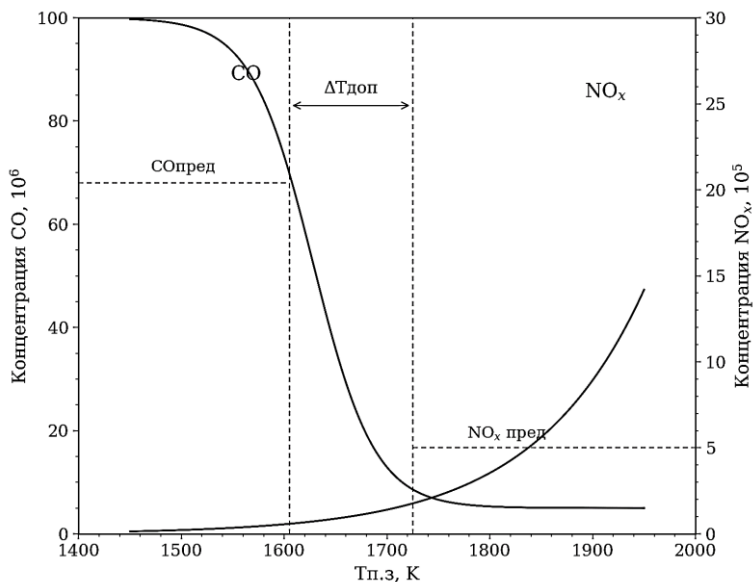


Рисунок 2.6. Схематическое влияние температуры пламени на образование CO и NOx

Эмиссия оксида углерода при переходе на водородосодержащие смеси обычно снижается, если водород способствует более полному и устойчивому сгоранию бедной смеси. В одном из приведенных материалов указано, что при использовании метано-водородных смесей удавалось достигать значений NOx порядка 11 мг/м³ при одновременном снижении CO до 20 мг/м³. Это показывает, что правильно выбранная доля водорода может улучшать одновременно и полноту сгорания, и экологические показатели установки [38-40].

2.6. Проблемы проскока и срыва пламени при сжигании водородосодержащих топлив

Для практического применения водорода в камерах сгорания наибольшее значение имеют два предельных режима неустойчиво-

сти: проскок пламени внутрь горелочного устройства и срыв пламени. Проскок пламени возникает тогда, когда скорость распространения пламени становится сопоставимой или превышает локальную скорость потока в тракте подачи и смешения. Срыв пламени, или бедный срыв пламени, напротив, связан с тем, что течение выносит фронт пламени из зоны стабилизации и процесс горения прекращается.

Высокая скорость пламени водорода делает проблему проскок пламени особенно актуальной. В материалах по водородным газовым турбинам прямо указано, что при повышении доли водорода риск проскока возрастает из-за роста скорости пламени и уменьшения времени задержки воспламенения. Именно поэтому переход к смесям с высоким содержанием водорода требует изменения геометрии форсунок, сокращения времени пребывания предварительно смешанной смеси в горячих зонах и введения специальных методов аэродинамической стабилизации.

Не менее важна и проблема бедный срыв пламени, особенно на бедных и переходных режимах. В обзоре указывается, что при работе малоэмиссионных камер сгорания на сверхбедных смесях ухудшение устойчивости процесса может приводить к росту эмиссии CO, пульсациям давления и в конечном итоге к локальному или полному погасанию камеры сгорания. Добавка водорода во многих случаях расширяет область устойчивой работы, но не устраняет необходимости точного распределения топлива между дежурным и основным контурами.

Важным фактором при анализе проскок пламени и бедный срыв пламени является также термоакустическое состояние камеры сгорания. Содержание водорода влияет на размер, форму и положение пламени, а также на скорость распространения звука в смеси, что в свою очередь изменяет фазовую связь между пульсациями давления и тепловыделения [41-44]. Поэтому рост доли водорода может не только

сдвигать пределы устойчивости, но и заметно менять спектр и амплитуду термоакустических колебаний (рисунок 2.7) [45].

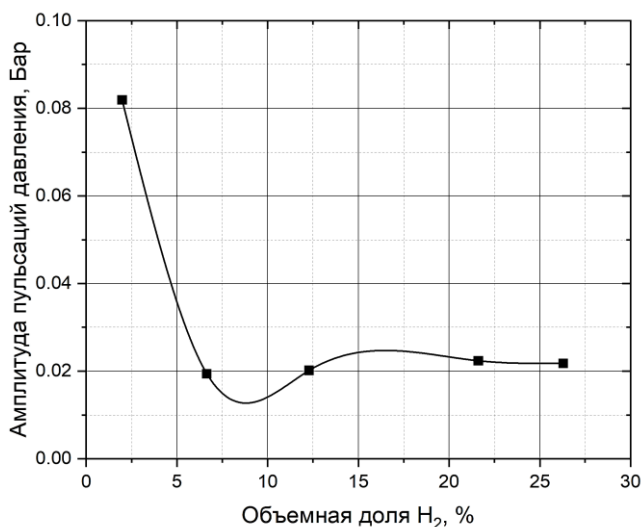


Рисунок 2.7. Влияние содержания водорода на амплитуду пульсаций давления

Таким образом, проблемы проскока пламени и бедный срыв пламени нельзя рассматривать изолированно друг от друга. Обе они связаны с одними и теми же параметрами: скоростью пламени, временем воспламенения, аэродинамикой закрученного потока, локальным коэффициентом избытка воздуха, температурой смеси и акустикой камеры сгорания. Именно совокупность этих факторов определяет допустимый диапазон содержания водорода в метано-водородной смеси для конкретного типа горелочного устройства.

В результате можно сделать вывод, что водород и метано-водородные смеси обладают значительным потенциалом для повышения устойчивости бедного горения и снижения углеродных выбросов, однако требуют существенно более тонкой организации рабочего

процесса, чем традиционный природный газ. Высокая скорость пламени, сокращенное время задержки воспламенения, повышенная склонность к проскоку, влияние на термоакустическое состояние камеры и риск роста NO_x делают задачу проектирования водородной камеры сгорания многопараметрической и компромиссной. Именно поэтому следующий этап рассмотрения должен быть связан уже не только со свойствами топлива, но и с конкретными схемами организации процесса горения в камерах сгорания газотурбинных установок.

ГЛАВА 3. СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТУ

Данная глава посвящена анализу основных схем организации горения водородосодержащего топлива в камерах сгорания газотурбинных установок. Переход от рассмотрения физико-химических характеристик водорода к анализу рабочего процесса в камере сгорания является принципиально важным этапом, поскольку именно в этой зоне проявляются основные преимущества и ограничения водородного топлива. Особое внимание уделяется взаимосвязи между составом топлива, способом смесеобразования, устойчивостью пламени, склонностью к проскоку и уровнем эмиссии оксидов азота. Камера сгорания при работе на метано-водородных смесях должна одновременно обеспечивать надёжное воспламенение, устойчивое горение, высокую полноту сгорания топлива, приемлемое тепловое состояние элементов конструкции и низкий уровень вредных выбросов. По мере увеличения доли водорода решение этой задачи заметно усложняется, поскольку водород отличается высокой скоростью распространения пламени, малым временем задержки воспламенения и повышенной склонностью к проскоку пламени в смесительный тракт. В результате выбор схемы горения становится одним из ключевых факторов, определяющих возможность практического применения водородосодержащего топлива в современных ГТУ.

3.1. Диффузионные схемы горения

Наиболее традиционным способом организации рабочего процесса является диффузионное горение, при котором топливо и воздух смешиваются в основном уже в зоне факела. Подобная схема отличается сравнительно высокой устойчивостью горения и меньшей чувствительностью к изменению состава топлива, что делает её технологически привлекательной при переходе к высоким долям водорода. Именно поэтому диффузионные камеры сгорания рассматриваются как один из наиболее реалистичных вариантов организации горения при работе на смесях с высоким содержанием водорода и даже на чистом водороде. Вместе с тем диффузионное горение сопровождается образованием локальных высокотемпературных зон, в которых интенсифицируется термическое образование оксидов азота (рисунок 3.1). Для ограничения температуры пламени в таких системах используются разбавление паром, водой или азотом, однако подобные меры усложняют конструкцию установки и повышают требования к вспомогательным системам. Следовательно, диффузионные схемы обладают заметным преимуществом по устойчивости, но уступают малоэмиссионным системам по экологическим характеристикам.

Применительно к водородосодержащему топливу диффузионная схема представляет собой компромисс между технологической реализуемостью и экологической эффективностью. С одной стороны, она позволяет расширить диапазон допустимого состава топлива и снизить вероятность срыва пламени на переменных режимах. С другой стороны, достижение современных требований по выбросам NO_x в этом случае, как правило, требует дополнительных средств охлаждения и разбавления зоны горения.

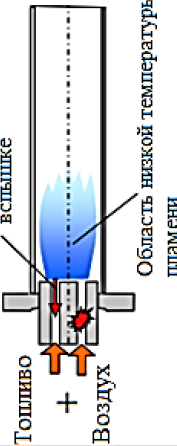
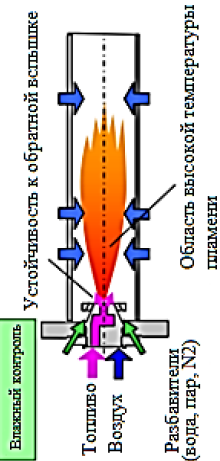
Тип камеры сгорания	Камера сгорания с предварительным смешиванием	Камера сгорания с диффузионным пламенем
	 Топливо + Воздух Склонность к обратной вспышке Область низкой температуры пламени Низкие NOx	 Влажный контроль Устойчивость к обратной вспышке Топливо + Воздух Область высокой температуры пламени Разбавители (вода, пар, N₂)
Достоинство	Низкие NOx	Устойчивость к обратной вспышке
Недостаток	Склонность к обратной вспышке	Снижение эффективности установки (из-за впрыска разбавителей для уменьшения NOx)
Опыт работы с гибкотопливной ГТ	Нет	Да

Рисунок 3.1.1. Технические проблемы стандартных камер сгорания

3.2. Камеры сгорания с предварительным смешением

Наиболее перспективным направлением снижения выбросов оксидов азота являются камеры сгорания с предварительным смешением бедной топливовоздушной смеси. Принцип их работы заключается в предварительной гомогенизации топлива и воздуха с последующим сжиганием уже подготовленной бедной смеси в основной зоне горения. Именно данный подход лежит в основе технологий DLE и DLN, получивших широкое распространение в современных малоэмиссионных газотурбинных установках (рисунк 3.2). Преимущество предварительного смешения состоит в возможности уменьшения локальных температурных максимумов, а следовательно, и в снижении интенсивности термического механизма образования NOx. Однако при переходе от природного газа к водородосодержащим смесям premix-схема сталкивается с серьёзными ограничениями, связанными с повышенной реакционной способностью водорода. Если смесь слишком долго находится в горячем тракте до зоны стабилизации, возрастает вероятность её самовоспламенения или проскока пламени в область предварительного смешения [46]. Таким образом, камера с предварительным смешением обеспечивает высокий потенциал по снижению выбросов, но требует значительно более жёсткого контроля времени пребывания смеси, локальных скоростей потока и структуры течения. В практическом отношении это означает, что по мере роста доли водорода обычная модернизация существующей premix-горелки перестаёт быть достаточной. Возникает необходимость в пересмотре геометрии фронтного устройства, схемы топливоподачи и алгоритмов управления рабочим процессом. Для серийных промышленных камер предельно допустимое содержание водорода определяется не только химическими свойствами топлива, но и конкретной аэродинамической организацией смесеобразования.

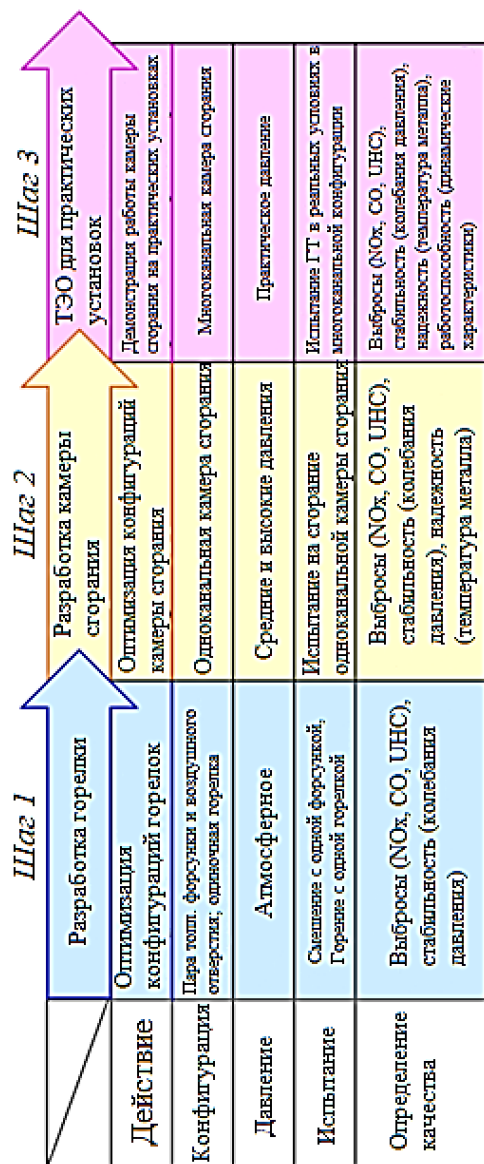


Рисунок 3.2. Подход к разработке усовершенствованной камеры сгорания с сухим подавлением выбросов NOx и устойчивостью

Имеющиеся данные показывают, что для части существующих малоэмиссионных систем допустимы лишь малые или умеренные доли водорода, тогда как переход к содержанию порядка 50 % и выше требует уже специальных конструктивных решений. Следовательно, возможность работы на водороде в premix-системе определяется не абстрактным типом камеры, а качеством реализации её фронтального устройства.

3.3. Пилотный и основной контуры

Характерной особенностью малоэмиссионных камер сгорания является многоступенчатая организация подачи топлива. Наиболее распространённой является схема с дежурным, или пилотным, контуром и основным контуром предварительного смешения (рисунок 3.3). Основной контур обеспечивает бедное малоэмиссионное горение на расчётных режимах, а пилотный контур используется для стабилизации пламени при запуске, разгоне и работе на пониженных нагрузках. Такая схема позволяет расширить диапазон устойчивой работы камеры, однако формирует характерный инженерный компромисс. Увеличение доли топлива в пилотной зоне способствует стабилизации пламени, но одновременно повышает локальную температуру и ухудшает экологические характеристики камеры. Напротив, чрезмерное обеднение смеси и чрезмерное снижение подачи топлива в дежурный контур может приводить к пульсациям давления, локальному срыву пламени и полному погасанию камеры. Для водородосодержащих смесей данная проблема приобретает особую значимость. Высокая скорость горения водорода способствует расширению пределов устойчивого горения в одних условиях, но одновременно увеличивает чувствительность рабочего процесса к локальным неоднородностям состава смеси и скорости потока. Поэтому распределение топлива между пилотным и основным контурами рассматривается как один из важнейших параметров при проектировании водородных горелочных устройств [47].

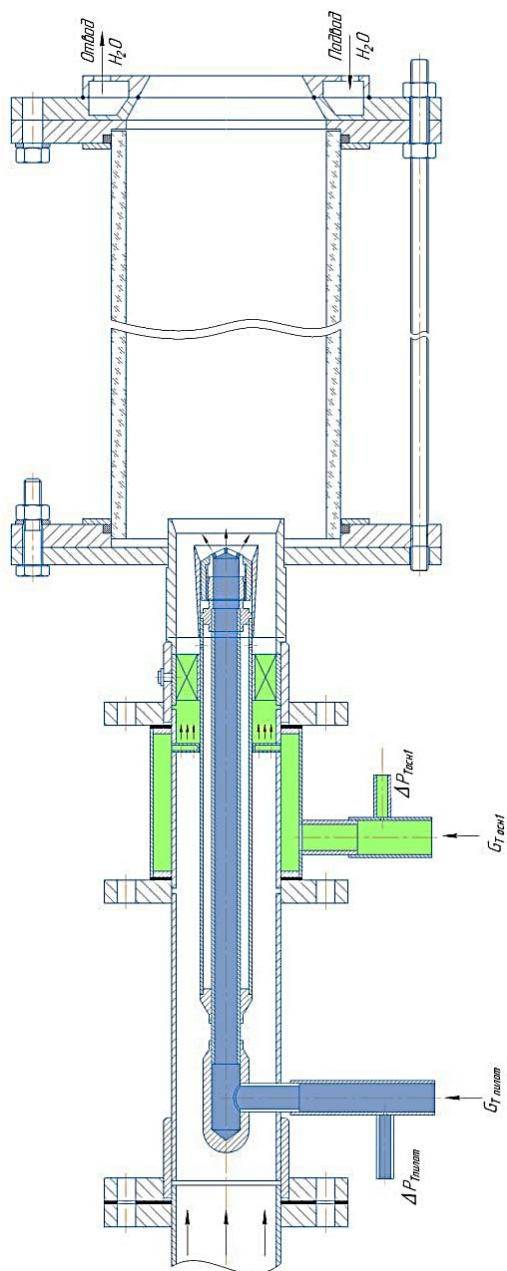


Рисунок 3.3. Схема подачи топлива в пилотный и основной контуры горелочного устройства

3.4. Быстрое смесеобразование

По мере увеличения содержания водорода особое значение приобретает интенсификация смесеобразования. Если подготовка смеси происходит медленно, а смесительный тракт имеет значительную длину, возрастает риск нежелательного воспламенения до входа в основную зону горения. По этой причине в современных исследованиях и разработках всё большее внимание уделяется схемам быстрого многоканального или многотрубного смешения. Сущность таких решений состоит в том, чтобы максимально сократить характерное время перемешивания топлива и воздуха. Многочисленные миниатюрные смесительные элементы позволяют формировать более однородную смесь на малой длине канала и уменьшать вероятность образования локальных переобогащённых или перегретых областей. Для водородосодержащих топлив это особенно важно, поскольку рабочий процесс определяется не только средним составом смеси, но и её локальной структурой вблизи зоны стабилизации пламени. Развитие систем быстрого смесеобразования следует рассматривать как закономерный этап эволюции малоэмиссионных камер сгорания. Эти системы ещё не устраняют всех ограничений, связанных с высокой реакционной способностью водорода, однако позволяют существенно расширить рабочий диапазон по составу топлива по сравнению с традиционными схемами. Наиболее завершённое выражение данная логика получает в кластерных горелочных устройствах, специально ориентированных на работу с высокими долями водорода (рисунок 3.4).

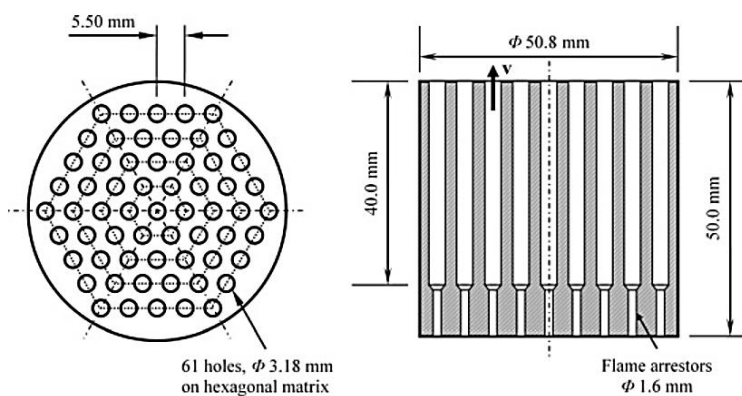
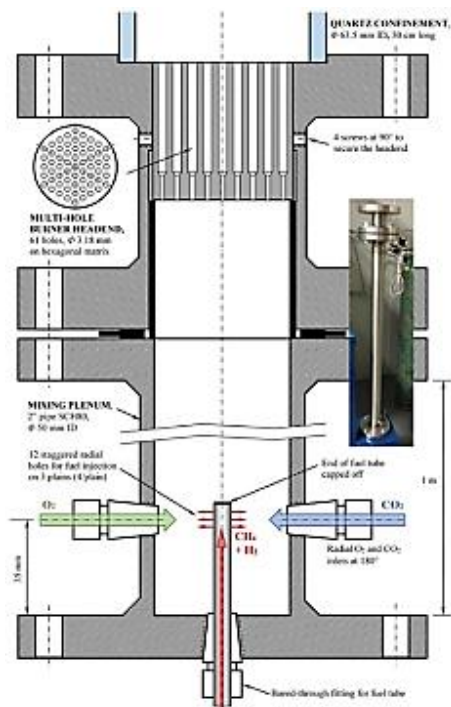


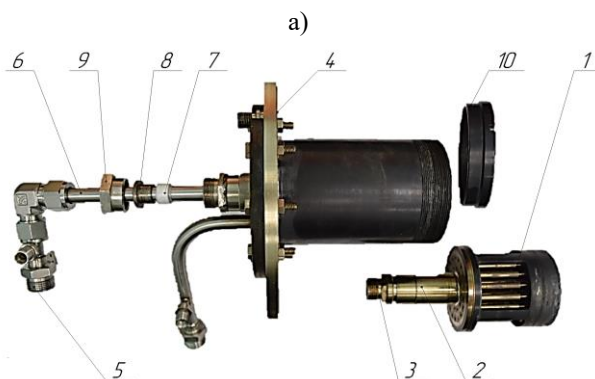
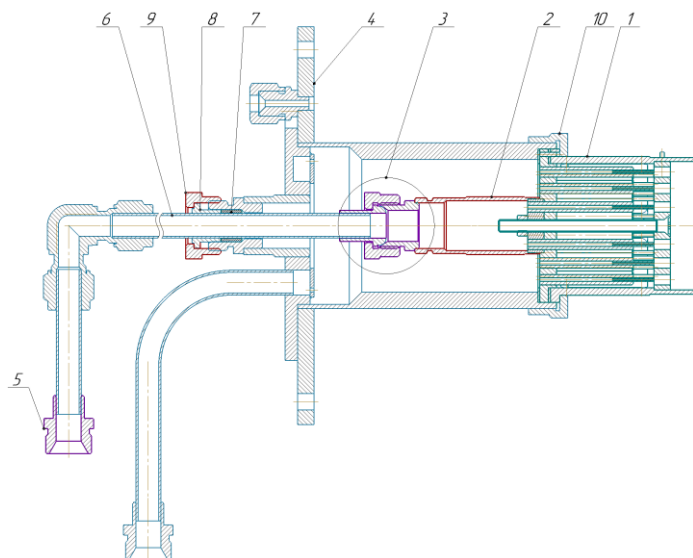
Рисунок 3.4. Схема кластерного ГУ

3.5. Кластерные горелочные устройства

Кластерные горелочные устройства представляют собой специализированный тип фронтowego устройства, ориентированный на организацию устойчивого горения высокореакционных топлив и на снижение риска проскока пламени. Их конструктивная идея основана на разбиении фронтовой зоны на множество отдельных каналов, через которые согласованно подаются воздух и топливо. Такая схема позволяет более гибко управлять локальными скоростями течения, распределением смеси и положением зоны стабилизации пламени. В одном из разработанных вариантов кластерного горелочного устройства фронтальная плита содержит 36 отверстий, из которых шесть центральных формируют пилотный контур, а отверстия второго и третьего рядов образуют основную зону горения (рисунок 3.5).

При проектировании этого устройства подбирались геометрические параметры и расходы таким образом, чтобы обеспечить скорости воздуха и топлива не менее 30 м/с, что рассматривалось как одно из условий предотвращения проскока пламени. Следовательно, кластерная схема изначально строится на согласовании кинетики горения и аэродинамики течения вблизи фронтальной зоны.

Для таких устройств особенно важна равномерность подачи топлива по каналам. Даже незначительные отклонения в распределении расходов между пилотным и основным контурами способны приводить к смещению фронта пламени, росту неравномерности температурного поля и усилению термоакустической чувствительности. Именно поэтому в конструкции предусматриваются средства контроля давления воздуха, давления топлива в каждом контуре и температуры в характерных точках. Важной особенностью исследовательских образцов является использование отсека с кварцевой трубой (рисунок 3.6).



б)

Рисунок 3.5. Кластерное горелочное устройство:
 1 – блок подвода топлива; 2 – труба соединительная;
 3 – ниппельное соединение; 4 – наружный фланец;
 5 – ниппельное соединение; 6 – трубка подвода топлива;
 7 – фторопластовая втулка; 8 – прижимная втулка;
 9 – накидная гайка; 10 – гайка наружного корпуса

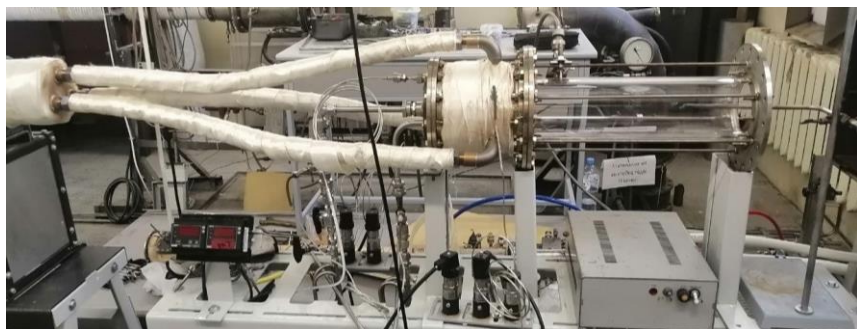


Рисунок 3.6. Отсек с кварцевой трубой
в составе исследовательского образца
кластерной камеры сгорания

Такая конструкция позволяет выполнять фото- и видеофиксацию процесса горения, наблюдать форму факела и оценивать положение зоны стабилизации при изменении состава топлива, температуры воздуха и перепада давления. Для водородосодержащих смесей подобная визуализация имеет особое значение, поскольку она даёт возможность сопоставлять расчётные представления о процессе с реальной картиной течения и горения.

Кроме того, в конструкции кластерной камеры предусматривается возможность независимого регулирования воздуха, подаваемого непосредственно в горелочное устройство, и воздуха, направляемого на охлаждение жаровой трубы. Это позволяет совместно решать задачи стабилизации горения и обеспечения допустимого теплового состояния элементов конструкции. Тем самым кластерное горелочное устройство следует рассматривать не как частное усложнение обычной горелки, а как самостоятельную концепцию организации рабочего процесса для топлив с высоким содержанием водорода.

3.6. Выбор схемы горения

Универсального решения для всего диапазона составов метано-водородного топлива в настоящее время не существует. При небольших добавках водорода, порядка 15–20 % по объёму, возможна сравнительно ограниченная модернизация существующих малоэмиссионных камер сгорания. При повышении доли водорода до 60–70 % обычно возникает необходимость в разработке нового фронтowego устройства, интенсификации смесеобразования и совершенствовании системы регулирования. При содержании водорода свыше 70 % задача фактически переходит в область проектирования специализированной водородной камеры сгорания. В этом диапазоне особое значение приобретают предотвращение проскока пламени, обеспечение высокой скорости течения в критических сечениях, контроль термоакустических колебаний и эффективное охлаждение горячих элементов.

Поэтому для высоководородных и чисто водородных топлив наибольший интерес представляют либо диффузионные схемы с разбавлением, либо специально разработанные многоканальные и кластерные горелочные устройства. Таким образом, развитие камер сгорания для водородосодержащего топлива связано не с вытеснением одной схемой всех остальных, а с формированием линейки технических решений для различных диапазонов состава топлива и различных классов газотурбинных установок. Ключевыми факторами выбора остаются допустимый уровень выбросов, требования к устойчивости горения, глубина модернизации базовой установки и предельная доля водорода в рабочей смеси (рисунок 3.7).

Именно эти факторы определяют направления дальнейших расчётных и экспериментальных исследований, посвящённых рабочему процессу в модельных и натурных камерах сгорания.

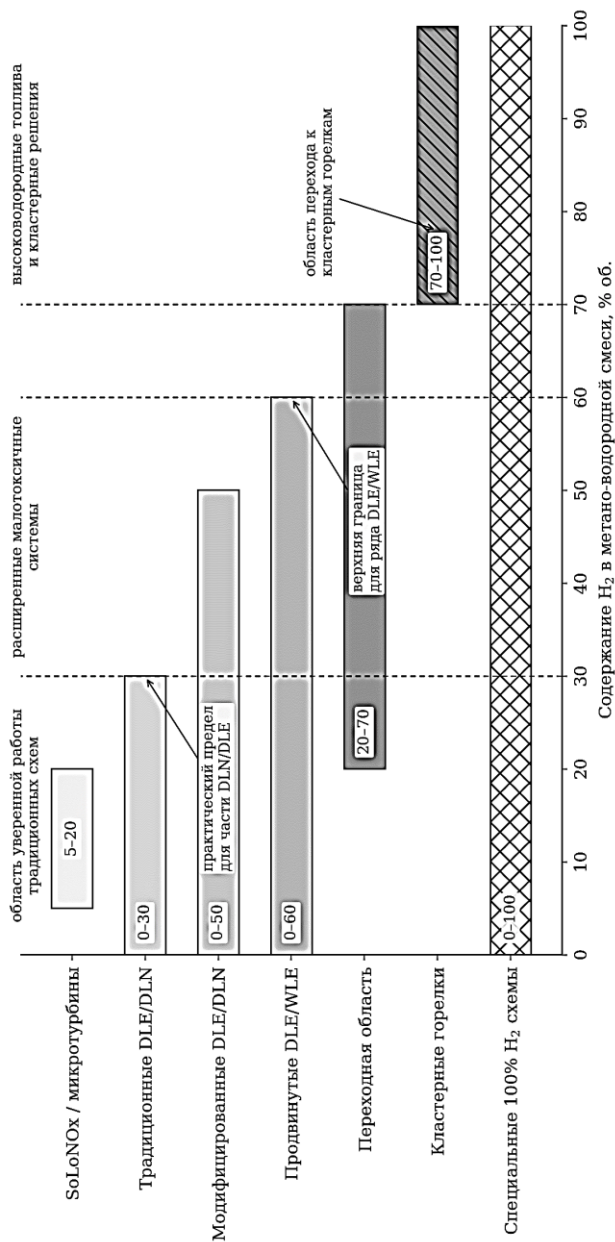


Рисунок 3.7. Диапазоны применимости различных схем горения в зависимости от содержания водорода в метано-водородной смеси

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРЕНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ

Глава 4 посвящена описанию экспериментальной базы, необходимой для исследования процессов горения метано-водородных смесей в модельных горелочных устройствах и камерах сгорания. Формирование такой базы является обязательным условием проведения исследований, поскольку при переходе от природного газа к смесям с добавкой водорода существенно изменяются характеристики воспламенения, устойчивости пламени, границ бедного срыва и эмиссии вредных веществ. В связи с этим изучение указанных процессов требует стендовых испытаний в контролируемых и воспроизводимых условиях.

Экспериментальная база должна включать воздушную магистраль, топливную систему, средства подготовки стенда к испытаниям, систему измерения параметров потока, а также средства пусконаладочных и исследовательских работ на природном газе и метано-водородных смесях. Наличие такого комплекса необходимо для исследования модельного горелочного устройства камеры сгорания, модельного опытного образца камеры сгорания и кластерного горелочного устройства в сопоставимых режимных условиях.

Особое значение экспериментальная база имеет для изучения влияния состава топлива, температуры воздуха на входе, коэффициента избытка воздуха и перепада давления на характеристики процесса горения. Варьирование именно этих параметров необходимо для оценки устойчивости горения и эмиссионных характеристик

при различных долях водорода в составе топлива, в том числе при испытаниях горелочных устройств с кварцевой трубой.

Необходимым требованием к экспериментальной базе является обеспечение достоверности измерений и воспроизводимости результатов. В качестве критерия корректности измерения режимных параметров и состава продуктов сгорания должно использоваться совпадение коэффициента избытка воздуха, определённого по стендовым данным, с коэффициентом избытка воздуха, рассчитанным по результатам химического анализа продуктов сгорания. Выполнение этого условия позволяет рассматривать полученные данные как пригодные для последующего анализа и сравнения режимов горения природного газа и метано-водородных смесей.

4.1. Назначение и структура экспериментального стенда

Экспериментальный стенд предназначен для исследования рабочего процесса камер сгорания на природном газе и метано-водородных смесях в условиях, приближенных к режимам работы малоэмиссионных газотурбинных камер сгорания. Наличие такого стенда необходимо для получения достоверных данных о влиянии состава топлива и режимных параметров на устойчивость пламени, границы бедного срыва, температурное состояние элементов и эмиссию вредных веществ.

Структура стенда должна обеспечивать возможность испытаний различных модельных объектов, включая горелочное устройство с кварцевой трубой, модельную камеру сгорания и кластерное горелочное устройство. Это необходимо для последовательного перехода от простой конфигурации, удобной для визуального наблюдения за факелом и зоной стабилизации пламени, к более сложным объектам, воспроизводящим условия, близкие к реальной камере сгорания.

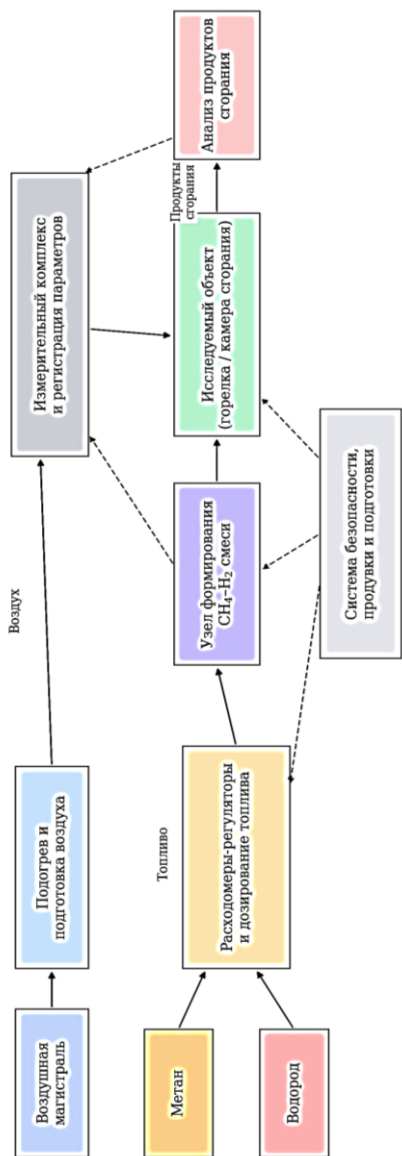


Рисунок 4.1. Общая схема экспериментального стенда для исследований горения природного газа и метано-водородных смесей

Функционально стенд включает систему подготовки и подачи воздуха, топливную систему для природного газа и водорода, узел формирования метано-водородной смеси, измерительно-регистрирующий комплекс, средства газового анализа и элементы обеспечения безопасности. Воздушная часть должна обеспечивать требуемые расходные, температурные и газодинамические условия на входе в исследуемый объект, а топливная часть – раздельную подачу компонентов, их дозирование и поддержание заданного соотношения расходов метана и водорода. Поддержание стабильного состава смеси является обязательным условием проведения испытаний по определению границ бедного срыва и эмиссионных характеристик при изменении содержания водорода в топливе.

Общая структура экспериментального стенда представлена на рисунке 4.1.

4.2. Система подготовки и подачи воздуха

Система подготовки и подачи воздуха является обязательным элементом экспериментального стенда, поскольку именно она обеспечивает формирование требуемых начальных условий на входе в исследуемое горелочное устройство или модельную камеру сгорания. При исследованиях горения метано-водородных смесей воздушная магистраль должна обеспечивать задание и стабильное поддержание расхода воздуха, его температуры и гидравлических характеристик тракта, так как эти параметры непосредственно влияют на устойчивость пламени, границы бедного срыва, температурный уровень процесса и эмиссию вредных веществ.

Структура воздушной магистрали должна обеспечивать регулируемую подачу воздуха в диапазоне параметров, достаточном для проведения пусконаладочных и основных исследовательских испытаний на природном газе и метано-водородных смесях. В состав та-

кой системы необходимо включать источник сжатого воздуха, соединительные трубопроводы, элементы регулирования расхода, запорную арматуру и участок подогрева воздуха перед подачей в исследуемый объект. Общая схема системы подготовки и подачи воздуха приведена на рисунке 4.2.

Для формирования устойчивого воздушного потока в составе стенда могут использоваться компрессорные станции, обеспечивающие работу на различных режимах испытаний и при различных конфигурациях модельных образцов. В качестве элементов системы подачи воздуха могут быть применены, например, компрессорные агрегаты. Их использование позволяет обеспечить воспроизводимые условия подачи воздуха в исследуемый тракт.

Существенной частью воздушной системы является узел подогрева воздуха, поскольку часть испытаний должна проводиться не при комнатной температуре, а при предварительном нагреве окислителя. Это необходимо для приближения условий исследования к режимам работы реальных камер сгорания и для анализа влияния температуры воздуха на характеристики воспламенения, устойчивость пламени и состав продуктов сгорания. Для повышения температуры воздуха в подающем тракте может использоваться керамический нагреватель.

Помимо источника воздуха и нагревательного оборудования, воздушная магистраль должна включать арматуру и элементы согласования потока, необходимые для стабилизации режима и уменьшения влияния неравномерности подачи на результаты эксперимента. Наличие регулирующих элементов необходимо для задания требуемого расхода воздуха и его поддержания на постоянном уровне в процессе испытаний, что принципиально важно при определении границ бедного срыва пламени и регистрации эмиссионных характеристик.



Рисунок 4.2. Общая схема системы подготовки и подачи воздуха

С методической точки зрения система подготовки и подачи воздуха должна обеспечивать решение нескольких задач: задание массового расхода воздуха, формирование температуры на входе, создание необходимого перепада давления на горелочном устройстве и поддержание стационарности режима в процессе измерений. Только при выполнении этих условий возможно получение сопоставимых результатов различных серий испытаний и последующий расчётно-экспериментальный анализ процессов горения метано-водородных смесей.

4.3. Система подачи природного газа и водорода

Система подачи природного газа и водорода предназначена для обеспечения независимой, регулируемой и воспроизводимой подачи компонентов топлива к исследуемому объекту при проведении испытаний на природном газе и метано-водородных смесях. Её применение необходимо, поскольку при исследовании горения метано-водородных смесей требуется не только подача каждого компонента топлива в заданном диапазоне расходов, но и возможность изменения их соотношения в зависимости от программы испытаний.

В состав топливной системы должны входить газовое хранилище, магистраль подачи природного газа и магистраль подачи водорода, выполненные как независимые линии с последующим подводом компонентов к участку смешения и далее к соответствующим контурам горелочного устройства (рисунок 4.3). Такое построение схемы обеспечивает как автономную работу на природном газе, так и проведение экспериментов с различной долей водорода в составе топлива. Система подачи водорода должна включать баллонное хранилище, рампу с креплениями и фитингами, магистраль подачи, а также участки регулирования и измерения расхода по двум независимым контурам. Для обеспечения требуемого запаса топлива может использоваться баллонная рампа, например состоящая из восьми баллонов объёмом 50 л каждый при рабочем давлении до 200 бар. Конструкция водородной магистрали при этом должна учитывать повышенные требования к безопасности и управляемости режима.

В состав водородной линии необходимо включать редуктор, коллектор, электромагнитные клапаны, огнепреградительный клапан, а также систему продувки инертным газом и сброса давления. Продувка может выполняться с использованием азота, что необходимо для предотвращения попадания воздуха в систему при сбросе давления и подготовке стенда к испытаниям (рисунок 4.4).

Система подачи природного газа должна обеспечивать независимую подачу топлива в пилотный и основной контуры горелочного устройства. Для этого в её состав необходимо включать запорную арматуру, регуляторы давления и расходомеры-регуляторы, обеспечивающие работу в требуемом диапазоне расходов. В качестве таких приборов могут использоваться, например, тепломассовые и кориолисовые расходомеры-регуляторы, а для расширения диапазона измерений – дополнительный кориолисовый расходомер.

Подача водорода организуется по тому же принципу, однако в водородном контуре дополнительно предусматриваются элементы продувки, сброса давления и защиты от распространения пламени. Для работы в области малых и повышенных расходов могут использоваться несколько расходомеров-регуляторов, устанавливаемых по пилотному и основному контурам. Такая схема обеспечивает универсальность топливной системы и позволяет проводить испытания как при малых расходах, характерных для пилотной зоны, так и при более интенсивной подаче топлива в основной контур.

После прохождения через расходомеры компоненты топлива должны поступать к участку смешения, где осуществляется их объединение перед подачей в горелочное устройство. На линии подачи водорода перед смесительным участком необходимо устанавливать огнепреградительный клапан, а на линии подачи природного газа – обратный клапан. После смешения должны контролироваться температура и давление топлива, после чего смесь направляется в исследуемый объект.

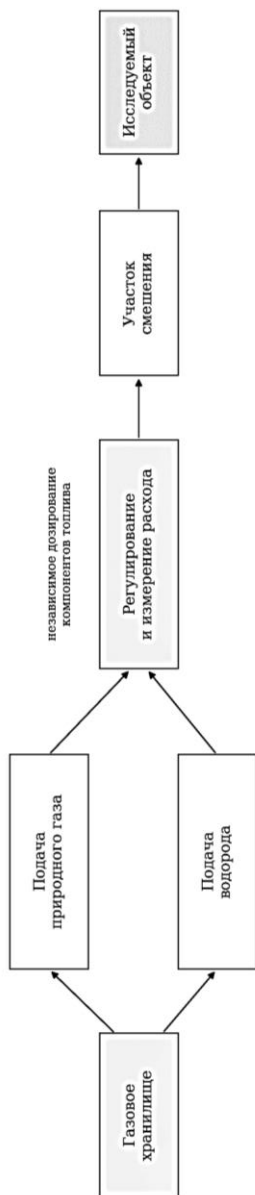


Рисунок 4.3. Общая схема топливной системы экспериментального стенда

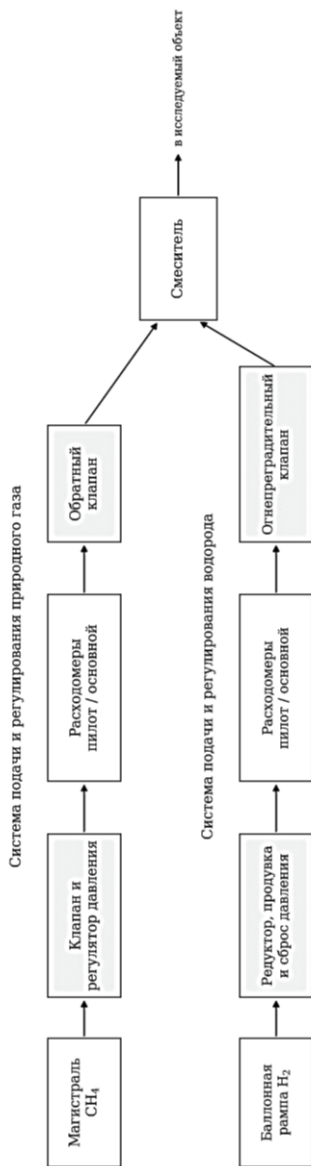


Рисунок 4.4. Системы подачи и регулирования природного газа и водорода

Принципиально важным требованием к топливной системе является независимое дозирование каждого компонента до участка смешения. Именно такая схема позволяет задавать требуемую долю водорода в составе топлива и устойчиво поддерживать её в процессе испытаний. Это особенно важно при исследовании границ бедного срыва пламени, когда расходы природного газа и водорода изменяются в ходе эксперимента.

Для автоматического поддержания заданного соотношения расходов компонентов топлива могут использоваться расходомеры-регуляторы с режимом «ведущий–ведомый». Такое решение повышает воспроизводимость режима и упрощает проведение серий испытаний на смесях различного состава. В результате система подачи природного газа и водорода должна рассматриваться не только как средство транспортировки топлива, но и как инструмент формирования экспериментального режима.

4.4. Узел приготовления метано-водородных смесей

Узел приготовления метано-водородных смесей предназначен для формирования однородной топливной композиции с заданной долей водорода перед её подачей в исследуемое горелочное устройство или модельную камеру сгорания. Выделение этого узла в самостоятельный элемент стенда необходимо, поскольку при исследовании горения метано-водородных смесей требуется не только независимое дозирование природного газа и водорода, но и их устойчивое смешение с сохранением заданного соотношения компонентов в течение всего эксперимента (рисунок 4.5).

Функционально узел приготовления смеси располагается после расходомерно-регулирующей аппаратуры обеих топливных магистралей и является завершающим участком топливной системы перед подачей топлива в объект исследования. После прохождения через расходомеры компоненты топлива поступают к общему смесительному участку, где осуществляется их объединение, а затем выполняется контроль температуры и давления сформированной смеси.

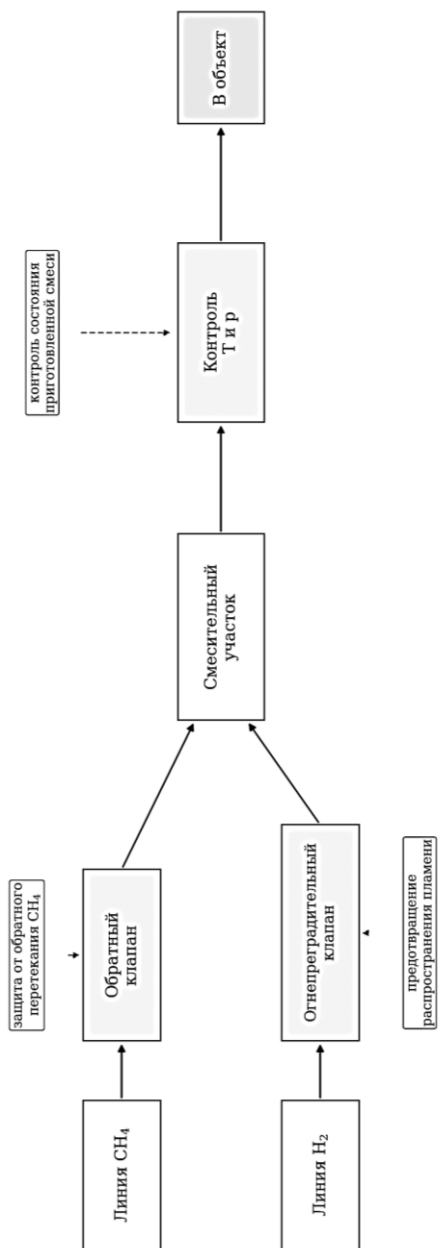


Рисунок 4.5. Элементы защиты и контроля в узле приготовления смеси

Принцип работы узла основан на независимом дозировании метана и водорода в соответствующих контурах с последующим объединением потоков в общем смесительном участке. Такая схема позволяет изменять состав топлива в широком диапазоне и проводить исследования влияния доли водорода на устойчивость горения, эмиссионные характеристики и границы бедного срыва пламени.

Особое значение при компоновке смесительного узла имеет безопасность работы с водородом. Поэтому на линии подачи водорода перед смесительным участком необходимо устанавливать огнепреградительный клапан, а на линии подачи метана – обратный клапан. Такое решение снижает риск распространения пламени по магистралям и обратного перетекания компонентов топлива.

Одним из ключевых требований к узлу приготовления смеси является обеспечение достаточно качественного перемешивания компонентов при компактных габаритах и в диапазоне расходов, соответствующем режимам стендовых испытаний. Для этих целей может использоваться специальный смеситель, обеспечивающий выравнивание состава смеси перед её поступлением в исследуемый объект. В описании конструкции указываются компактные характерные размеры такого миксера – порядка 140 мм по длине и 24 мм по диаметральному размеру.

С методической точки зрения узел приготовления смеси обеспечивает возможность точного воспроизведения заданного состава топлива при повторных сериях испытаний. Это особенно важно при определении границ бедного срыва пламени и при сопоставлении экспериментальных данных с результатами численного моделирования, поскольку верификация расчётной модели требует стабильных и воспроизводимых входных условий.

Дополнительное значение узла связано с тем, что после смешения компонентов контролируются температура и давление уже приготовленной топливной смеси. Это позволяет характеризовать не только расходы исходных газов, но и фактическое состояние смеси

непосредственно перед её поступлением в исследуемый объект. Тем самым повышается достоверность последующего анализа процессов горения.

Таким образом, узел приготовления метано-водородных смесей является важной частью топливной системы экспериментального стенда, обеспечивающей объединение, перемешивание и контролируемую подачу компонентов топлива в исследуемую камеру сгорания. Его использование позволяет проводить испытания на природном газе, водороде и их смесях с заданным соотношением компонентов и формировать воспроизводимые граничные условия для расчётно-экспериментального анализа.

4.5. Подготовка стенда к испытаниям

Подготовка экспериментального стенда к испытаниям является обязательным этапом перед проведением исследований на природном газе и метано-водородных смесях, поскольку именно на этой стадии обеспечиваются работоспособность стендовых систем, герметичность соединений и корректность задания режимных параметров. Основной задачей данного этапа является подтверждение готовности воздушной и топливной магистралей, измерительной системы, элементов розжига и исследуемого объекта к проведению огневых испытаний.

Подготовка стенда должна включать холодную продувку, проверку герметичности соединений, определение расходных характеристик воздушного и топливных контуров, проведение пусконаладочных огневых испытаний, а также фото- и видеофиксацию рабочих режимов. Дополнительно на этой стадии необходимо определять границы бедного срыва пламени при различных схемах подачи топлива, поскольку именно такие процедуры позволяют отработать методику эксперимента и обеспечить воспроизводимость последующих измерений.

Особое значение на этапе подготовки имеет контроль параметров, определяющих режим работы стенда. Для этого в составе измерительной системы могут использоваться датчики избыточного и дифференциального давления, термопары и расходомеры-регуляторы, объединённые в единую систему регистрации данных. Такая система обеспечивает не только текущий контроль состояния установки, но и накопление массива экспериментальных данных для последующей обработки (рисунок 4.6).

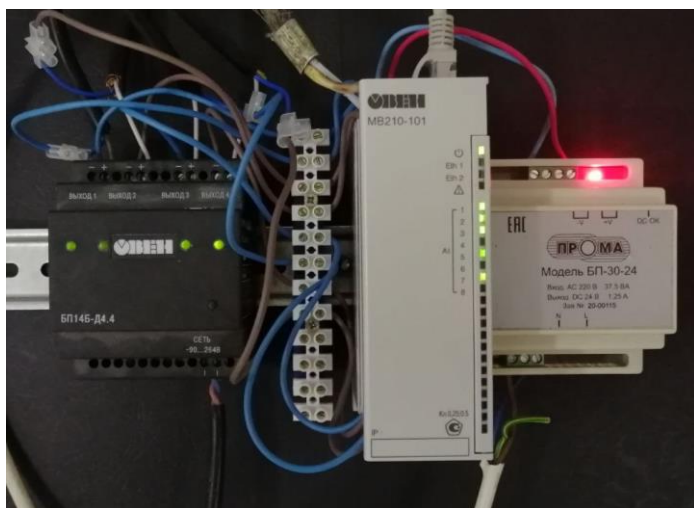


Рисунок 4.6. Измерительно-регистрационная часть стенда при подготовке к испытаниям

Для сбора и фиксации данных в режиме реального времени может использоваться программно-аппаратный комплекс на базе модулей дискретного ввода Ethernet MB210 и программного обеспечения MASTER SCADA. Непрерывная регистрация параметров в процессе подготовки позволяет формировать временные массивы значений, выполнять их математическую обработку и использовать результаты при анализе режимов испытаний (рисунок 4.7).

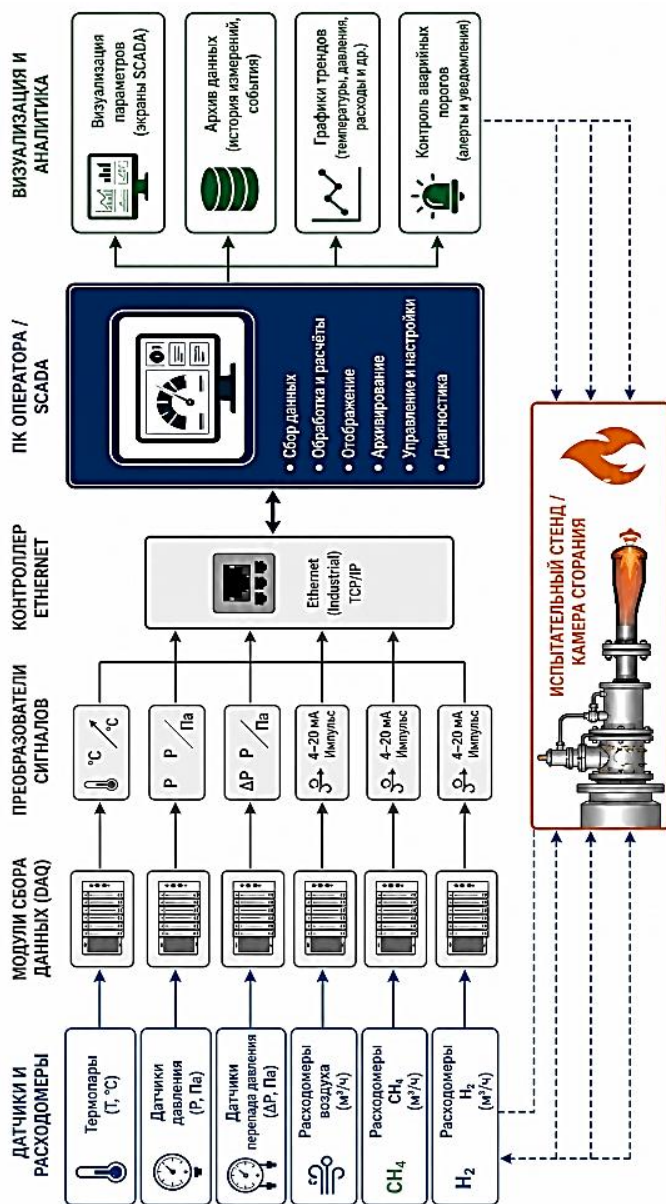


Рисунок 4.7. Комплекс измерения и регистрации параметров при подготовке стенда к испытаниям

Важной частью подготовки является проверка расходных характеристик воздушного и топливных контуров, поскольку без этого невозможно корректно задать коэффициент избытка воздуха и обеспечить воспроизводимость испытательных режимов. На этапе пусконаладочных работ должны быть определены расходные характеристики контуров, отработаны режимы розжига и стабилизации пламени, а также выполнена фиксация основных режимов работы горелочного устройства.

Подготовка стенда должна включать и проверку корректности измерения режимных параметров. Одним из признаков достоверности измерений может служить согласование коэффициента избытка воздуха, рассчитанного по параметрам стендовых систем, с коэффициентом избытка воздуха, определённым по составу продуктов сгорания после их анализа. Такой подход позволяет подтвердить правильность работы измерительной системы и повысить надёжность экспериментальных данных.

При подготовке стенда к испытаниям на метано-водородных смесях процедура усложняется, поскольку дополнительно требуется устойчиво задавать состав топлива и соблюдать последовательность выхода на рабочий режим. Типовая схема работы в этом случае может включать подачу воздуха и прогрев элементов установки, последующий розжиг с использованием пилотного контура, плавное подключение метано-водородной смеси в основной контур, выход на требуемые значения температуры воздуха и перепада давления, а затем постепенное уменьшение расхода смеси до погасания пламени с фиксацией расходов CH_4 и H_2 .

Такая последовательность показывает, что подготовка стенда представляет собой не только проверку оборудования, но и отработку самой методики проведения эксперимента. Это особенно важно при работе с метано-водородными смесями, когда необходимо одновременно поддерживать заданное соотношение расходов

водорода и природного газа при изменении общего расхода топлива. Для решения этой задачи могут использоваться расходомеры-регуляторы Bronkhorst, работающие в режиме «ведущий–ведомый» и обеспечивающие автоматическое поддержание заданного соотношения компонентов топлива.

Подготовка стенда непосредственно связана и с обеспечением безопасности проведения экспериментов. Проверка герметичности соединений, предварительная продувка, контроль параметров в реальном времени и поэтапный вывод установки на рабочий режим позволяют снизить риск нештатных ситуаций и обеспечить надёжность экспериментальной базы.

Таким образом, подготовка стенда к испытаниям представляет собой комплекс технических и методических мероприятий, направленных на подтверждение работоспособности оборудования, корректности измерений и воспроизводимости экспериментальных режимов. Именно этот этап формирует основу для последующих исследований процессов горения на природном газе и метано-водородных смесях, а также для использования полученных экспериментальных данных при расчётно-экспериментальной верификации моделей горения.

4.6. Система измерения и регистрации параметров

Система измерения и регистрации параметров является необходимой частью экспериментального стенда, поскольку именно она обеспечивает получение достоверной информации о режимах работы установки и характеристиках исследуемого процесса горения. Без такой системы невозможно обеспечить корректное задание граничных условий, контроль текущего состояния стенда и последующее сопоставление экспериментальных данных с результатами расчётного моделирования.

Система измерения должна обеспечивать контроль давлений, температур, расходов топлива и воздуха, а также других параметров потока по тракту модельного горелочного устройства при работе как в условиях, близких к атмосферным, так и при избыточном давлении. Такой подход позволяет использовать единую экспериментальную базу для проведения серий испытаний в различных режимных условиях и сохранять сопоставимость результатов при изменении состава топлива, перепада давления и температурного состояния потока. Рассмотрим систему измерения на примере схемы измерения параметров модельного горелочного устройства камеры сгорания (рисунок 4.8).

При работе в условиях, близких к атмосферным, статическое давление воздуха на входе в мерный участок и перепад давления на камере могут определяться с использованием датчиков дифференциального давления ПД200-ДД, при этом давление в окружающей среде принимается за опорное. При работе с избыточным давлением до 2–3 бар в состав измерительной системы должны дополнительно включаться датчики избыточного давления ПД100И модели 111-Exi, предназначенные для эксплуатации в условиях категоризованных производств. В этой конфигурации перепад давления также определяется датчиками дифференциального давления, а абсолютный уровень давления в мерном участке контролируется отдельными преобразователями.

Для измерения параметров охлаждающего воздуха необходимо предусматривать отдельные точки контроля давления на входе в ресивер и на участках системы охлаждения. Перепад между выходным участком системы охлаждения и кольцевым каналом может определяться датчиками дифференциального давления, что позволяет оценивать гидравлическое сопротивление соответствующего тракта. Аналогичный подход применяется и при определении потерь полного давления между входом и выходом исследуемого объекта в условиях избыточного давления.

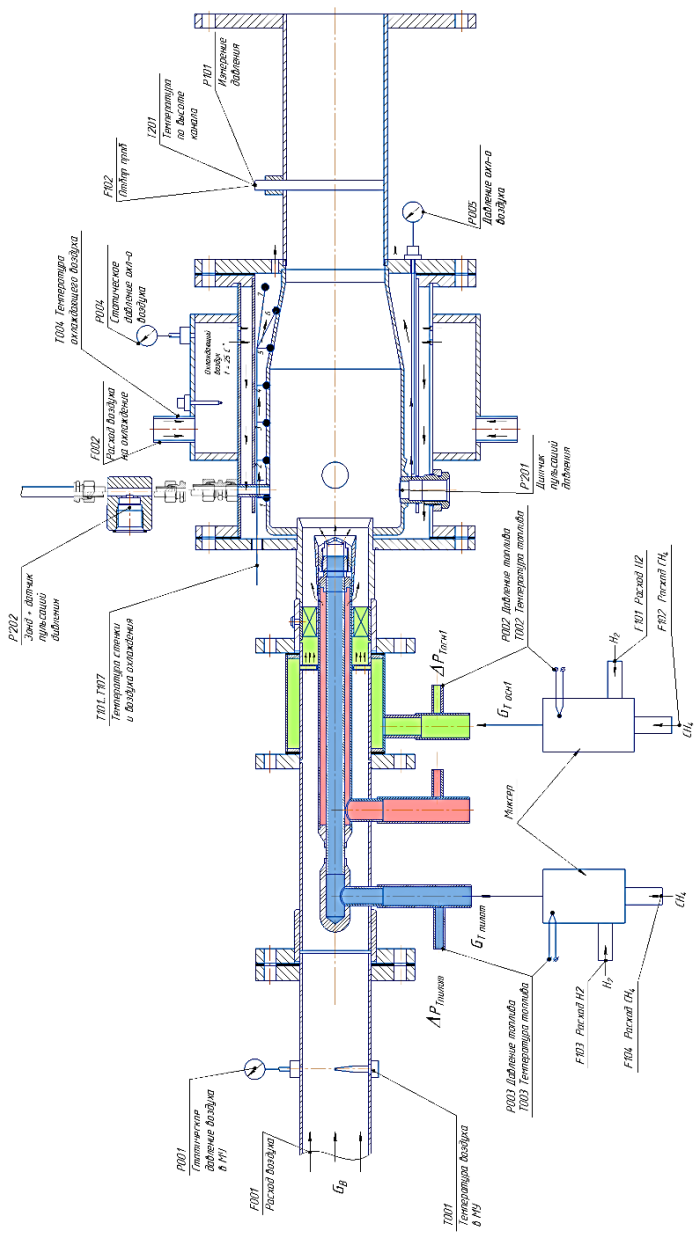


Рисунок 4.8. Схема измерения параметров модельного горелочного устройства камеры сгорания

Система измерения параметров по тракту стенда должна включать развитую сеть точек контроля, охватывающих расходы, давления, температуры и динамические характеристики потока. Предварительный состав такого измерительного комплекса может включать около 27 элементов, размещённых в ключевых сечениях воздушной, топливной и огневой частей стенда. В него входят расходомеры воздуха и топлива, датчики статического, избыточного и дифференциального давления, термопары, а также средства регистрации динамического давления.

Для измерения расхода воздуха в мерном участке может использоваться расходомер M16210986C с диапазоном 3,5–175 г/с. Для контроля расходов водорода и метана в топливной системе могут применяться расходомеры Bronkhorst и другие приборы, охватывающие диапазоны от 0,0002–0,01 г/с до 0,12–6 г/с. Использование приборов с различными диапазонами измерения позволяет обеспечивать корректную работу как на малых расходах пилотного контура, так и на более высоких расходах основного контура. Температуры метано-водородной смеси в топливных контурах, а также температуры отдельных элементов конструкции должны регистрироваться термопарами, выбранными с учётом диапазона измерения и условий эксплуатации. Это особенно важно для контроля теплового состояния стенда, поскольку изменение температуры элементов конструкции влияет как на устойчивость режима, так и на корректность интерпретации результатов испытаний.

Важной частью измерительного комплекса является подсистема сбора и регистрации данных в режиме реального времени. Для получения массива измеренных данных датчики избыточного и дифференциального давления, термопары и расходомеры-регуляторы могут подключаться к модулям Ethernet MB210 фирмы ОВЕН, каждый из которых рассчитан на восемь каналов ввода. Такая архитектура обеспечивает централизованный сбор сигналов, упрощает

синхронную регистрацию параметров и позволяет организовать непрерывный мониторинг работы стенда.

Для регистрации и визуализации данных в режиме реального времени может использоваться программное обеспечение MASTER SCADA. Непрерывная запись параметров на модуль MB210-101 позволяет формировать временные ряды значений, выделять характерные участки режима, выполнять математическую обработку и использовать полученные результаты при анализе испытаний. Тем самым обеспечивается переход от разрозненных отдельных измерений к полноценному экспериментальному массиву данных (рисунок 4.9).

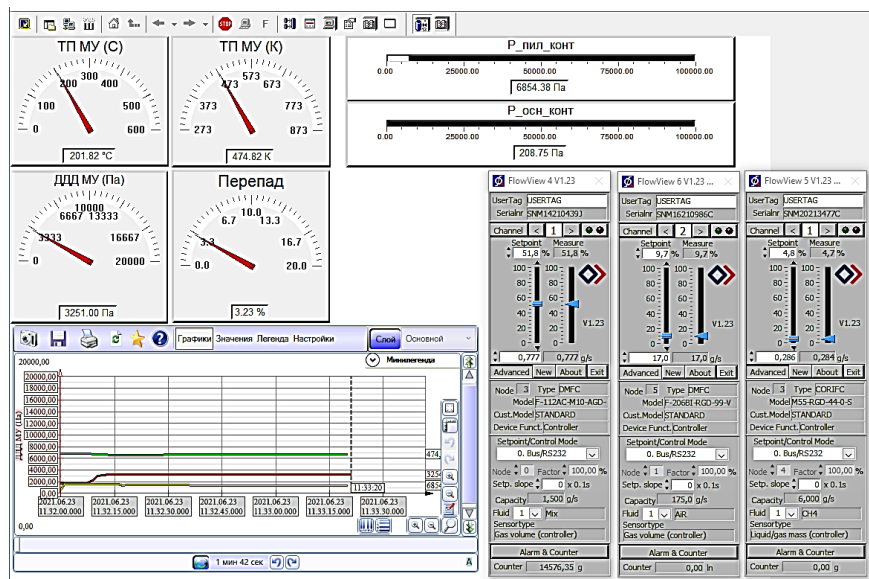


Рисунок 4.9. Интерфейс системы сбора и регистрации экспериментальных данных

Применение системы регистрации в реальном времени позволяет не только отслеживать текущие изменения режимных параметров

ров, но и формировать массивы данных для последующего сопоставления с результатами численного моделирования. Это особенно важно при верификации математических моделей, когда требуется сравнение экспериментально измеренных и расчётных значений давления, температуры, расходов и других характеристик рабочего процесса.

Отдельное значение в составе измерительной системы имеет подсистема контроля температурного состояния элементов модельной камеры сгорания. Тепловое состояние жаровой трубы может определяться с помощью семи термопар, установленных на её наружной поверхности в характерных координатах (рисунок 4.10). Такое размещение датчиков позволяет фиксировать распределение температур вдоль поверхности конструкции и оценивать тепловую нагруженность наиболее ответственных участков.

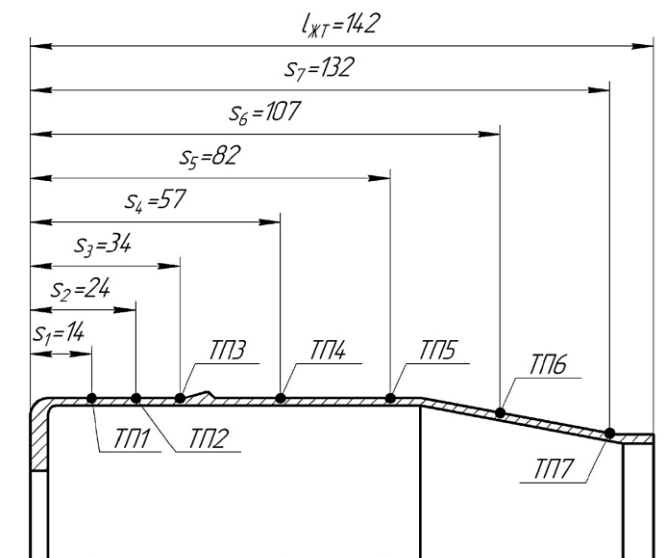


Рисунок 4.10. Схема расположения термопар на стенке модельной горелки

Кабели термопар должны быть защищены термостойкой оплёткой, а их вывод из корпуса – выполнен через передний фланец и нержавеющей трубку с применением обжимного фитинга. Герметизация пространства при этом может обеспечиваться смесью термостойкого герметика и жидкого стекла, что необходимо для сохранения герметичности и устойчивой работы измерительной системы в условиях повышенных температур.

Для регистрации температурных сигналов может использоваться модуль National Instruments NI-9213. Данный модуль имеет 16 входных каналов, 24-битное разрешение аналого-цифрового преобразователя и чувствительность измерения для термопар типа К менее 0,02 °С в режиме высокого разрешения. Такие характеристики делают его пригодным для детального контроля теплового состояния конструкции при проведении длительных огневых испытаний.

С методической точки зрения система измерения и регистрации параметров обеспечивает решение сразу нескольких задач: контроль текущего режима работы стенда, подтверждение корректности задания граничных условий, накопление экспериментального материала и последующую обработку результатов. Именно наличие такого измерительного комплекса позволяет использовать данные испытаний не только для качественного описания работы установки, но и для количественного анализа, включая проверку расчётных моделей и оценку теплового состояния элементов камеры сгорания.

Таким образом, система измерения и регистрации параметров представляет собой многоэлементный измерительный комплекс, интегрированный в общую структуру экспериментального стенда. Её применение обеспечивает получение достоверных данных о расходах, давлениях, температурах и динамических характеристиках процесса, что составляет основу для последующих расчётно-экспериментальных исследований горения метано-водородных смесей.

4.7. Методика проведения испытаний

После завершения подготовки стенда и проверки работоспособности измерительной системы должна быть сформирована методика проведения испытаний объекта исследования как на природном газе, так и на метано-водородной смеси. Основной задачей такой методики должно являться обеспечение воспроизводимого вывода стенда на рабочий режим, корректного задания расходов воздуха и топлива, а также надёжной фиксации параметров, определяющих устойчивость горения.

Испытания на природном газе должны проводиться как в открытом пространстве, так и в кварцевой трубе, поскольку это позволяет последовательно отработать процедуру розжига, стабилизации пламени и контроля режимных параметров перед переходом к более сложным испытаниям на смешанном топливе. В ходе таких работ должны определяться расходные характеристики воздушного и топливных контуров, границы бедного срыва пламени при различных сочетаниях работы пилотного и основного контуров, а также должна выполняться фотофиксация основных режимов работы объекта исследования.

Важным элементом методики должна являться проверка корректности измерения режимных параметров и состава продуктов сгорания. Критерием правильности измерений должно служить согласование коэффициента избытка воздуха, определённого по стендовым измерениям, с коэффициентом избытка воздуха, вычисленным по составу продуктов сгорания после химического анализа. Такое сопоставление должно подтверждать корректность работы стендовых систем и достоверность используемой измерительной базы перед переходом к основным сериям испытаний (рисунок 4.11).

Испытания на метано-водородной смеси должны быть ориентированы на определение влияния состава топлива на границу бед-

ного срыва пламени и на эмиссионные характеристики объекта исследования при работе с кварцевой трубой. Для этих целей должны использоваться программы испытаний, в которых изменяемыми параметрами выступают доля водорода в смеси, перепад давления на объекте исследования и режим работы топливных контуров.

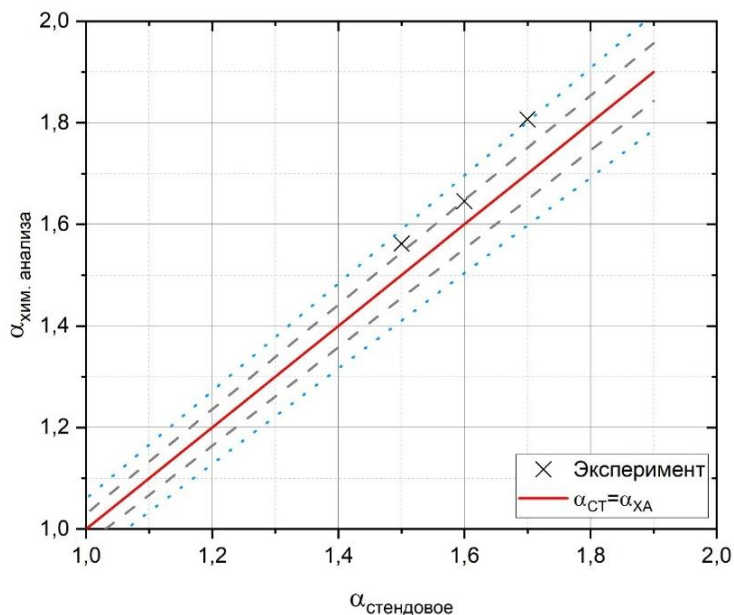


Рисунок 4.11. Сходимость заданного и измеренного коэффициента избытка воздуха при испытаниях на природном газе

Границы бедного срыва пламени для основной зоны должны определяться в диапазоне добавок водорода от 0 до 40 % по объёму при изменении перепада давления примерно от 2 до 5 %. Такой диапазон позволяет оценивать влияние состава топлива на устойчивость горения в условиях, близких к рабочим режимам экспериментального стенда (рисунок 4.12).

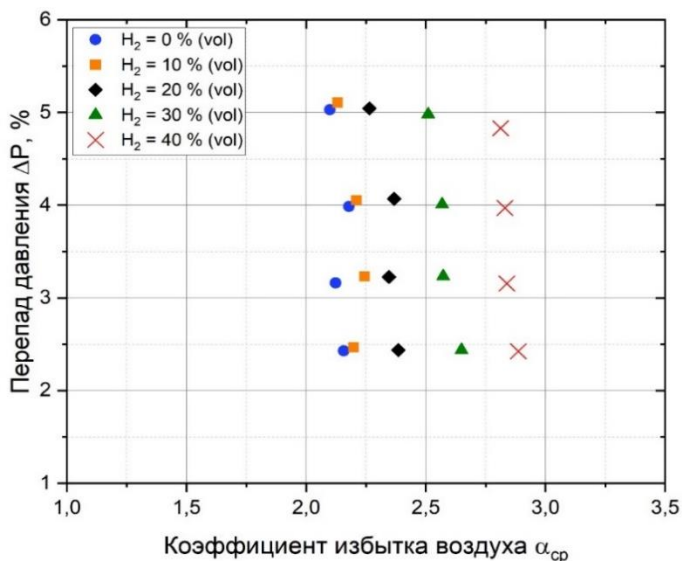


Рисунок 4.12. Результаты определения границы бедного срыва пламени при различных добавках водорода

Методика проведения эксперимента для одного из режимов должна включать несколько последовательных операций. На первом этапе должен подаваться воздух и осуществляться прогрев элементов экспериментальной установки, после чего при достижении требуемого температурного состояния должно выполняться снижение расхода и розжиг объекта исследования с использованием пилотного контура. После розжига в основной контур должна плавно подаваться метано-водородная смесь, должен обеспечиваться выход на заданный режим по температуре воздуха на входе и перепаду давления на объекте исследования, а затем подача топлива в пилотный контур должна отключаться.

На следующем этапе должен выполняться контроль параметров по температуре воздуха и перепаду давления, после чего расход

метано-водородной смеси должен плавно уменьшаться до погасания пламени. В момент срыва должны фиксироваться значения расходов CH_4 и H_2 , что позволяет однозначно определять состав топлива на границе устойчивой работы.

Одной из основных методических трудностей должно являться поддержание требуемого соотношения между расходами водорода и природного газа при их одновременном изменении в процессе поиска границы бедного срыва. Для решения этой задачи могут использоваться расходомеры-регуляторы Bronkhorst, в которых реализуется режим «ведущий–ведомый», позволяющий автоматически поддерживать заданное соотношение компонентов топлива. При этом следует учитывать наличие программного ограничения системы, не позволяющего задавать соотношение расходов, соответствующее содержанию водорода более 40 % по объёму.

Поскольку расходомеры-регуляторы обладают определённой инерционностью, границы бедного срыва пламени должны определяться неоднократно в разные дни, а итоговым значением для каждого перепада давления должно приниматься среднее по серии экспериментов. Такой подход повышает воспроизводимость результатов и снижает влияние случайных отклонений, связанных с переходными процессами в системе подачи топлива.

Методика испытаний должна быть построена таким образом, чтобы обеспечивать не только получение данных о границах устойчивого горения, но и возможность последующего анализа взаимосвязи между составом топлива, коэффициентом избытка воздуха и характеристиками пламени. Это особенно важно для задач верификации математических моделей, где требуется сопоставление экспериментально установленных пределов устойчивой работы с расчётными прогнозами по структуре и стабилизации пламени.

Таким образом, методика проведения испытаний должна представлять собой регламентированную последовательность операций

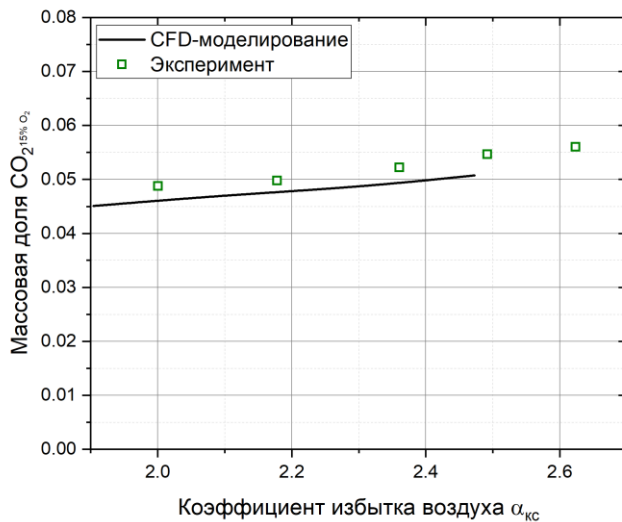
по выводу стенда на режим, управлению составом топлива, регистрации параметров и фиксации момента срыва пламени. Её применение должно обеспечивать получение воспроизводимых экспериментальных данных, необходимых для анализа работы объекта исследования на природном газе и метано-водородных смесях в широком диапазоне режимных условий.

4.8. Результаты экспериментальных исследований

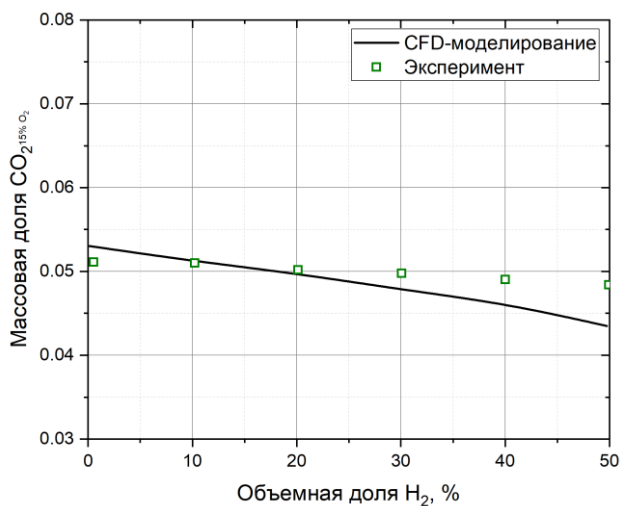
После отработки методики испытаний должны быть получены экспериментальные и расчётно-экспериментальные данные по устойчивости горения и эмиссии вредных веществ в камере сгорания с кварцевой трубой при работе на природном газе и метано-водородных смесях. Основной задачей анализа таких данных должно являться их сопоставление с результатами математического моделирования для оценки степени адекватности расчётной постановки и последующей корректировки параметров модели.

При анализе должны отдельно рассматриваться два основных режимных параметра: коэффициент избытка воздуха при содержании водорода в топливе 50 % по объёму и процентное содержание водорода в топливе в диапазоне от 0 до 50 %. Такое разделение позволяет оценивать, насколько математическая модель корректно воспроизводит влияние как состава топлива, так и режима работы объекта исследования на устойчивость горения и состав продуктов сгорания (рисунок 4.13).

Одной из важных задач должно являться сопоставление экспериментальных и расчётных данных по интегральным параметрам режима. Для исследованных режимов расхождение между заданным и полученным коэффициентом избытка воздуха не должно превышать 3,5 %, что может рассматриваться как признак корректного задания граничных условий и допустимой согласованности между расчётной и экспериментальной частью исследования.



а)



б)

Рисунок 4.13. Сравнение экспериментальных и расчётных значений концентраций CO_2 в зависимости от:

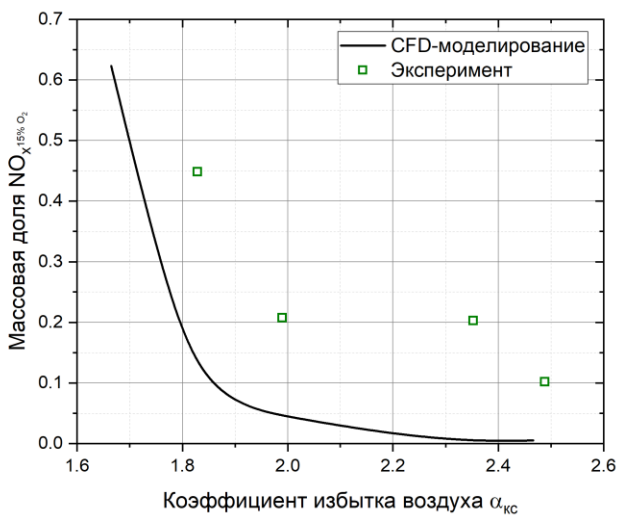
а) коэффициента избытка воздуха; б) доли водорода в топливе

Анализ устойчивости горения должен использоваться для сопоставления экспериментально установленных границ устойчивой работы с расчётными зависимостями, полученными в рамках математической модели. При увеличении доли водорода до 40 % по объёму граница бедного срыва пламени может расширяться в среднем на 26 % по сравнению с режимом работы на природном газе. Такая зависимость должна рассматриваться не как самостоятельный конечный вывод, а как экспериментальная база для проверки того, насколько расчётная модель корректно описывает влияние состава топлива на устойчивость пламени.

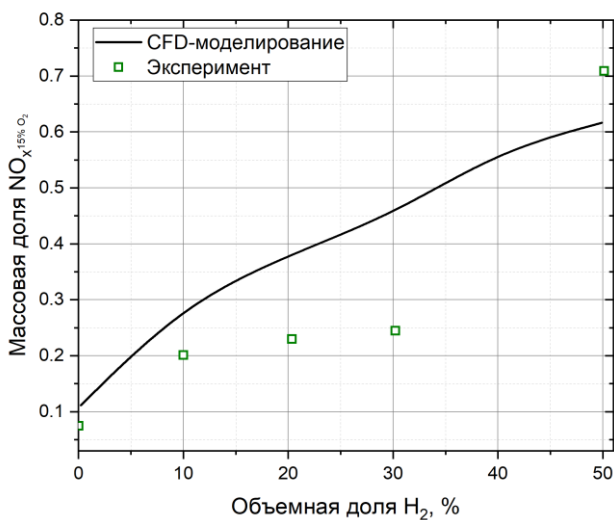
При этом зависимость между содержанием водорода и расширением области устойчивого горения не носит строго линейного характера. Именно поэтому при сопоставлении расчётных и экспериментальных данных необходимо учитывать не только общий тренд, но и характер изменения кривой по всему диапазону исследованных режимов.

С точки зрения эмиссионных характеристик при увеличении коэффициента избытка воздуха должно наблюдаться снижение концентрации оксидов азота (рисунок 4.14). Для серии расчётов при содержании 50 % водорода в топливе уровень NOx может снижаться от 0,626 ppm при коэффициенте избытка воздуха около 1,68 до значений порядка 0,002–0,004 ppm при коэффициенте избытка воздуха около 2,40–2,44. Такая зависимость должна использоваться для проверки способности математической модели воспроизводить изменение интенсивности термического механизма образования NOx при обеднении смеси.

Концентрация CO в той же серии режимов может сначала снижаться с 19,55 ppm до примерно 1,02 ppm, а затем на наиболее бедных режимах возрастать до 2,43–2,66 ppm. Такое поведение должно рассматриваться как важный признак изменения полноты окисления вблизи границы устойчивости пламени и, соответственно, как чувствительный критерий при корректировке расчётной модели.



а)



б)

Рисунок 4.14. Сравнение экспериментальных и расчётных значений концентраций NO в зависимости от:

а) коэффициента избытка воздуха; б) доли водорода в топливе

Изменение состава топлива также должно использоваться как один из основных факторов верификации математической модели. При увеличении доли водорода от 0 до 50 % расчётная массовая доля CO₂ на выходе из камеры может снижаться примерно от 0,053 до 0,044, что связано с уменьшением доли углерода в топливной смеси. Для тех же режимов концентрация NO_x может возрасти от 0,12 ppm до 0,63 ppm, а концентрация CO может изменяться в диапазоне примерно от 14,0 до 20,4 ppm.

Указанные зависимости должны использоваться для оценки того, насколько математическая модель корректно описывает совместное влияние состава топлива и режима работы на параметры продуктов сгорания. При наличии расхождений между экспериментальными и расчётными данными именно такие зависимости должны служить основанием для уточнения граничных условий, параметров турбулентности, характеристик горения и используемых подмоделей переноса примесей.

Таким образом, экспериментальные и расчётно-экспериментальные исследования должны обеспечивать получение массива данных по устойчивости горения и эмиссионным характеристикам объекта исследования при работе на природном газе и метано-водородных смесях. Эти данные должны использоваться для сопоставления с результатами математического моделирования, оценки степени соответствия расчётных и экспериментальных зависимостей, а также для последующей корректировки параметров математической модели. Такой подход позволяет использовать экспериментальную часть работы не только для описания наблюдаемых закономерностей, но и как основу для повышения достоверности расчётного инструментария.

Итак, рассмотрены состав и структура экспериментального стенда, предназначенного для исследования характеристик объекта исследования при работе на природном газе и метано-водородных

смесях. Описаны система подачи компонентов топлива, измерительная система, средства регистрации параметров и методика проведения испытаний, обеспечивающие получение воспроизводимых экспериментальных данных.

Показано, что принятая структура стенда позволяет независимо подавать природный газ и водород, регулировать их расходы в требуемых диапазонах, формировать смеси заданного состава и контролировать основные режимные параметры в процессе испытаний. Используемая измерительная система обеспечивает регистрацию температур, давлений, расходов и состава продуктов сгорания, что создаёт необходимую основу для последующего сопоставления экспериментальных и расчётных данных.

В рамках разработанной методики испытаний обеспечивается выполнение розжига, вывод объекта исследования на стационарный режим, варьирование коэффициента избытка воздуха и состава топлива, а также определение границ устойчивого горения. Полученные экспериментальные и расчётно-экспериментальные данные позволяют анализировать влияние режимных параметров на устойчивость пламени и эмиссионные характеристики объекта исследования.

Результаты, представленные в главе, используются для сопоставления с данными математического моделирования, оценки степени соответствия расчётных и экспериментальных зависимостей и последующей корректировки параметров модели. Таким образом, материалы главы 4 служат основой для валидации и уточнения математической модели объекта исследования при работе на природном газе и метано-водородных смесях.

ГЛАВА 5. МОДЕЛЬНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

В данной главе рассматриваются конструктивные решения, положенные в основу модельных горелочных устройств и камер сгорания, используемых при исследовании процессов горения природного газа и метано-водородных смесей. Основное внимание уделено принципам построения горелочных устройств, организации подачи топлива по отдельным контурам, компоновке модельной камеры сгорания, конструкции жаровой трубы и вопросам изготовления экспериментальных образцов.

Рассматриваемые конструкции предназначены для изучения устойчивости горения, структуры факела, условий смесеобразования и особенностей рабочего процесса при изменении состава топлива. Их применение позволяет варьировать режимные параметры, выполнять визуальный контроль зоны горения и отрабатывать отдельные технические решения до перехода к более сложным компоновкам.

При построении модельных камер сгорания особое значение имеют топливная гибкость, модульность конструкции, воспроизводимость режимов и удобство экспериментальной сборки. В связи с этим в главе последовательно рассмотрены принципы построения модельных горелочных устройств, двухконтурные и трёхконтурные схемы подачи топлива, организация основного и дежурного контуров, а также конструкция камеры сгорания и её основных элементов.

5.1. Принципы построения модельных горелочных устройств

Модельные горелочные устройства используются для исследования процессов смесеобразования, стабилизации пламени и горения природного газа и метано-водородных смесей в условиях, допускающих управляемое изменение геометрических и режимных параметров. По этой причине их конструкция строится на сочетании простоты, модульности и функционального разделения отдельных зон, каждая из которых выполняет собственную задачу в организации рабочего процесса. Пример типичного горелочного устройства представлен на рисунке 5.1.

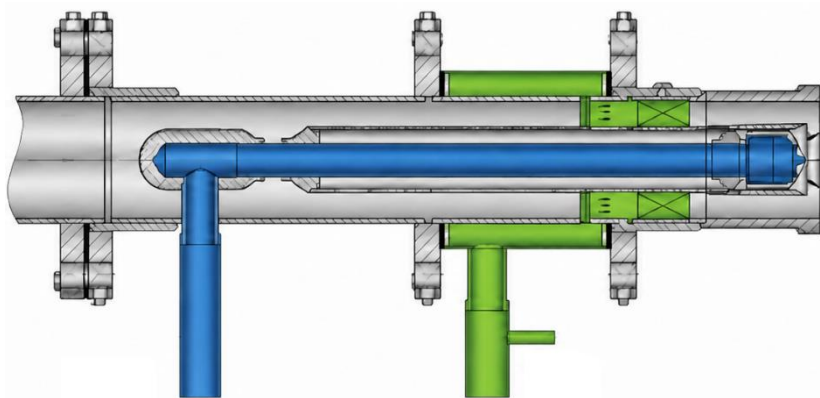


Рисунок 5.1. Обобщённая схема двухконтурного модельного горелочного устройства

Одним из основных принципов является разделение области стабилизации пламени и области предварительной подготовки топливоздушнoй смеси. Такой подход позволяет отдельно управлять условиями воспламенения и основного горения, а также более гибко изменять режим работы устройства при переходе от природного газа к смесям с добавкой водорода. При этом зона стабилизации

обеспечивает удержание пламени в требуемом положении, а зона предварительного смешения формирует условия для выравнивания состава смеси и подготовки потока к основному горению.

Разделение функций отдельных зон особенно важно при исследовании топлив с различной реакционной способностью. При увеличении содержания водорода изменяются скорость распространения пламени, интенсивность тепловыделения и условия стабилизации, поэтому конструкция модельного устройства должна допускать независимое изменение параметров, влияющих на воспламенение и развитие факела. В этом случае модельное горелочное устройство становится не только исследуемым объектом, но и инструментом целенаправленного воспроизведения различных режимов горения.

Не менее важным принципом является многоузловая компоновка конструкции. Горелочное устройство, система подачи топлива, корпус камеры, жаровая труба и соединительные элементы целесообразно рассматривать как взаимосвязанные, но конструктивно разделённые части. Такое построение упрощает изготовление, настройку, замену отдельных узлов и последовательную модернизацию образца по мере усложнения экспериментальной программы.

Модульная схема позволяет изменять отдельные элементы конструкции без полного пересмотра всей камеры сгорания (рисунок 5.2). Это особенно важно при сравнении различных вариантов смесительных устройств, дежурных контуров и жаровых труб, когда требуется сохранить общую компоновку стенда и при этом последовательно исследовать влияние локальных конструктивных изменений на характеристики рабочего процесса. В результате обеспечивается сопоставимость получаемых данных и снижается трудоёмкость перехода от одной конфигурации к другой.

Следующий принцип связан с обеспечением визуальной и инструментальной доступности зоны горения. Для экспериментальных исследований важно иметь возможность наблюдать факел, фиксировать его форму и положение, а также выполнять измерения параметров потока и состава продуктов сгорания без существенного нарушения структуры течения. Именно поэтому в модельных камерах сгорания широко используются решения, допускающие прямой визуальный контроль зоны пламени и удобное размещение измерительной аппаратуры.

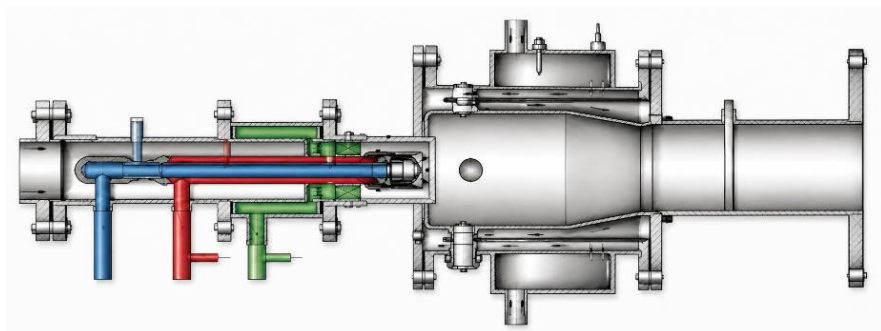


Рисунок 5.2. Структурная схема модельной камеры сгорания

Визуальная доступность особенно важна при изучении устойчивости горения, границ бедного срыва пламени и характера изменения структуры факела при варьировании состава топлива. Наличие прозрачных участков жаровой трубы или специальных смотровых зон позволяет сопоставлять инструментальные данные с наблюдаемой картиной горения, что повышает информативность эксперимента. Одновременно конструкция должна сохранять требуемую жёсткость, герметичность и термостойкость, поскольку зона горения работает при высоких температурах и значительных тепловых нагрузках (рисунок 5.3).

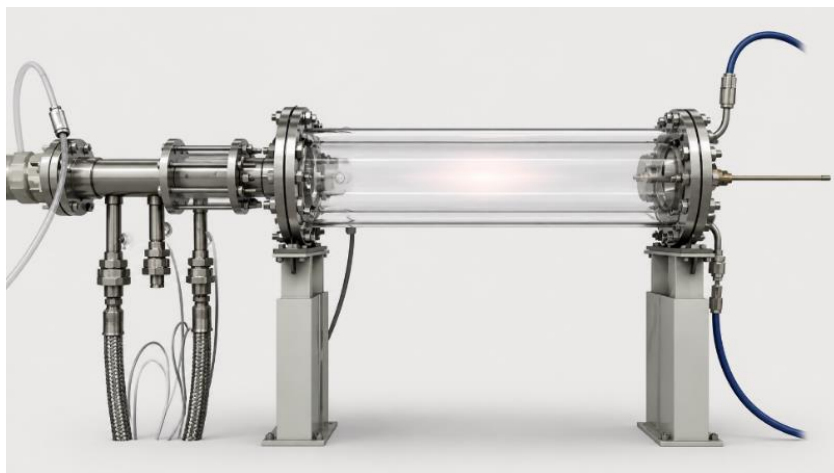


Рисунок 5.3. Модельная камера сгорания с кварцевой жаровой трубой для визуального наблюдения факела

Отдельное значение имеет принцип топливной гибкости. Конструкция модельного горелочного устройства должна допускать работу не только на природном газе, но и на метано-водородных смесях различного состава, поскольку изменение доли водорода существенно влияет на скорость распространения пламени, устойчивость горения, температуру процесса и эмиссионные характеристики. По этой причине при построении модельных устройств необходимо предусматривать возможность устойчивой работы в широком диапазоне соотношений CH_4/H_2 и сохранение управляемости режима при изменении расходов топлива и воздуха.

Топливная гибкость определяется не только диапазоном допустимых составов смеси, но и характером организации подачи топлива по отдельным контурам. Возможность раздельного дозирования природного газа и водорода, а также распределения топлива между основным и дежурным контурами позволяет исследовать влияние состава смеси не только на общий режим, но и на локаль-

ные условия стабилизации пламени. Это делает модельное устройство удобной основой для перехода от простых одноконтурных решений к двухконтурным и трёхконтурным схемам.

При разработке таких устройств необходимо учитывать и возможность поэтапного усложнения схемы. Базовые конструктивные решения должны служить основой для дальнейшего перехода к более совершенным вариантам горелок, включая конструкции с несколькими контурами подачи топлива и исполнения, ориентированные на работу с высоким содержанием водорода. Такой путь разработки позволяет сначала исследовать общие закономерности смесеобразования и стабилизации, а затем переходить к более сложным схемам, не теряя преемственности между отдельными этапами работы.

Наконец, важным принципом является технологичность изготовления и сборки. Даже экспериментальный образец должен иметь такую конструкцию, которая допускает точное изготовление элементов, надёжную стыковку узлов, повторяемость геометрии и удобство стендовой эксплуатации. Это особенно важно в тех случаях, когда результаты испытаний сопоставляются между несколькими конфигурациями устройства или используются для последующей валидации расчётных моделей (рисунок 5.4).

Технологичность конструкции связана также с выбором материалов, способом изготовления жаровой трубы, организацией соединений и возможностью установки датчиков в строго заданных сечениях. При недостаточной точности изготовления или нестабильности сборки влияние геометрических отклонений может оказаться сопоставимым с влиянием исследуемых режимных факторов, что снижает достоверность получаемых выводов. Поэтому требования к технологичности в данном случае напрямую связаны с требованиями к воспроизводимости эксперимента.



Рисунок 5.4. Пример реализации технологичной конструкции жаровой трубы и корпуса камеры для экспериментальных исследований

Таким образом, построение модельных горелочных устройств основывается на нескольких взаимосвязанных требованиях: разделении функций отдельных зон, модульной компоновке, визуальной доступности процесса горения, топливной гибкости и технологичности.

5.2. Горелочное устройство с двухконтурной подачей топлива

Горелочное устройство с двухконтурной подачей топлива рассматривается как конструкция, в которой подвод топлива в пилотную и основную зоны организован по независимым линиям. Такая компоновка позволяет отдельно задавать расходы топлива в зоне стабилизации пламени и в зоне предварительного смесеобразования, что особенно важно при исследовании режимов работы на природном газе и метано-водородных смесях (рисунок 5.5).

В двухконтурной схеме пилотный контур используется для формирования устойчивой зоны воспламенения и удержания пламени, тогда как основной контур связан с подачей топлива в область подготовки предварительно перемешанной смеси. За счёт этого становится возможным изменять распределение топлива между зонами горения и исследовать влияние такого распределения на устойчивость факела, характеристики смесеобразования и условия работы горелочного устройства.

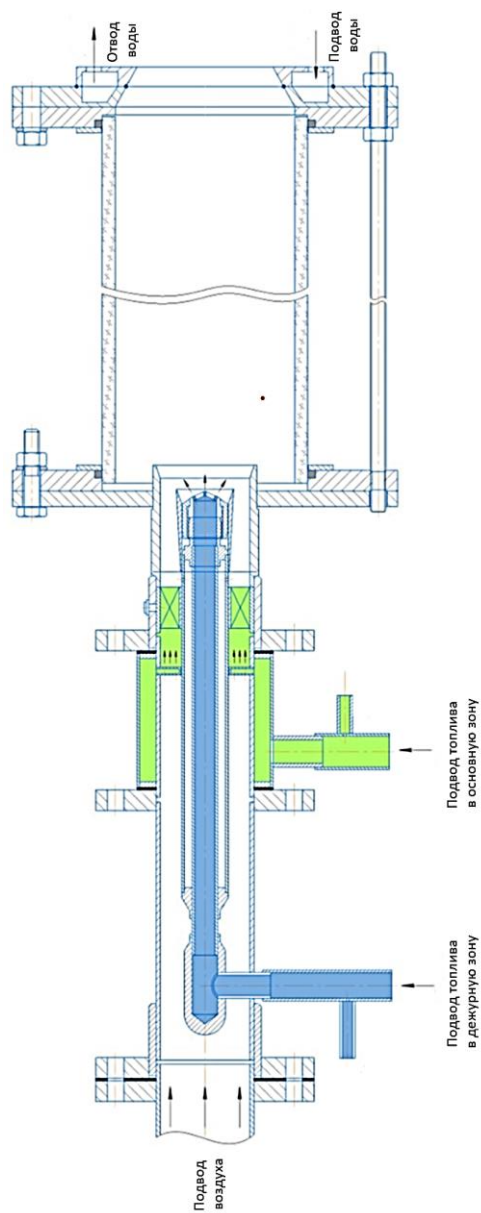


Рисунок 5.5. Схема двухконтурного горелочного устройства с выделением пилотной и основной зон подачи топлива

Система подачи топлива в таком устройстве строится на независимой подаче природного газа и водорода по двум отдельным линиям – в пилотный и основной контуры.

Раздельное регулирование расходов в каждом из контуров позволяет изменять не только общий состав подаваемого топлива, но и характер его распределения между зонами стабилизации и основного горения (рисунок 5.6). Это создаёт необходимые условия для исследования влияния соотношения расходов в пилотном и основном контурах на структуру пламени и устойчивость рабочего процесса.



Рисунок 5.6. Панель управления расходами и схема двухконтурной подачи природного газа и водорода

Конструктивно двухконтурная схема основана на функциональном разделении центральной и периферийной частей горелочного устройства. Через центральное тело осуществляется подвод топлива в пилотный контур, а также организация подачи в зону

предварительной подготовки смеси в следе за воздушным завихрителем. Такая компоновка позволяет совместить локальную стабилизацию пламени с формированием более однородной топливовоздушной смеси в основном потоке (рисунок 5.7).

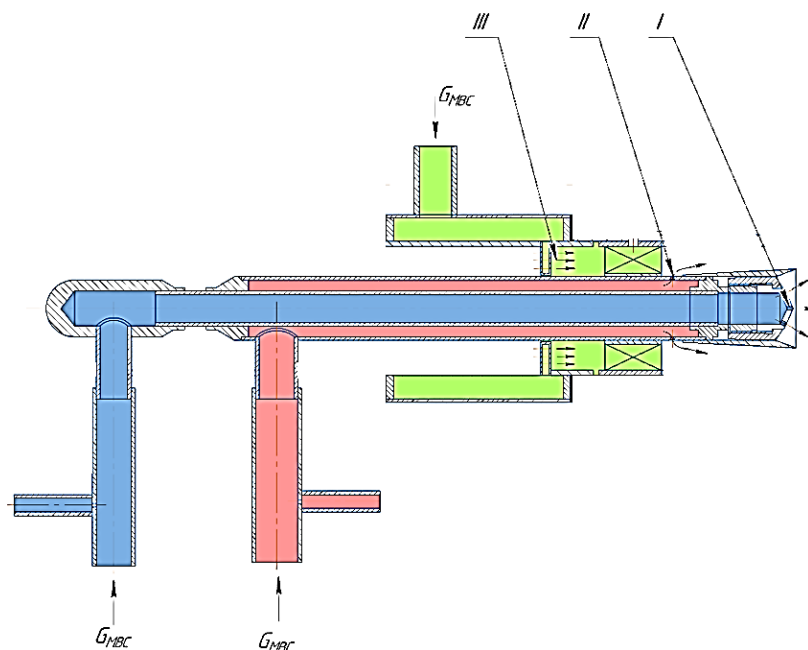


Рисунок 5.7. Центральное тело горелочного устройства с указанием зон и каналов подачи топлива в пилотный и основной контуры:
 I – подача топлива в пилотный контур; II – радиальная подача топлива;
 III – подача топлива в основной контур

Подача топлива в пилотную зону осуществляется через струйную форсунку со сменным соплом (рисунок 5.8). Такое исполнение расширяет возможности экспериментальной отработки, поскольку позволяет изменять параметры струйной подачи без переработки

всего узла. В результате становится возможным исследовать влияние геометрии сопла и характера подачи топлива на устойчивость воспламенения и поведение факела в прифронтной области.



Рисунок 5.8. Струйная форсунка пилотного контура со сменным соплом

Основной контур связан с участком подготовки предварительно перемешанной смеси. Для этой цели используется сменный коллектор (рисунок 5.9), обеспечивающий различные законы распределения топлива по радиусу в выходном сечении горелочного устройства. Такая схема позволяет исследовать влияние радиального распределения топлива на структуру течения, процессы смесеобразования и характеристики горения.

Дополнительной особенностью конструкции является возможность подачи топлива через радиальные отверстия на выходе из лопаток завихрителя. В одном из вариантов эти отверстия могут использоваться как для подвода топлива, так и для подачи охлаждающего воздуха, что делает схему более гибкой с точки зрения организации процессов в прифронтной зоне. Подобное решение позволяет более

точно управлять взаимодействием топлива с закрученным воздушным потоком непосредственно перед зоной горения.



Рисунок 5.9. Сменный топливный коллектор горелочного устройства с элементами подачи топлива в основной контур

В состав горелочного устройства входят участок подачи топлива, ресивер, патрубки подвода смеси, корпус с входным и выходным фланцами и сменный завихритель. В конструкции применяется осевой завихритель с углом установки лопаток 55° , а его положение относительно патрубков подачи смеси может фиксироваться в требуемом угловом положении. Это позволяет изменять условия закрутки потока и анализировать их влияние на структуру течения и устойчивость факела.

Таким образом, двухконтурное горелочное устройство сочетает пилотную струйную подачу топлива с отдельным основным контуром предварительного смесеобразования. Такая схема обеспечивает

возможность независимого регулирования расходов по контурам и служит основой для исследования распределения топлива между зонами горения при работе на природном газе и метано-водородных смесях различного состава.

5.3. Конструкция модельной камеры сгорания

Модельная камера сгорания используется для исследования процессов горения природного газа и метано-водородных смесей в условиях, позволяющих анализировать влияние состава топлива, скорости потока, температуры на входе и конструктивных особенностей горелочного устройства на устойчивость горения и характеристики рабочего процесса. По своей компоновке она представляет собой экспериментальный образец, в котором объединены участок подвода и распределения топлива, горелочное устройство, жаровая труба и выходной участок (рисунок 5.10).

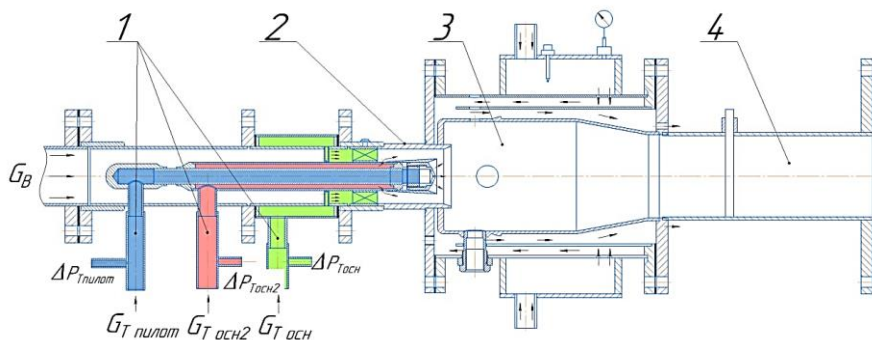


Рисунок 5.10. Схема модельной камеры сгорания с указанием участка подвода топлива, горелочного устройства, жаровой трубы и выходного участка:

- 1 – участок подвода и распределения топлива по трем контурам;
- 2 – горелочное устройство; 3 – цилиндрическая жаровая труба с конвективной системой охлаждения; 4 – выходной участок

В состав камеры сгорания входят участок подвода и распределения топлива, горелочное устройство, цилиндрическая жаровая труба с системой охлаждения и выходной участок. Такое построение обеспечивает последовательное формирование потока: на входе выполняются подвод и распределение топлива, в горелочном устройстве организуются закрутка воздуха и смесеобразование, после чего продукты сгорания проходят через рабочий объём камеры и направляются в выходной тракт.

Конструкция камеры выполнена по модульному принципу, что позволяет заменять отдельные элементы без полной переработки всего образца (рисунок 5.11). Наиболее важными в этом отношении являются сменный участок подвода топлива и возможность установки различных вариантов рабочих элементов в составе горелочного устройства. Благодаря этому одна и та же камера может использоваться для сравнительной отработки нескольких вариантов организации смесеобразования и стабилизации пламени.

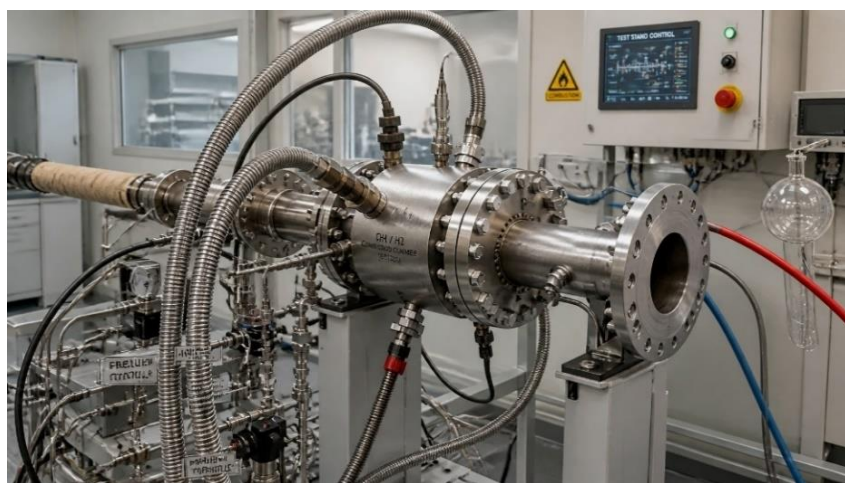


Рисунок 5.11. Пример общего вида модельной камеры сгорания в сборе с металлической жаровой трубой

Корпусная часть камеры обеспечивает взаимную центровку основных узлов, герметичность соединений и возможность стыковки с измерительными и вспомогательными системами стенда. Во входной части размещается горелочное устройство с фланцевым присоединением, а в выходной части предусматривается участок со штуцерами для определения параметров продуктов сгорания. Такая компоновка упрощает монтаж камеры на стенде и повышает воспроизводимость результатов при повторных сборках.

Важной особенностью конструкции является возможность использования как металлической, так и кварцевой жаровой трубы (рисунок 5.12). Кварцевое исполнение применяется при визуальных исследованиях и позволяет наблюдать зону горения и фиксировать форму факела, тогда как металлическая жаровая труба используется при штатной отработке камеры и подключении полного комплекса измерительных систем. За счёт этого модельная камера сочетает функции исследовательского и технологически отработываемого образца.



Рисунок 5.12. Пример модельной камеры сгорания с кварцевой жаровой трубой для визуального наблюдения факела

Конструкция камеры также предусматривает размещение средств измерения параметров потока по её тракту. Контроль осуществляется на мерном участке, в топливной системе, в системе охлаждения и на выходе из камеры, что позволяет регистрировать расходы, давления и температуры в основных сечениях установки. Тем самым модельная камера сгорания ориентирована не только на обеспечение устойчивого горения, но и на получение полной экспериментальной информации о рабочем процессе.

Жаровая труба модельной камеры сгорания представляет собой цилиндрический участок проточной части, в котором непосредственно протекают процессы горения. Её назначение состоит в формировании требуемого объёма для развития факела и обеспечении необходимых условий теплообмена между продуктами сгорания и ограждающими поверхностями (рисунок 5.13).

Рисунок 5.13. Схема жаровой трубы модельной камеры сгорания

При выборе конструкции жаровой трубы особое внимание уделяется возможности проведения корректных экспериментальных исследований. Отсутствие отверстий охлаждения в стенке позволяет исключить подвод холодного воздуха непосредственно в проточную часть и тем самым не искажать структуру течения и температурные поля внутри камеры. Это имеет принципиальное значение при анализе влияния состава топлива и режимных параметров на характеристики горения и эмиссионные показатели.

Изготовление жаровой трубы выполняется с использованием технологии селективного лазерного сплавления из жаропрочного никелевого сплава, рассчитанного на работу при температурах, характерных для камер сгорания газотурбинных установок. После формирования заготовки производится механическая обработка, обеспечивающая требуемую точность геометрии и посадочных поверхностей для стыковки с горелочным устройством и выходным участком (рисунок 5.14).



Рисунок 5.14. Жаровая труба, изготовленная методом селективного лазерного сплавления после механической обработки

В зоне соединения жаровой трубы с прилегающими элементами предусматриваются компенсационные зазоры, необходимые для учёта теплового расширения материала при нагреве. Со стороны горелочного устройства величина зазора составляет около 3 мм, а на выходной стороне – около 1,5 мм, что позволяет снижать уровень термических напряжений в области соединений (рисунок 5.15).

Система охлаждения камеры сгорания построена по схеме внешнего конвективного охлаждения жаровой трубы. Охлаждающий воздух подводится в ресивер, окружающий трубу, затем направляется вдоль её наружной поверхности по формируемым каналам и далее отводится в атмосферу через отверстия в замыкающем фланце. Параметры воздуха в системе охлаждения контролируются с помощью датчиков давления и температуры, что позволяет оценивать тепловое состояние конструкции в процессе испытаний.



Рисунок 5.15. Корпус жаровой трубы с ресивером и элементами подвода и отвода охлаждающего воздуха

Для визуализации исследований используется вариант камеры с кварцевой жаровой трубой. Кварцевая труба имеет диаметр порядка 80 мм, длину около 400 мм и допускает работу при температурах до 1150 °С. Такое исполнение обеспечивает оптический доступ к зоне горения и позволяет фиксировать форму и положение факела в различных режимах (рисунок 5.16).

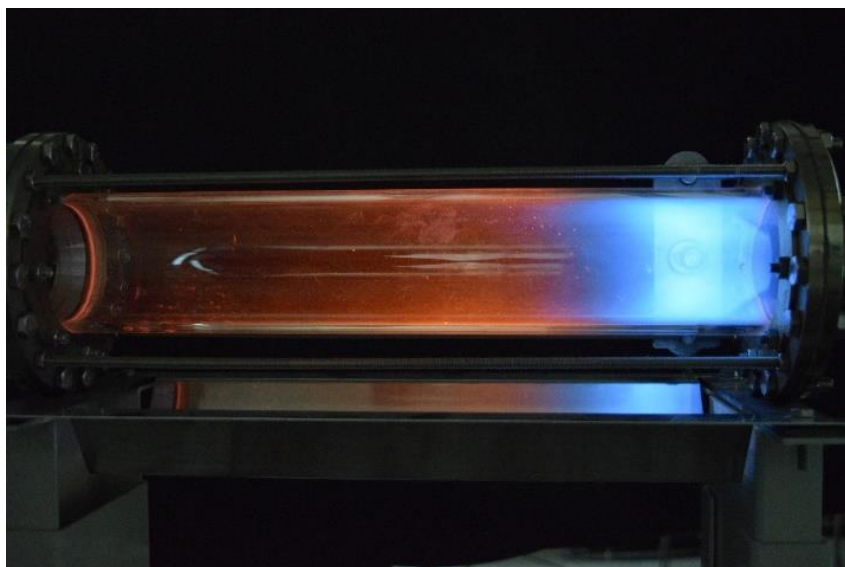


Рисунок 5.16. Модельная камера сгорания с кварцевой жаровой трубой

Использование кварцевой трубы даёт возможность проводить фото- и видеофиксацию процесса горения, а также сопоставлять визуальные данные с измерениями параметров потока и результатами численного моделирования. Таким образом, сочетание металлической жаровой трубы и кварцевого исполнения обеспечивает как отработку теплового состояния элементов камеры, так и детальное исследование структуры факела при сжигании метано-водородных топлив.

5.5. Особенности изготовления и сборки экспериментальных образцов

Изготовление экспериментальных образцов модельных горелочных устройств и камер сгорания требует соблюдения ряда конструктивно-технологических ограничений, связанных с точностью геометрии, повторяемостью параметров и обеспечением безопасной эксплуатации на стенде. При выборе технологического маршрута исходят из необходимости совместить требования к прочности и термостойкости элементов с возможностью их последующей замены, доработки и модернизации в ходе экспериментальной отработки.

Ключевые элементы проточной части, к которым относится жаровая труба, изготавливаются с применением технологий, обеспечивающих высокую точность и стабильность геометрии. Для металлической жаровой трубы используется селективное лазерное сплавление с последующей механической обработкой посадочных поверхностей и сопрягаемых участков. Такой подход позволяет реализовать сложную пространственную форму детали, выдержать требуемую толщину стенки и обеспечить надёжную стыковку с корпусом камеры и горелочным устройством.

Участки подвода топлива, завихрители, форсунки, элементы корпуса и соединительные детали выполняются традиционными методами механической обработки. При этом особое внимание уделяется точности изготовления отверстий и каналов, по которым подаются топливо и воздух, поскольку отклонения по диаметрам, соосности и взаимному расположению элементов непосредственно влияют на структуру течения и воспроизводимость экспериментальных результатов. Сменное исполнение части деталей, включая сопла, коллекторы и завихрители, предусматривается уже на стадии конструкторской проработки и дополнительно учитывается при назначении допусков, посадок и схем базирования деталей при обработке.

Сборка модельной камеры сгорания выполняется поэтапно и начинается с подготовки узла горелочного устройства. На этом этапе устанавливаются завихритель, центральное тело, участки подвода топлива, уплотнительные элементы и фланцевые соединения, после чего контролируются взаимное положение деталей и корректность прохождения каналов подачи топлива и воздуха. Такая последовательность позволяет ещё до монтажа камеры убедиться в работоспособности наиболее ответственного входного узла и исключить ошибки, способные повлиять на смесеобразование и стабилизацию пламени.

После предварительной сборки горелочное устройство стыкуется с корпусом камеры, в который монтируется жаровая труба с обеспечением требуемых компенсационных зазоров и фиксации по оси и углу поворота. Следующим шагом является монтаж системы охлаждения и выходного участка, включая ресивер охлаждающего воздуха, элементы подвода и отвода воздуха, а также замыкающий фланец. На выходном участке устанавливаются штуцеры для замера давления и температуры продуктов сгорания и, при необходимости, дросселирующие насадки, применяемые при работе на повышенном давлении.

Особое место в процессе сборки занимает установка средств измерения и подготовка посадочных мест под датчики. В корпусе камеры и на сопрягаемых участках предусматриваются отверстия под датчики давления, термопары и газоотборные зонды, которые на этапе предварительной сборки могут закрываться имитаторами или технологическими заглушками. При проведении стендовых испытаний вместо заглушек монтируются рабочие датчики, после чего выполняется проверка герметичности соединений и корректности ориентации чувствительных элементов относительно направления потока.

При использовании кварцевой жаровой трубы порядок сборки несколько изменяется по сравнению с металлическим исполнением камеры. Кварцевый участок устанавливается в специальный корпус, обеспечивающий его фиксацию и защиту от механических перегрузок, после чего собираются входная часть с горелочным устройством и выходной участок с сохранением визуального доступа к зоне горения. Дополнительно контролируется состояние уплотнений и компенсационных зазоров, чтобы исключить возникновение повышенных термических напряжений в стеклянном элементе при нагреве (рисунок 5.17).



Рисунок 5.17. Модельная камера сгорания с установленной кварцевой трубой и смонтированными измерительными системами

Завершающим этапом является контрольная сборка на стенде без подачи топлива и без воспламенения смеси. На этом этапе проверяются взаимная стыковка всех узлов, работоспособность запорной и регулирующей арматуры, корректность подключения измерительных каналов и систем безопасности, а также удобство доступа к обслуживаемым элементам. Только после завершения этих операций экспериментальный образец допускается к пусконаладочным работам и последующему проведению огневых испытаний.

5.6. Пусконаладочные работы и подготовка к огневым испытаниям

Перед проведением огневых испытаний модельной камеры сгорания выполняется комплекс пусконаладочных работ, цель которых состоит в проверке работоспособности всех систем, корректности сборки и соответствия параметров требованиям безопасности. Эти операции позволяют выявить и устранить возможные несоответствия на «холодном» этапе, то есть до подачи топлива и воспламенения смеси.

Первым этапом пусконаладочных работ является проверка герметичности соединений воздушной и топливной магистралей. С использованием сжатого воздуха и тестового давления контролируются фланцевые стыки, резьбовые соединения, участки установки датчиков и арматуры, а все выявленные утечки устраняются до перехода к следующим операциям. Такая последовательность необходима для исключения нештатных ситуаций уже на начальном этапе подготовки стенда.

Далее проверяется работоспособность системы подачи топлива. Последовательно включаются электромагнитные клапаны, регулирующие органы и расходомеры, выполняется тестовый прогон по контурам без фактической подачи горючего либо с использованием инертной среды, а также контролируется согласованность команд управления и отклика исполнительных элементов. На этом этапе особенно важна корректность сигналов от датчиков расхода, давления и температуры и их правильная передача в систему регистрации данных.

Отдельно проверяется система подготовки и подачи воздуха. Контролируется работа компрессоров, подогревателей, расходомеров и регулирующих клапанов, измеряется диапазон доступных расходов и температур на входе в камеру, а также выполняются тестовые режимы с различными значениями расхода воздуха для оценки

устойчивости работы стенда в целом. Эти операции позволяют убедиться в том, что воздушный тракт способен обеспечить необходимые режимы ещё до начала огневой программы.

Важным элементом подготовки к огневым испытаниям является настройка и проверка системы измерений. На данном этапе устанавливаются и подключаются рабочие датчики давления, термомпары, газоанализаторы и средства регистрации колебаний, выполняются их калибровка, проверка каналов и согласование с системой сбора данных. Особое внимание уделяется времени отклика измерительных трактов, уровню шумов и устойчивости сигнала при переходе между режимами работы стенда.

Отдельный блок пусконаладочных работ связан с системой газоанализа и сигнализации по предельно допустимым концентрациям компонентов топлива. Проверяется работа датчиков утечки метана и водорода, блоков сигнализации и алгоритмов автоматического отключения подачи газа при превышении пороговых значений, а также проводятся имитационные испытания аварийных сценариев. Такая проверка необходима для подтверждения готовности системы безопасности к работе в условиях реального эксперимента.

При использовании кварцевой жаровой трубы дополнительно настраивается комплекс визуальных наблюдений. Определяются положение камер, освещение, углы обзора, проверяется работоспособность средств фото- и видеофиксации в условиях повышенной температуры и яркого излучения факела. Это позволяет ещё до начала огневых испытаний убедиться в том, что зона горения будет доступна для визуального анализа и сопоставления с измерительными данными.

Заключительным этапом подготовки является проведение серии холодных прогонов, в ходе которых имитируются последовательность включения систем, подача воздуха, запуск измерений и

отработка алгоритма перехода к подаче топлива, но без фактического воспламенения смеси. Такая процедура позволяет проверить согласованность работы всех подсистем, уточнить порядок действий оператора и подготовить стенд к безопасному проведению первых огневых испытаний.

В данной главе были рассмотрены конструктивные решения, положенные в основу экспериментальных образцов модельных горелочных устройств и камер сгорания, предназначенных для исследования процессов горения природного газа и метано-водородных смесей. Показано, что при разработке таких устройств определяющее значение имеют возможность раздельной организации подачи топлива, модульность конструкции, технологичность изготовления и приспособленность образца к проведению стендовых исследований.

На основе анализа компоновочных решений установлено, что двухконтурная схема подачи топлива обеспечивает независимое управление расходами в пилотной и основной зонах, что создаёт необходимые условия для исследования воспламенения, стабилизации пламени и особенностей смесеобразования в широком диапазоне составов метано-водородного топлива. Такая конструкция позволяет изменять распределение топлива между зонами горения и тем самым адаптировать рабочий процесс к различным экспериментальным режимам.

Рассмотренная модельная камера сгорания представляет собой модульный экспериментальный образец, в котором объединены участок подвода топлива, горелочное устройство, жаровая труба, система охлаждения и выходной участок. Показано, что подобная компоновка обеспечивает не только реализацию устойчивого рабочего процесса, но и получение необходимой экспериментальной информации о параметрах потока, составе продуктов сгорания и тепловом состоянии элементов конструкции.

Отдельное внимание в главе уделено жаровой трубе и системе охлаждения как элементам, в значительной степени определяющим условия протекания процесса горения и достоверность экспериментальных данных. Применение металлической жаровой трубы позволяет проводить штатную отработку конструкции, тогда как использование кварцевого исполнения обеспечивает визуальное наблюдение факела и расширяет возможности анализа структуры пламени при различных режимах работы.

Также показано, что изготовление и сборка экспериментальных образцов требуют согласования конструкторских и технологических решений уже на ранних стадиях разработки. Использование аддитивных технологий для изготовления жаровой трубы в сочетании с механической обработкой сопрягаемых элементов и традиционными методами изготовления остальных узлов позволяет обеспечить требуемую точность геометрии, повторяемость параметров и возможность замены отдельных деталей в ходе экспериментальной отработки.

Проведённое рассмотрение этапов сборки, пусконаладочных работ и подготовки к огневым испытаниям показывает, что надёжность работы экспериментального образца определяется не только конструкцией как таковой, но и качеством предварительной стендовой подготовки. Проверка герметичности, настройка топливной и воздушной систем, подключение измерительных каналов и отработка алгоритмов безопасности являются обязательными условиями перехода к огневым испытаниям.

Таким образом, сформирована конструктивно-технологическая основа экспериментального стенда и модельных устройств, обеспечивающих проведение дальнейших исследований процессов горения метано-водородных смесей. Представленные решения создают необходимую базу для последующего анализа режимов работы, устойчивости горения, структуры факела и эмиссионных характеристик в следующих главах работы.

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ

В данной главе рассматриваются результаты экспериментальных исследований горения природного газа и метано-водородных смесей в модельной камере сгорания, созданной на разработанном экспериментальном стенде. Основное внимание уделено влиянию состава топлива, коэффициента избытка воздуха, распределения топлива между контурами и температуры воздуха на входе на устойчивость рабочего процесса и состав продуктов сгорания.

Необходимость таких исследований обусловлена тем, что при переходе от природного газа к метано-водородным смесям существенно изменяются характеристики воспламенения, скорость распространения пламени, условия стабилизации факела и эмиссионные показатели камеры сгорания. При этом влияние водорода на рабочий процесс не может рассматриваться изолированно, поскольку его эффект проявляется во взаимосвязи с конструкцией горелочного устройства и режимом подачи топлива в основной и дежурный контуры.

Экспериментальные исследования, представленные в данной главе, направлены на выявление закономерностей, определяющих особенности горения метано-водородных смесей в условиях, приближённых к реальной работе малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок. В ходе испытаний анализируются пределы устойчивого горения, изменение характеристик факела и зависимость концентраций основных компонентов продуктов сгорания от режимных параметров.

Особое значение имеет оценка влияния доли водорода в топливе на характеристики рабочего процесса при изменении коэффициента избытка воздуха и перераспределении топлива между контурами. Такой подход позволяет не только определить общие тенденции изменения устойчивости горения и эмиссии, но и выявить режимы, представляющие наибольший интерес для дальнейшего совершенствования конструкции горелочного устройства.

В главе последовательно рассматриваются программа и условия проведения экспериментов, диапазоны изменения состава топлива и основных режимных параметров, а также результаты анализа устойчивости горения и состава продуктов сгорания. На этой основе формируется экспериментальная база для последующего обобщения результатов и выработки практических рекомендаций по организации малоэмиссионного горения метано-водородных смесей.

6.1. Программа и условия проведения экспериментов

Экспериментальные исследования, результаты которых рассматриваются в настоящей главе, проводились на модельной камере сгорания атмосферного давления, оснащённой кластерным микрофакельным горелочным устройством с многоконтурной подачей топлива. Выбор именно такой схемы был обусловлен необходимостью воспроизведения условий, характерных для малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок, при сохранении возможности независимого регулирования подачи топлива по отдельным контурам и детального наблюдения за изменением характеристик рабочего процесса.

В качестве топлива в экспериментах использовались природный газ и предварительно приготовленные метано-водородные смеси с различной объемной долей водорода. Подача компонентов топлива в камеру сгорания осуществлялась через систему расходо-

регулирующей арматуры, обеспечивающую задание требуемых расходов по основному и пилотному контурам, а также поддержание заданного состава смеси в процессе испытаний. Такое построение экспериментальной схемы позволяло последовательно исследовать влияние состава топлива и способа его распределения между контурами на устойчивость горения и состав продуктов сгорания (рисунок 6.1).

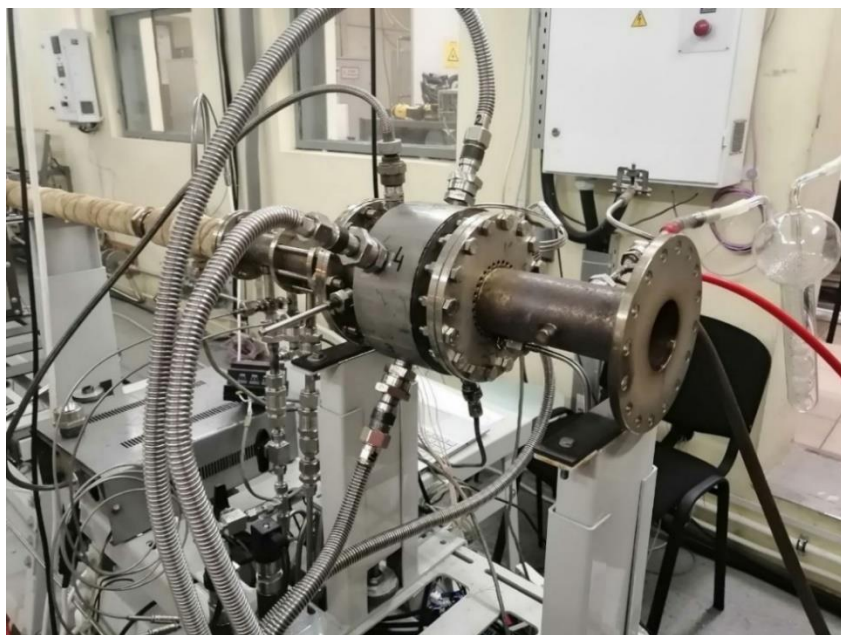


Рисунок 6.1. Экспериментальный стенд
для исследования горения метано-водородных смесей

Программа испытаний была построена по блочному принципу и включала несколько серий режимов, различавшихся варьируемым параметром. В отдельных блоках изменялись объемная доля водорода в топливе, коэффициент избытка воздуха, распределение топлива между основным и пилотным контурами, а также температура воздуха на входе в камеру сгорания. При этом в пределах каждого

блока прочие условия поддерживались неизменными, что позволяло выделить влияние именно исследуемого параметра на характеристики рабочего процесса.

Такой подход был необходим, поскольку при сжигании метано-водородных смесей изменение одного параметра, например доли водорода, неизбежно сопровождается изменением скорости горения, условий стабилизации пламени и склонности процесса к пробою или срыву. Поэтому для получения сопоставимых результатов требовалось обеспечить строгое воспроизведение исходных условий и последовательное изменение режима по заранее принятой программе. В результате экспериментальная программа была ориентирована не только на получение отдельных точек, но и на выявление устойчивых закономерностей изменения параметров горения в широком диапазоне составов топлива и режимных условий.

Основными регистрируемыми параметрами являлись границы устойчивого горения по бедной и богатой смеси, температура продуктов сгорания на выходе из камеры и по характерным сечениям тракта, а также концентрации оксидов азота, оксида углерода, диоксида углерода и кислорода в продуктах сгорания. Наряду с этим контролировались давления в характерных точках системы, расходы воздуха и топлива по отдельным линиям и распределение топлива между контурами горелочного устройства. Совокупность этих данных позволяла оценивать не только эмиссионные характеристики, но и общую устойчивость рабочего процесса, а также взаимосвязь между режимом подачи топлива и структурой пламени.

Испытания выполнялись преимущественно при атмосферном давлении, что соответствовало возможностям разработанного экспериментального стенда и позволяло проводить подробную отработку режимов горения при различных составах топлива. Температура воздуха на входе в камеру изменялась в широком диапазоне, что обеспечивало моделирование условий, приближённых к характерным для

реальных газотурбинных установок режимам работы. Коэффициент избытка воздуха задавался на основе расходов топлива и воздуха, а затем уточнялся по данным газового анализа и материального баланса по основным компонентам продуктов сгорания.

Существенное место в экспериментальной программе занимали исследования визуальной структуры факела, поскольку именно внешний вид зоны горения, положение области основного тепловыделения и характер свечения пламени позволяют дополнительно судить об устойчивости и полноте сгорания топлива (рисунок 6.2). Для проведения таких исследований использовался вариант камеры с кварцевой жаровой трубой, обеспечивающий оптический доступ к зоне горения и возможность визуального наблюдения процесса при различных составах топлива и режимах подачи. Применение кварцевой жаровой трубы позволяло сопоставлять результаты газового анализа и температурных измерений с наблюдаемой формой факела, что особенно важно при исследовании переходных режимов и режимов с повышенной долей водорода.

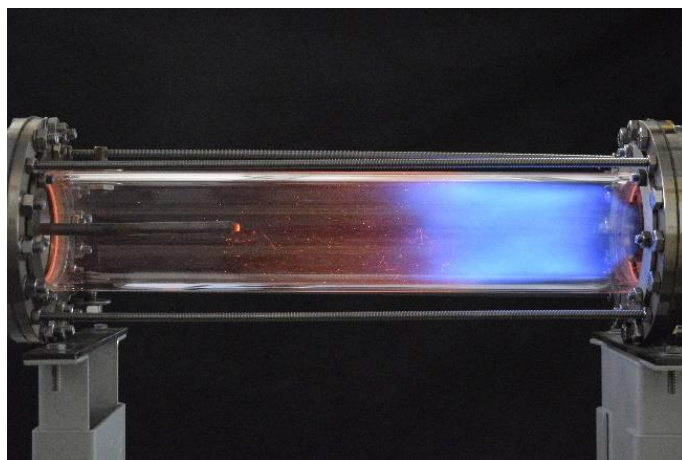


Рисунок 6.2. Модельная камера сгорания с кварцевой жаровой трубой в процессе огневых испытаний метано-водородной смеси

В режимах с оптическим доступом дополнительно выполнялись фото- и видеофиксация факела, а также синхронная регистрация колебаний давления. Это позволяло сопоставлять визуальные особенности процесса горения с изменением устойчивости, уровнем эмиссии и характером протекания рабочего процесса в зависимости от состава топлива и способа его подачи.

Критерием завершённости каждого блока испытаний являлось достижение установившегося характера показаний по основным параметрам, воспроизводимость результатов при повторных запусках и отсутствие признаков деградации элементов камеры сгорания и горелочного устройства. Такой подход обеспечивал получение достоверного экспериментального материала, пригодного для последующего анализа влияния состава топлива, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха на входе и распределения топлива между контурами на характеристики горения метано-водородных смесей.

6.2. Диапазоны изменения состава топлива и режимных параметров

Экспериментальная программа выбирается таким образом, чтобы охватить наиболее характерные сочетания состава метано-водородного топлива и режимных параметров, определяющих устойчивость горения, температурное состояние потока и состав продуктов сгорания. В исследование должны быть включены как режимы сжигания природного газа без добавки водорода, так и режимы с постепенным увеличением объемной доли водорода вплоть до высоководородных и предельных составов смеси (рисунок 6.3).

В качестве одного из основных варьируемых параметров рассматривают состав топлива. В опытную программу входили смеси с объемной долей водорода от 0 до 50 %, причем особое внимание

уделялось промежуточным составам, представляющим практический интерес для адаптации камер сгорания газотурбинных установок к водородсодержащим топливам. Для сопоставительного анализа использовались режимы на чистом метане, на смесях с умеренным содержанием водорода и на смесях с высокой долей водорода, при которых наиболее заметно проявляются изменения скорости химического реагирования, пределов устойчивости пламени и эмиссионных характеристик.

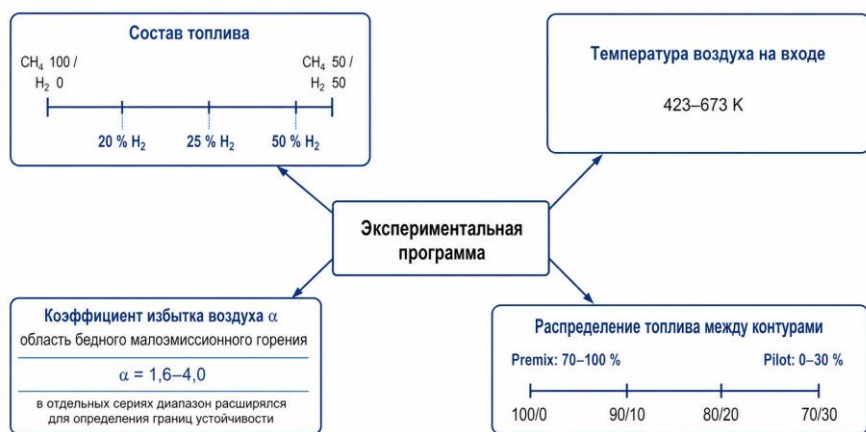


Рисунок 6.3. Область исследованных составов метано-водородного топлива и режимных параметров

Наряду с составом топлива изменялся коэффициент избытка воздуха, определяющий степень обеднения горючей смеси и тепловой уровень процесса. В основных сериях испытаний рассматривались режимы с коэффициентом избытка воздуха, характерным для малоэмиссионного бедного сжигания, а в отдельных сериях диапазон дополнительно расширялся для установления границ устойчивого горения и условий срыва пламени. Такое построение программы позволило проследить, как изменение состава топлива

влияет на допустимую область работы камеры сгорания при различных значениях коэффициента избытка воздуха.

Существенное место в программе занимает варьирование распределения топлива между контурами горелочного устройства. Рассматривались как режимы с подачей всего топлива в основной контур предварительного смешения, так и режимы с выделением части расхода в пилотный контур, что позволяло анализировать влияние ступенчатой подачи топлива на стабилизацию пламени и характеристики рабочего процесса. По материалам экспериментальной программы доля топлива, подаваемого в основной контур, изменялась в широких пределах, а доля пилотной подачи в отдельных сериях достигала порядка 20–30 % общего расхода топлива.

Температура воздуха на входе в камеру сгорания также являлась одним из варьируемых параметров. В исследовании использовались режимы с нагревом воздуха, соответствующие диапазону примерно 423–673 К, что обеспечивало возможность оценки влияния предварительного подогрева на воспламеняемость смеси, устойчивость факела и полноту выгорания топлива. Изменение температуры воздуха рассматривалось как самостоятельно, так и в сочетании с изменением доли водорода в топливе, поскольку именно эта комбинация параметров в значительной степени определяет кинетику горения и склонность процесса к смещению границ устойчивой работы (рисунок 6.4).

При формировании режимной сетки стремились к тому, чтобы в пределах каждой серии изменялся преимущественно один определяющий параметр, тогда как остальные сохранялись постоянными или изменялись в узких пределах. Такой подход обеспечивал возможность выделить индивидуальное влияние состава топлива, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха и схемы подачи топлива на характеристики горения.

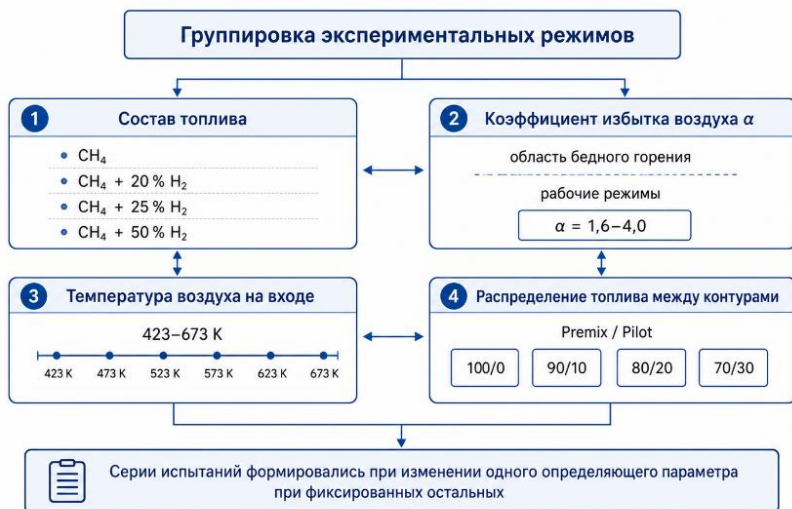


Рисунок 6.4. Пример группировки экспериментальных режимов по составу топлива, коэффициенту избытка воздуха, температуре воздуха и распределению топлива между контурами

В результате была сформирована совокупность экспериментальных режимов, охватывающая как область устойчивого бедного горения, так и режимы, приближающиеся к границам срыва и проскока пламени. Это создало основу для последующего анализа влияния доли водорода, коэффициента избытка воздуха, распределения топлива между контурами и температуры воздуха на входе

6.3. Влияние доли водорода на устойчивость горения

Одним из определяющих факторов, влияющих на устойчивость рабочего процесса в модельной камере сгорания, является объемная доля водорода в метано-водородной смеси. Увеличение содержания водорода сопровождается изменением кинетики горения, скорости распространения пламени и условий его стабилизации в зоне действия горелочного устройства.

Проведенные эксперименты показали, что при переходе от сжигания чистого метана к смесям с добавкой водорода область устойчивого горения в целом расширяется в сторону более бедных смесей. Это связано с более высокой реакционной способностью водорода и повышением скорости химического превращения топливовоздушной смеси, вследствие чего облегчается воспламенение и снижается вероятность срыва пламени при уменьшении тепловой нагрузки на зону горения.

На режимах с умеренной добавкой водорода факел сохранял устойчивое положение в пределах жаровой трубы при таких значениях коэффициента избытка воздуха, при которых для чистого метана уже наблюдалось ухудшение стабилизации (рисунок 6.5). При этом расширение области устойчивой работы проявлялось прежде всего по бедной границе, что особенно важно для малоэмиссионных камер сгорания, работающих на предварительно перемешанных смесях [48].

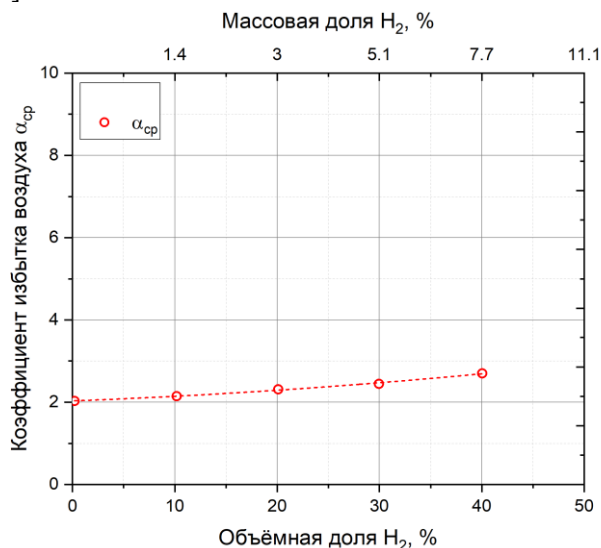


Рисунок 6.5. Границы бедного срыва пламени при различной доле водорода в топливе

Одновременно с этим рост доли водорода изменял характер течения и взаимодействия пламени с рециркуляционной зоной за горелочным устройством. По мере увеличения содержания водорода зона основного тепловыделения смещалась ближе к фронтному устройству, а сам факел становился более компактным и интенсивным. Такое поведение соответствует повышению скорости горения смеси и сокращению характерной длины зоны реакции.

Следует, однако, отметить, что положительное влияние водорода на устойчивость горения не является безусловным во всем диапазоне режимов. При высоких долях водорода возрастает опасность проскока пламени в элементы смесеобразующего тракта, поскольку скорость распространения фронта пламени может становиться сопоставимой со скоростью потока вблизи выходных сечений горелочных каналов (рисунок 6.6). Поэтому с увеличением содержания водорода область безопасной эксплуатации камеры сгорания смещается: снижается вероятность срыва на бедных смесях, но одновременно возрастает чувствительность системы к условиям проскока.

Сопоставление режимов с различным составом топлива показывает, что наиболее заметные изменения устойчивости проявляются при переходе от метана к смесям с содержанием водорода порядка 20–50 %. Именно в этом диапазоне наблюдается выраженное облегчение воспламенения и стабилизации горения, а также изменение конфигурации факела, что согласуется с экспериментальными наблюдениями и анализом режимных карт.

При дальнейшем повышении доли водорода влияние состава топлива становится более сложным, поскольку на устойчивость начинают одновременно воздействовать несколько факторов: рост скорости горения, изменение длины факела, перераспределение тепловыделения по объему камеры и повышение чувствительности к локальным неоднородностям состава смеси. В результате устой-

чивое горение может сохраняться в более широком диапазоне бедных режимов, однако требования к организации смесеобразования и к распределению топлива между контурами становятся более жесткими.

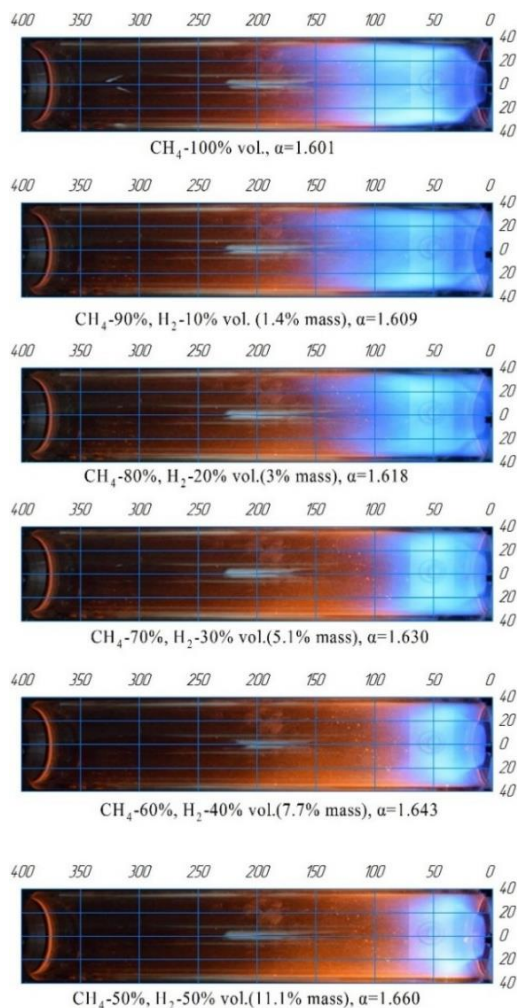


Рисунок 6.6. Изменение формы и положения факела при увеличении доли водорода в топливной смеси

Таким образом, увеличение доли водорода в метано-водородной смеси в целом способствует расширению области устойчивого горения по бедной границе и повышает стабильность факела. Вместе с тем при высоких концентрациях водорода возрастает склонность процесса к проскоку пламени и усиливается зависимость устойчивости от аэродинамической структуры потока и схемы подачи топлива. Именно поэтому дальнейший анализ должен учитывать не только состав топлива, но и коэффициент избытка воздуха, а также распределение топлива между контурами горелочного устройства.

6.4. Влияние распределения топлива между контурами горелочного устройства

Распределение топлива между основным контуром предварительного смешения и пилотным контуром является одним из ключевых факторов, определяющих устойчивость факела, структуру зоны тепловыделения и эмиссионные характеристики камеры сгорания. В программе испытаний были предусмотрены специальные серии режимов, в которых доля топлива, подаваемого в основной контур, изменялась примерно от 70 до 100 %, а доля пилотной подачи достигала 20–30 % общего расхода топлива.

При подаче всего топлива в основной контур предварительного смешения реализовывался наиболее выраженный малоэмиссионный режим горения, поскольку смесь формировалась более однородной еще до входа в зону реакции. Вместе с тем именно такой режим оказывался более чувствительным к обеднению смеси, колебаниям расхода и изменению доли водорода, особенно вблизи границ устойчивости.

Введение пилотной подачи повышало устойчивость горения, поскольку вблизи осевой зоны формировалась область с более высокой локальной концентрацией топлива и более интенсивным тепловыделением. За счет этого облегчалась стабилизация пламени,

особенно на бедных смесях и на режимах с повышенной долей водорода, где требования к надёжному удержанию фронта пламени становились более жесткими.

Экспериментальные серии с переменным соотношением расходов в основном и пилотном контурах показали, что даже сравнительно небольшая доля пилотного топлива способна заметно изменить характер факела (рисунок 6.7). При увеличении пилотной подачи факел становился более устойчивым и менее чувствительным к внешним возмущениям, однако одновременно возрастала локальная неравномерность тепловыделения в приосевой области.

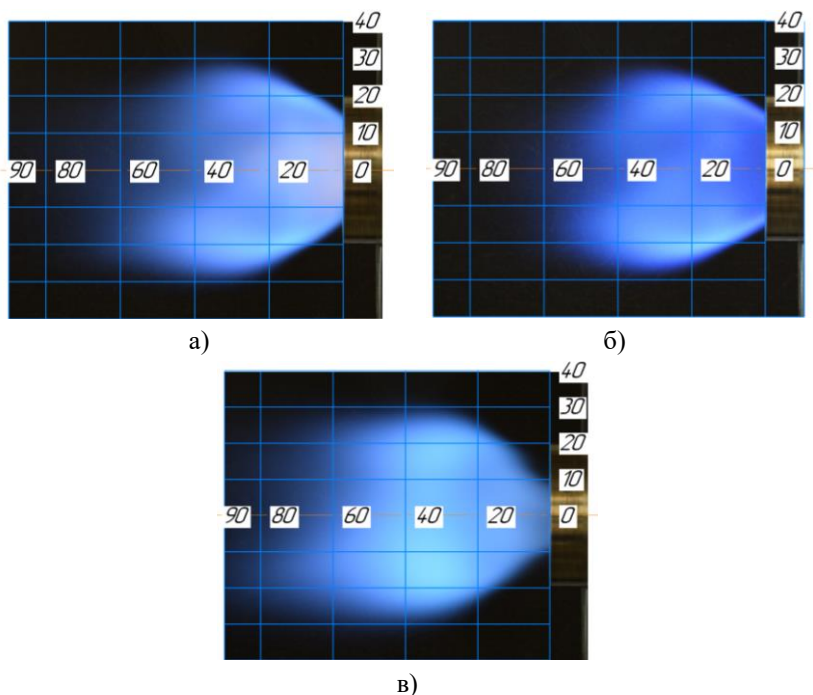


Рисунок 6.7. Факел в открытом пространстве:

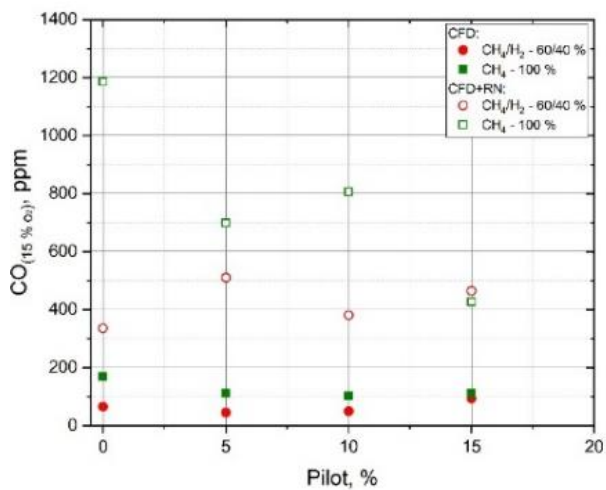
- а) смешанная подача топлива (20 % – пилотный контур, 80 % основной контур); б) 100 % основной контур;
в) 100 % пилотный контур

Перераспределение топлива между контурами влияло и на положение зоны максимальной температуры. При увеличении доли пилотной подачи область интенсивного горения смещалась ближе к фронтальному устройству, а температурное поле становилось менее равномерным по сечению камеры. Это повышало устойчивость воспламенения и стабилизации, но в ряде случаев создавало предпосылки для роста локальных температурных пиков.

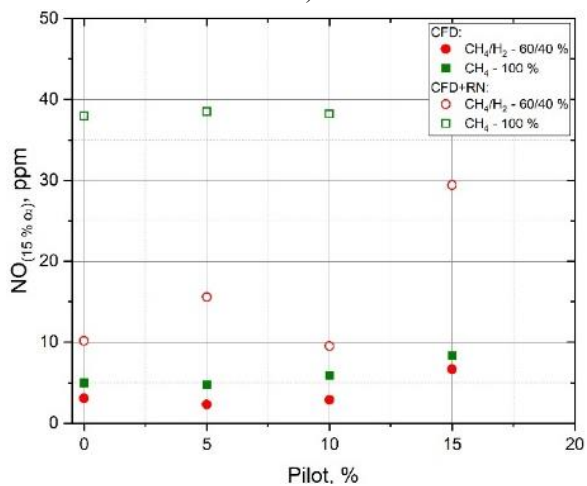
С точки зрения экологии увеличение доли пилотной подачи обычно ухудшало малоэмиссионные свойства камеры по сравнению с режимом полного предварительного смешения. Более концентрированное тепловыделение в пилотной зоне и появление локально более богатых участков смеси способствовали повышению вероятности образования оксидов азота. В материалах расчета и анализа также отмечается чувствительность NO_x к изменению доли топлива, подаваемого в пилотный контур.

При этом отказ от пилотной подачи не всегда является оптимальным решением. Для бедных смесей и для режимов с заметной долей водорода небольшая пилотная добавка может быть необходима для обеспечения устойчивого горения и предотвращения срыва пламени (рисунок 6.8). Следовательно, выбор распределения топлива между контурами должен рассматриваться как компромисс между устойчивостью рабочего процесса и минимизацией эмиссии.

Для метано-водородных смесей задача оптимального распределения топлива между контурами приобретает особую важность. С ростом доли водорода повышается скорость горения и изменяется положение фронта пламени, поэтому пилотный контур может одновременно выступать как средство стабилизации факела и как фактор, усиливающий локальную тепловую нагрузку. Именно по этой причине в экспериментальной программе отдельно исследовались режимы с различным содержанием водорода и различной долей пилотной подачи.



a)



б)

Рисунок 6.8. Влияние распределения топлива между основным и дежурным контуром горелочного устройства на выбросы CO (а) и NO (б)

Таким образом, перераспределение топлива между контурами горелочного устройства оказывает комплексное влияние на рабочий процесс. Увеличение доли пилотной подачи улучшает стабилизацию факела и расширяет область устойчивого горения, но может сопровождаться ростом локальных температур и ухудшением эмиссионных характеристик. Наиболее рациональный режим определяется сочетанием состава топлива, коэффициента избытка воздуха и требуемого уровня надёжности работы камеры сгорания.

6.5. Влияние доли водорода в метано-водородном топливе на эмиссионные характеристики

Экспериментальные исследования показали, что при переходе от сжигания чистого метана к метано-водородным смесям в модельной камере сгорания эмиссионные характеристики заметно зависят от объемной доли водорода в топливе (рисунок 6.9). При этом все режимы данного раздела отбирались при близких значениях коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 1,6$ и фиксированном подогреве воздуха, что позволяет выделить влияние именно состава топлива.

По результатам измерений массовая концентрация CO, пересчитанная к 15 % O₂, с увеличением доли водорода в смеси монотонно снижается. В диапазоне от 0 до 60 % H₂ величина CO уменьшается примерно с 3,6 до 2,5 ppm, что соответствует снижению на 25–30 % относительно исходного уровня для чистого метана. Такое поведение связано с интенсификацией окислительных процессов при добавке водорода: возрастает скорость горения и уровень турбулентного перемешивания, сокращаются зоны локального переобеднения и уменьшается доля продуктов неполного сгорания в виде CO (рисунок 6.10).

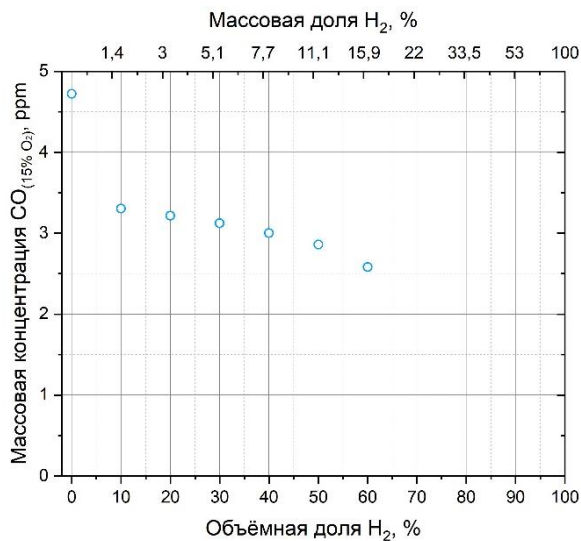


Рисунок 6.9. Массовая концентрация CO (15 % O_2) в зависимости от объёмной доли водорода в топливе

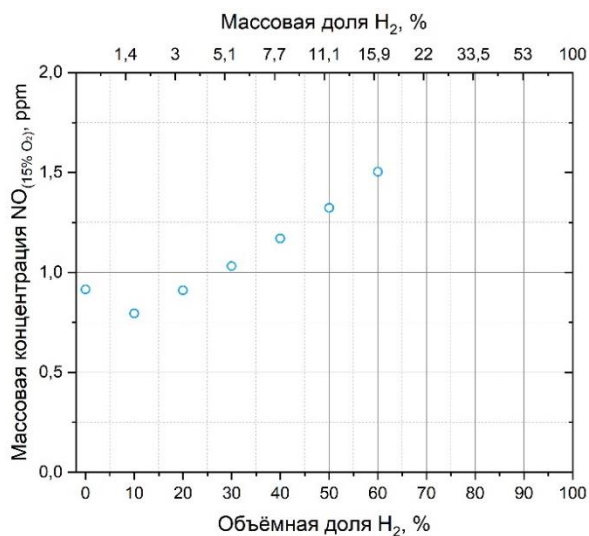


Рисунок 6.10. Массовая концентрация NO (15 % O_2) в зависимости от объёмной доли водорода в топливе

В отличие от оксида углерода, эмиссия NO демонстрирует противоположную тенденцию. При увеличении объемной доли водорода от 0 до 60 % массовая концентрация NO (15 % O₂) возрастает примерно с 0,8 до 1,5–1,6 ppm, то есть почти в два раза. Это объясняется повышением температур в зоне основного тепловыделения и ростом доли высокореакционной водородсодержащей компоненты, вследствие чего усиливается термический механизм образования оксидов азота.

Таким образом, изменение состава топлива приводит к характерному эмиссионному компромиссу: уменьшение CO сопровождается одновременным ростом NO (рисунок 6.11).

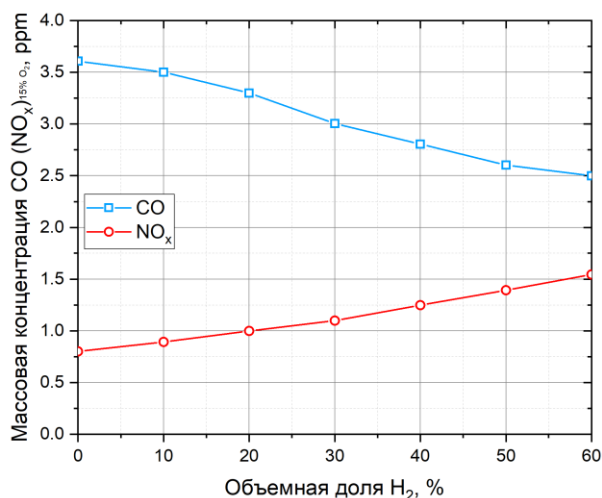


Рисунок 6.11. Эмиссионный компромисс по NO и CO при увеличении доли водорода в метано-водородном топливе ($\alpha \approx 1,6$)

Обобщенный график, на котором совместно представлены зависимости NO и CO от объемной доли H₂, наглядно демонстрирует противоположный характер их изменения. При низких концентра-

циях водорода удастся обеспечить одновременно невысокий уровень NO и сравнительно повышенные значения CO, тогда как при росте доли H₂ эмиссия CO существенно снижается, но концентрация NO постепенно увеличивается. Полученный набор кривых определяет диапазон составов топлива, в котором достигается приемлемый компромисс между требованиями по выбросам NO_x и ограничениям по оксиду углерода для заданного режима камеры сгорания.

С практической точки зрения результаты показывают, что использование метано-водородных смесей с долей H₂ порядка 20–40 % позволяет заметно снизить эмиссию CO при умеренном увеличении NO, остающемся в пределах целевых значений для малоэмиссионных камер сгорания. Дальнейшее повышение доли водорода до 50–60 % обеспечивает дополнительное уменьшение CO, но сопровождается дальнейшим ростом NO и может потребовать оптимизации режима по коэффициенту избытка воздуха или применения дополнительных мер по снижению NO_x.

6.6. Обобщение результатов и практические выводы

Характеристики горения метано-водородных смесей в модельной камере сгорания определяются совместным влиянием состава топлива, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха на входе и распределения топлива между основным и пилотным контурами. Изменение каждого из этих параметров одновременно отражается на устойчивости пламени, температурном состоянии потока и составе продуктов сгорания, поэтому их влияние должно рассматриваться в комплексе, а не изолированно.

Увеличение доли водорода в топливе в целом способствует расширению области устойчивого горения по бедной границе и облегчает воспламенение смеси. Это связано с повышением реакционной способности топлива, увеличением скорости горения и смещением

зоны основного тепловыделения ближе к фронтovому устройству. Вместе с тем при высоких долях водорода возрастает опасность проскока пламени и усиливаются требования к качеству смесеобразования и организации течения в зоне горения.

Изменение коэффициента избытка воздуха формирует компромисс между устойчивостью процесса и уровнем эмиссии. При увеличении α снижается температурный уровень в зоне реакции, что способствует уменьшению образования оксидов азота, однако чрезмерное обеднение смеси ухудшает полноту сгорания и повышает вероятность срыва пламени, а также приводит к росту концентрации CO. Рабочую область камеры сгорания целесообразно выбирать в диапазоне значений α , обеспечивающем одновременно низкий уровень NOx, допустимый уровень CO и надёжную стабилизацию факела.

Температура воздуха на входе в камеру сгорания оказывает выраженное положительное влияние на устойчивость горения и полноту выгорания топлива. Повышение температуры воздуха облегчает воспламенение, сокращает индукционный период химических реакций и способствует снижению концентрации CO, однако одновременно повышает температурный уровень процесса и может приводить к росту эмиссии NOx, особенно на смесях с повышенным содержанием водорода. В этой связи подогрев воздуха следует рассматривать как эффективный, но ограниченный по экологическим последствиям инструмент расширения устойчивой области работы [49].

Распределение топлива между контуром предварительного смешения и пилотным контуром является важным средством управления рабочим процессом. Увеличение доли пилотной подачи повышает устойчивость факела и снижает чувствительность камеры к срыву на бедных смесях, но при этом усиливает локальную неравномерность тепловыделения и, как правило, ухудшает эмиссионные характери-

стики по NO_x по сравнению с режимом преобладающего предварительного смешения. Рациональным является такой режим распределения топлива, при котором пилотный контур выполняет преимущественно стабилизирующую функцию, не приводя к существенному росту локальных температурных максимумов (рисунок 6.12).

С практической точки зрения полученные результаты подтверждают возможность адаптации камер сгорания газотурбинного типа к работе на метано-водородных смесях при условии целенаправленного выбора режимных параметров. Перспективными являются режимы, при которых добавка водорода используется для расширения области устойчивого бедного горения, а значения α , температура воздуха и доля пилотной подачи подбираются таким образом, чтобы ограничить рост NO_x и исключить проскок пламени.

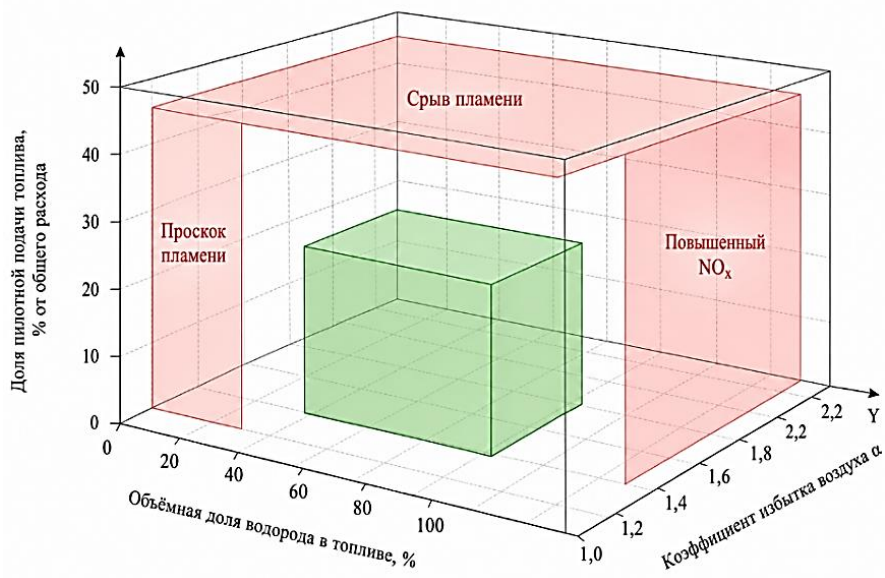


Рисунок 6.12. Схематическая область рациональных режимов работы камеры сгорания

Представленные закономерности имеют прикладное значение для разработки малоэмиссионных камер сгорания нового поколения. Они показывают, что переход к водородсодержащим топливам требует не простой замены одного газа другим, а комплексной перенастройки системы горения, включающей организацию смесеобразования, аэродинамическую структуру потока и схему ступенчатой подачи топлива.

Таким образом, устойчивое и экологически приемлемое сжигание метано-водородных смесей достигается только при согласованном управлении составом топлива и основными режимными параметрами. Добавка водорода открывает возможности для расширения рабочих режимов и снижения углеродного следа, но реализация этих преимуществ требует строгого контроля температуры, коэффициента избытка воздуха и распределения топлива между контурами. Такой комплексный подход может рассматриваться как основа для дальнейшей оптимизации камер сгорания, рассчитанных на работу на водородсодержащих топливах.

В главе 6 показано, что характеристики рабочего процесса в модельной камере сгорания определяются совместным влиянием доли водорода в топливе, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха на входе и распределения топлива между основным и пилотным контурами. Установлено, что увеличение содержания водорода повышает реакционную способность топлива, облегчает воспламенение и способствует расширению области устойчивого бедного горения, но одновременно сопровождается ростом скорости горения, изменением положения зоны тепловыделения, повышением вероятности проскока пламени и потенциалом к увеличению образования оксидов азота.

Отдельно показана роль коэффициента избытка воздуха как ключевого параметра, определяющего компромисс между устойчи-

востью процесса и экологическими характеристиками. При увеличении α снижается склонность к образованию NOx за счет уменьшения температурного уровня в зоне реакции, однако чрезмерное обеднение смеси ухудшает полноту сгорания и приводит к росту концентрации CO.

Проведенный анализ подтвердил, что повышение температуры воздуха на входе интенсифицирует процесс горения, улучшает условия воспламенения и способствует более полному выгоранию топлива, но одновременно увеличивает температуру продуктов сгорания и может сопровождаться ростом эмиссии NOx, особенно при работе на смесях с высокой долей водорода. Рассмотрение схем подачи топлива показало, что перераспределение расхода между контуром предварительного смешения и пилотным контуром существенно влияет как на устойчивость факела, так и на эмиссионные характеристики: увеличение доли пилотной подачи повышает запас устойчивости на бедных смесях, но ухудшает малоэмиссионные свойства камеры сгорания.

Результаты, представленные в данной главе, показывают, что переход от природного газа к метано-водородным смесям принципиально изменяет картину рабочего процесса в модельной камере сгорания. При увеличении доли водорода область устойчивого горения в координатах «коэффициент избытка воздуха – тепловая нагрузка» смещается в сторону более бедных смесей, а факел становится более компактным и близким к фронтовому устройству. Это согласуется с возрастанием нормальной скорости распространения пламени и ростом реакционной способности смеси, что облегчает воспламенение и стабилизацию горения при пониженных тепловых нагрузках.

Исследования влияния коэффициента избытка воздуха показали, что для метано-водородного топлива сохраняется характерный для малоэмиссионных камер компромисс между устойчивостью и

эмиссией NO_x . При увеличении α снижается температурный уровень в зоне реакции и уменьшается образование оксидов азота, однако чрезмерное обеднение смеси приводит к росту концентрации CO и сужению области устойчивой работы. Введение водорода позволяет несколько расширить диапазон бедных режимов по сравнению с чистым метаном, но не отменяет необходимости точного подбора α в зависимости от состава топлива и схемы подачи.

Существенную роль играет распределение топлива между основным (premix) и пилотным контурами. Увеличение доли пилотной подачи повышает запас устойчивости на бедных смесях и уменьшает чувствительность факела к возмущениям, но сопровождается локальным ростом температур и, как правило, ухудшением эмиссионных характеристик по NO_x по сравнению с режимами с преобладанием предварительного смешения. Экспериментальные данные демонстрируют, что рациональная область режимов соответствует умеренным долям пилотного контура, при которых сохраняется распределённый характер тепловыделения, но обеспечивается надёжная стабилизация пламени при изменении доли водорода и коэффициента избытка воздуха.

Влияние температуры воздуха на входе проявляется в ожидаемом повышении устойчивости горения и полноты выгорания топлива. Подогрев воздуха сокращает индукционный период, облегчает розжиг и снижает выбросы CO , однако при работе на смесях с повышенным содержанием водорода сопровождаться ростом эмиссии NO_x из-за увеличения температуры продуктов сгорания. Таким образом, подогрев воздуха следует рассматривать как эффективное средство расширения рабочей области, но требующее согласования с диапазонами α и долей водорода для удержания NO_x на приемлемом уровне.

Анализ состава продуктов сгорания подтвердил, что рост доли водорода закономерно приводит к снижению концентрации CO_2 и,

при правильно выбранных режимах, к уменьшению выбросов CO . В то же время поведение NO_x носит немонотонный характер: при умеренных долях водорода и работе на достаточно бедных смесях возможно снижение выбросов по сравнению с чистым метаном, тогда как при высоких долях H_2 и недостаточном обеднении смеси отмечается рост NO_x вследствие увеличения адиабатической температуры пламени.

Особый интерес представляют режимы с высокими долями водорода, для которых одновременно проявляются преимущества и ограничения водородного горения. С одной стороны, наблюдается расширение областей устойчивого бедного горения, значительное улучшение воспламеняемости и устойчивости факела. С другой стороны, возрастает опасность проскока пламени в элементы смесительного тракта, усиливается влияние локальных неравномерностей состава смеси и возрастает чувствительность к выбору скорости потока в выходных сечениях горелочных каналов. Экспериментально показано, что для таких режимов решающими становятся конструктивные особенности горелочного устройства и характер распределения топлива между контурами.

В целом материалы главы 6 позволяют заключить, что применение метано-водородных смесей в малоэмиссионных камерах сгорания даёт реальную возможность расширения области устойчивого бедного горения и снижения углеродного следа, но требует точного согласования доли водорода, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха на входе и распределения топлива между контурами. Полученные экспериментальные зависимости и карты режимов образуют основу для последующей формулировки практических рекомендаций по выбору схемы горелочного устройства и режимных параметров.

ГЛАВА 7. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ВОДОРОДНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ

Переход газотурбинных установок к использованию водорода и метано-водородных смесей сопровождается изменением ключевых требований к камерам сгорания. Для таких камер решающими становятся способность работать с высокореакционными топливами, обеспечивать устойчивое горение в широком диапазоне режимов и одновременно удовлетворять жёстким нормативам по выбросам вредных веществ. По мере увеличения доли водорода особенно важными оказываются вопросы организации смесеобразования, стабилизации пламени, ограничения образования оксидов азота и предотвращения проскока пламени.

Водородосодержащие топлива существенно изменяют кинетику и термодинамику процесса горения. Возрастает нормальная скорость распространения пламени, сокращается время задержки воспламенения, расширяются пределы воспламеняемости, смещается температурный уровень реакционной зоны и изменяется характер образования NOx. В результате схемы камер сгорания, ориентированные на природный газ, далеко не всегда обеспечивают требуемый запас устойчивости и приемлемые экологические показатели при увеличении доли водорода. Проектирование водородных камер сгорания должно исходить из этих особенностей и рассматривать их как исходные ограничения (рисунок 7.1).

В конструктивном отношении можно выделить два основных подхода. Первый основан на развитии традиционных малоэмиссионных горелочных устройств, рассчитанных на работу на метано-водородных смесях с умеренным содержанием водорода.

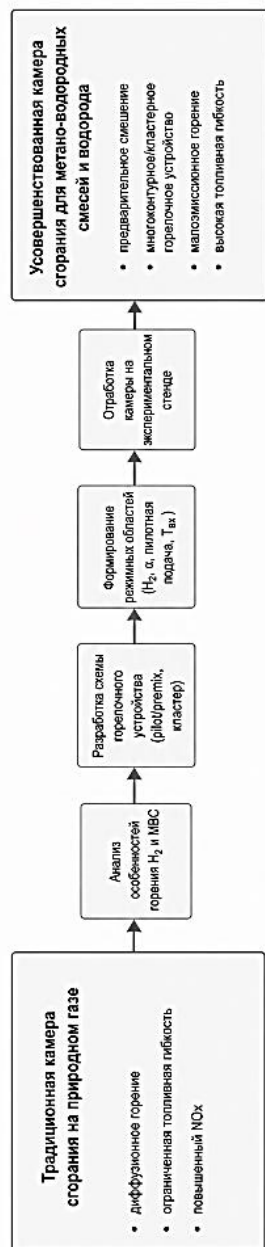


Рисунок 7.1. Схема перехода от традиционной камеры сгорания к усовершенствованной камере для работы на водороде и метано-водородных смесях

Второй связан с применением многоконтурных и кластерных схем, в которых процессы смесеобразования и тепловыделения распределены между значительным числом локальных элементов. Такие схемы позволяют расширять диапазон устойчивой работы при высоких долях водорода, приближаясь вплоть до сжигания чистого водорода.

Практическая ценность обобщённого материала заключается в возможности использовать его в качестве основы для выбора схемы горелочного устройства, способа предварительного смешения, диапазонов коэффициента избытка воздуха и доли пилотной подачи, а также для оценки рисков по устойчивости и эмиссии. Для конструкторских решений важно не только знание отдельных параметров, но и понимание того, как изменение доли водорода, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха на входе и распределения топлива между контурами совместно влияет на рабочую область камеры.

Особое место занимают вопросы топливной гибкости. С одной стороны, традиционные малоэмиссионные камеры могут быть адаптированы к работе на смесях с умеренным содержанием водорода, сохраняя основную компоновку и принципы предварительного смешения. С другой стороны, при переходе к высоким долям водорода целесообразно рассматривать многоконтурные и кластерные горелочные устройства, в которых горение разбивается на совокупность микрофакельных или локальных зон, что снижает риск проскока и облегчает управление температурным полем.

7.1. Подходы к выбору схемы горелочного устройства

Переход к использованию метано-водородных смесей в газотурбинных установках требует уточнения принципов организации рабочего процесса в камере сгорания, поскольку увеличение

объемной доли водорода в топливе сопровождается изменением кинетики горения, характеристик смесеобразования и условий стабилизации пламени. При повышении содержания водорода возрастает скорость распространения пламени и расширяются пределы воспламенения, одновременно увеличивается чувствительность процесса к локальным неоднородностям состава смеси и структуре течения, что приводит к росту вероятности проскока пламени в зону смесеобразования и повышению эмиссии оксидов азота при отклонении от рациональных режимов работы.

В традиционных малоэмиссионных камерах сгорания, изначально оптимизированных для сжигания природного газа, указанные эффекты проявляются особенно заметно при работе на смесях с повышенным содержанием водорода. При малых добавках водорода устойчивость бедного горения в значительной степени определяется избытком воздуха и полнотой предварительного перемешивания, тогда как при высоких концентрациях водорода определяющими становятся условия предотвращения проскока пламени и ограничения термического механизма образования NO_x . В результате диапазон устойчивой и одновременно низкоэмиссионной работы традиционной схемы сужается, что требует поиска конструктивных решений, обеспечивающих более гибкое управление распределением топлива и воздуха по зонам горения (рисунок 7.2).

Как следует из данных, обобщенных на рисунке 7.2, при переходе от метана к метано-водородным смесям область рациональной эксплуатации традиционной малоэмиссионной камеры сгорания ограничивается, с одной стороны, риском срыва пламени на бедных смесях, а с другой – увеличением вероятности проскока пламени и роста эмиссии оксидов азота. При фиксированной геометрии фронтального устройства и системе подвода воздуха изменение компонентного состава топлива приводит к смещению границ устойчивости и

малоэмиссионности, что фактически исключает возможность сохранения широкого диапазона нагрузок без ухудшения экологических характеристик или потери устойчивости. В этих условиях дальнейшее расширение диапазона рабочих режимов оказывается невозможным без перераспределения функций между отдельными зонами подачи топлива и воздуха, то есть без перехода к более управляемой многозонной или двухконтурной организации процесса горения.

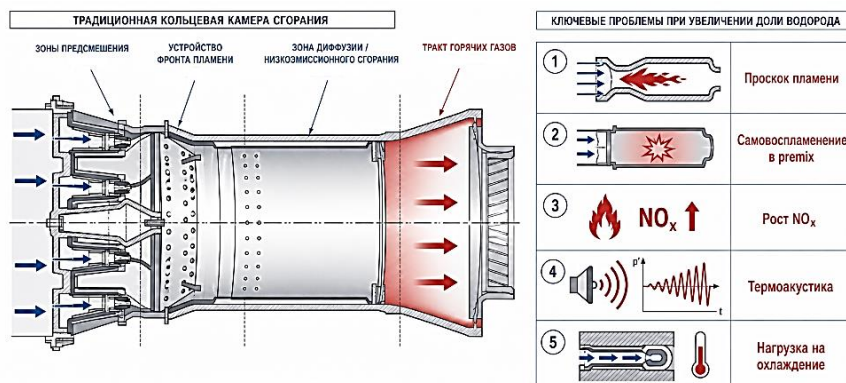


Рисунок 7.2. Основные ограничения традиционной малоэмиссионной камеры сгорания при увеличении доли водорода в метано-водородной смеси

Одним из рациональных направлений развития малоэмиссионных камер сгорания в контексте сжигания метано-водородных смесей является применение двухконтурной горелки, обеспечивающей раздельное или квази-раздельное формирование режимов горения в центральной и периферийной зонах. В центральном контуре целесообразно обеспечивать надёжную стабилизацию пламени и воспламенение смеси в области запусков и частичных нагрузок, тогда как периферийный контур ориентирован на формирование основ-

ной зоны тепловыделения в режиме бедного предварительно перемешанного горения (рисунок 7.3). Такая организация рабочего процесса позволяет адаптировать структуру факела и локальный коэффициент избытка воздуха к изменяющемуся компонентному составу топлива без радикальной переработки компоновки всей камеры сгорания.

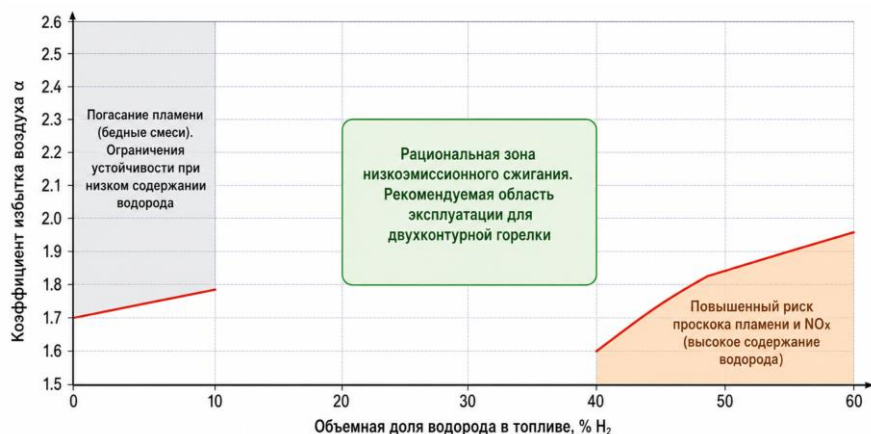


Рисунок 7.3. Область рациональных режимов двухконтурной низкоэмиссионной горелки при сжигании смесей метана с водородом

Результаты экспериментальных исследований, приведенных в главе 6, позволяют представить область рациональных режимов для двухконтурной малоэмиссионной горелки в координатах «объемная доля водорода в топливе – коэффициент избытка воздуха α ». В указанном параметрическом пространстве наглядно выделяются зоны, ограниченные условиями срыва пламени при малой доле водорода и высоких значениях α , а также условиями проскока пламени при значительном содержании водорода и недостаточно высоких значениях коэффициента избытка воздуха. Между этими областями располагается диапазон режимов, в кото-

ром двухконтурная схема обеспечивает устойчивое малоэмиссионное горение и может рассматриваться как рациональная основа для дальнейшего развития конструкции камеры сгорания под метано-водородные топлива.

В соответствии с рисунком 7.3, для области малых добавок водорода порядка 0–10 % по объему верхняя граница устойчивого существования пламени определяется условием срыва при увеличении коэффициента избытка воздуха выше значения порядка $\alpha \approx 1,7$ с последующим слабым ростом этой границы по мере повышения содержания водорода. Область выше указанной наклонной границы соответствует режимам, при которых реализуется срыв пламени на бедных смесях, что ограничивает возможность дальнейшего повышения избытка воздуха при малой водородной добавке даже при сохранении приемлемых значений эмиссии NOx.

В области высоких концентраций водорода, начиная примерно с 40 % по объему, формируется нижняя граница рациональных режимов, ниже которой возрастает риск проскока пламени в смесительную часть горелки и одновременного роста эмиссии оксидов азота. Эта граница имеет восходящий характер: при увеличении доли водорода требуемый коэффициент избытка воздуха, обеспечивающий безопасную дистанцию пламени от элементов смесеобразования, возрастает, что согласуется с ростом скорости распространения пламени и расширением области воспламеняемости водородсодержащего топлива. Область ниже данной наклонной линии на рисунке 7.3 характеризуется повышенной вероятностью проскока пламени и, следовательно, не может рассматриваться как допустимая для длительной эксплуатации.

Между указанными ограничениями – по срыву пламени на бедных смесях при малой доле водорода и по проскоку пламени при высоких концентрациях H_2 – располагается рациональная зона работы двухконтурной горелки, соответствующая, преимущественно, средним значениям объемной доли водорода (порядка 20–40 %) и

диапазону коэффициентов избытка воздуха $\alpha \approx 1,8-2,3$, $\alpha \approx 1,8-2,3$. В этой области обеспечивается устойчивое предварительно перемешанное горение с приемлемыми значениями эмиссии оксидов азота и отсутствием тенденции к проскоку пламени в элементы смесеобразования, что подтверждается совокупностью проведенных экспериментальных исследований. Именно данный диапазон режимов следует рассматривать как целевой при дальнейшем проектировании и адаптации двухконтурных малоэмиссионных камер сгорания к работе на метано-водородных смесях.

Таким образом, применение двухконтурной малоэмиссионной горелки представляет собой физически и конструктивно обоснованный путь согласования противоречивых требований по предотвращению срыва пламени, ограничению проскока и снижению эмиссии оксидов азота при переменном составе газообразного топлива. Формализованное выделение области рациональных режимов в координатах «доля водорода – коэффициент избытка воздуха», выполненное по результатам экспериментальных исследований, служит основой для последующей оптимизации конструкции горелочного устройства и разработки рекомендаций по его применению в составе перспективных газотурбинных установок.

7.2. Рекомендации по организации предварительного смешения

Организация предварительного смешения в водородных и метано-водородных камерах сгорания должна рассматриваться как один из ключевых факторов, определяющих одновременно экологические характеристики, устойчивость горения и безопасность работы горелочного устройства. Материалы экспериментальных и расчётных исследований показывают, что именно в зоне *premix* при повышении доли водорода наиболее остро проявляются риски самовоспламенения и проскока пламени, поэтому схема предварительного смешения должна проектироваться с учётом ограничений по времени пребывания смеси, температуре и локальному составу (рисунок 7.4).

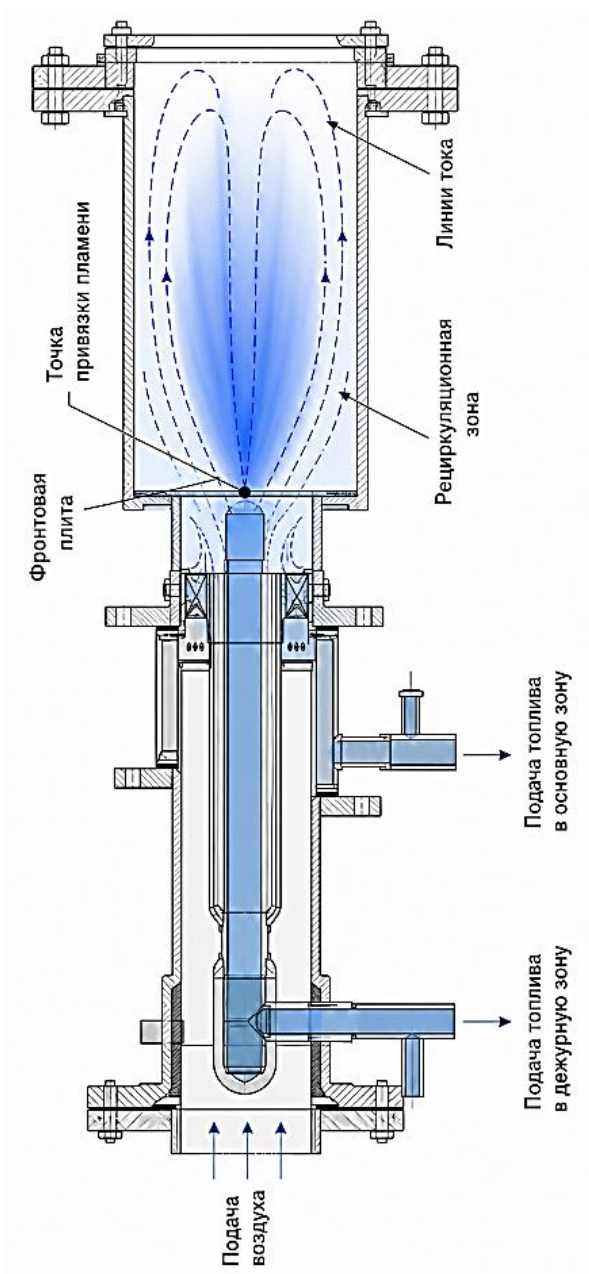


Рисунок 7.4. Принцип организации короткой зоны предварительного смешения и оторванного пламени в малоэмиссионной горелке при сжигании водородсодержащего топлива

Первой практической рекомендацией является сокращение длины секции предварительного смешения. Для водородсодержащих топлив недопустимо формировать протяжённые каналы *premix*, поскольку при высокой скорости химического реагирования и малом времени задержки воспламенения это повышает вероятность воспламенения смеси внутри горелочного устройства. В рассматриваемых схемах малоэмиссионных горелок данный риск снижается за счёт короткого участка локального смешения, после которого зона устойчивого горения выносится вниз по потоку, за пределы основного объёма корпуса. (see the generated image above)

Второй рекомендацией является коаксиальная организация подачи топлива и воздуха в каждом элементе горелочного устройства. В исследованных конфигурациях топливо подаётся высокоскоростной струёй внутри канала для подвода воздуха, благодаря чему топливная струя окружена воздушным потоком, а само смешение происходит локально и контролируемо в непосредственной близости от фронтального устройства. Такая компоновка уменьшает вероятность формирования внутри канала протяжённой области воспламеняемой смеси, способной поддерживать обратное распространение пламени, и тем самым повышает термическую безопасность *premix*-зоны.

Третья рекомендация состоит в разделении зон предварительного смешения и стабилизации пламени. Предварительное смешение следует организовывать так, чтобы основная часть топлива, предназначенная для малоэмиссионного горения, подавалась в основную *premix*-зону, тогда как отдельная часть расхода направлялась в пилотный контур, обеспечивающий устойчивость факела при пусках и частичных нагрузках. Такая функциональная декомпозиция позволяет независимо оптимизировать условия стабилизации и формирования бедной предварительно перемешанной смеси в основной зоне горения.

Четвёртая рекомендация связана с необходимостью управляемого распределения топлива между внутренними и внешними областями фронтального устройства. Показано, что подача топлива во

внутреннюю область чаще способствует стабилизации пламени и формированию ядра факела, тогда как подача во внешнюю область улучшает предварительное смешение и снижает вероятность образования локальных высокотемпературных зон, ответственных за рост эмиссии NOx. Следовательно, организация предварительного смешения должна предусматривать не только заданную геометрию каналов, но и возможность регулирования радиального распределения топливного расхода между зонами (рисунок 7.5).

Пятая рекомендация заключается в необходимости согласования параметров отверстий для воздуха и топлива со скоростями течения в зоне смешения. При проектировании опытных образцов малоэмиссионных горелочных устройств размеры проходных отверстий и форсунок выбирались из условия обеспечения скоростей воздуха и топлива не менее 30 м/с, что было связано с требованиями к устойчивости процесса и предотвращению проскока пламени в premix-каналы. Таким образом, организация предварительного смешения должна базироваться не только на качественной схеме течения, но и на расчётно подтверждённом выборе размеров каналов и перепадов давления, обеспечивающих требуемые скорости во всём рабочем диапазоне режимов.

Шестая рекомендация состоит в том, что предварительное смешение для водородных топлив не должно стремиться к максимально раннему и полному выравниванию состава смеси внутри корпуса горелки любой ценой. Для природного газа длинная и хорошо развитая premix-секция часто оказывается приемлемой, однако для водорода и высоководородных смесей чрезмерно раннее смешение может привести к формированию внутри горелки значительного по объёму пространства с составом в области воспламеняемости. Поэтому для водородных камер сгорания предпочтительна схема быстрого локального смешения непосредственно перед зоной горения, а не протяжённое объёмное смешение внутри подводящего тракта.

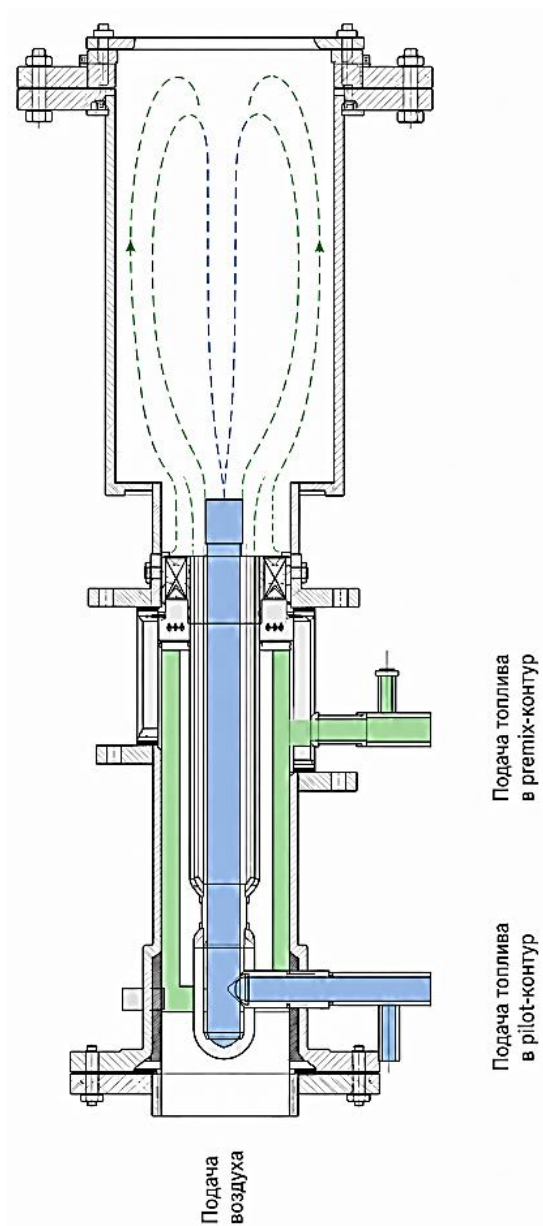


Рисунок 7.5. Схема раздельной подачи топлива в premix- и pilot-контуры малоэмиссионной горелки

Седьмая рекомендация связана с учётом температуры подогрева воздуха и режимного диапазона работы. Экспериментальные программы для метано-водородных смесей охватывали температуры воздуха до 673 К, что показывает: оценка схемы premix должна проводиться не только при одном номинальном режиме, а во всём диапазоне температур, коэффициента избытка воздуха и состава топлива. В противном случае схема, безопасная при холодном воздухе и умеренной доле водорода, может оказаться недостаточно надёжной при подогреве и высоких концентрациях H_2 , когда время задержки воспламенения существенно сокращается.

Наконец, организация предварительного смешения должна в обязательном порядке сопровождаться расчётно-экспериментальной проверкой. В исходных материалах показано, что характеристики рабочего процесса в водородсодержащих камерах сгорания исследовались как экспериментально, так и с применением CFD-моделирования, что особенно важно для premix-систем, где небольшие изменения геометрии, скоростей или распределения топлива могут заметно изменить положение факела и эмиссионные характеристики. Поэтому инженерные решения по предварительному смешению должны реализовываться не как универсальные эмпирические правила, а как варианты, подтверждённые расчётом и экспериментом для конкретной конструкции камеры сгорания и заданного диапазона режимов работы.

Таким образом, при разработке водородных камер сгорания предварительное смешение следует организовывать по принципам минимизации времени пребывания воспламеняемой смеси в объёме горелки, коаксиальной подачи топлива и воздуха, конструктивного разделения функций premix- и pilot-контуров, регулируемого радиального распределения топлива, согласования геометрии отверстий с требуемыми скоростями течения, учёта всего режимного диапазона по температуре и составу, а также обязательной расчётно-экс-

периментальной верификации. Такая организация позволяет совместить преимущества малоэмиссионного горения с требованиями устойчивости и безопасности при работе на водороде и метано-водородных смесях.

7.3. Рекомендации по снижению эмиссии NO_x

Снижение эмиссии оксидов азота при сжигании водорода и метано-водородных смесей следует рассматривать как одну из ключевых задач при проектировании камер сгорания газотурбинных установок, поскольку увеличение доли водорода в топливе сопровождается изменением характеристик рабочего процесса, структуры пламени и условий тепловыделения. В монографии этому вопросу посвящены как обзорные разделы, рассматривающие механизмы образования вредных веществ, так и специальные главы, в которых анализируется влияние состава топлива, коэффициента избытка воздуха, распределения топлива между контурами и температуры воздуха на входе на эмиссионные показатели.

Одним из основных направлений снижения NO_x является обеспечение максимально однородного предварительного смешения топлива с воздухом в пределах, допускаемых требованиями устойчивости горения и безопасности. Чем ниже локальная неравномерность состава смеси, тем меньше вероятность формирования перегретых зон, в которых термический механизм образования оксидов азота реализуется наиболее интенсивно, поэтому малоэмиссионные premix-схемы и двухконтурные горелочные устройства с развитой зоной предварительного смешения следует рассматривать как предпочтительное направление для перспективных водородных камер сгорания.

Существенную роль играет ограничение локальной температуры пламени за счет работы на бедных смесях (рисунок 7.6). Представленные в монографии результаты показывают, что коэффициент

избытка воздуха оказывает заметное влияние как на устойчивость горения, так и на уровень выбросов оксидов азота, вследствие чего бедный режим следует рассматривать как одно из основных средств снижения NOx при условии сохранения устойчивой привязки факела и недопущения перехода к бедному срыву.

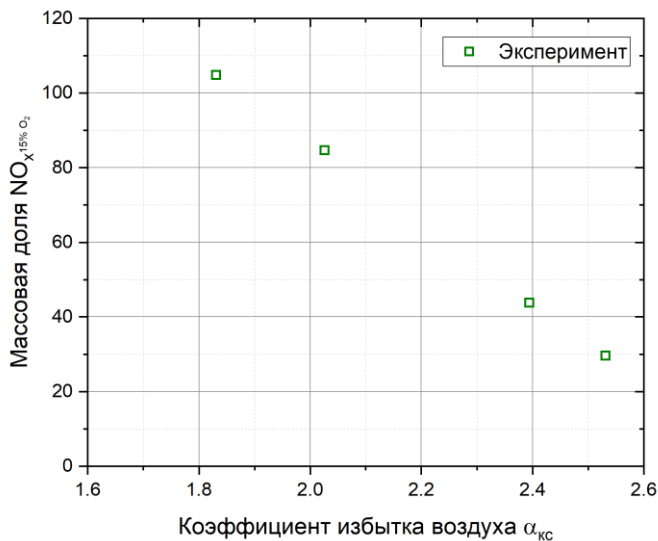


Рисунок 7.6. Влияние коэффициента избытка воздуха и доли водорода в топливе на уровень эмиссии NOx при сжигании метано-водородных смесей

Снижению эмиссии оксидов азота способствует и распределенный подвод топлива в пределах двухконтурной горелки, при котором тепловыделение не концентрируется в одной локальной зоне, а перераспределяется между дежурным и основным контурами. Такой подход позволяет уменьшить локальную тепловую напряженность, повысить равномерность фронта горения и тем самым ослабить предпосылки к образованию высокотемпературных участков, ответственных за интенсивный рост NOx.

Особое значение имеет рациональное деление топлива между premix- и pilot-контурами. При избыточной подаче топлива в пилотную зону возрастает локальная температура и увеличивается вероятность формирования более жесткого факела, тогда как перенос большей части топлива в основную зону предварительного смешения способствует более равномерному протеканию рабочего процесса и может обеспечивать более благоприятный уровень эмиссии оксидов азота.

При проектировании водородной камеры сгорания не следует рассматривать переход к классической диффузионной схеме как основное средство предотвращения проскока пламени. Хотя диффузионное горение в ряде случаев облегчает задачу стабилизации факела, для сухих малоэмиссионных камер сгорания более перспективным является развитие двухконтурных premix/pilot-схем, обеспечивающих снижение NO_x без отказа от малоэмиссионной организации рабочего процесса (рисунок 7.7).

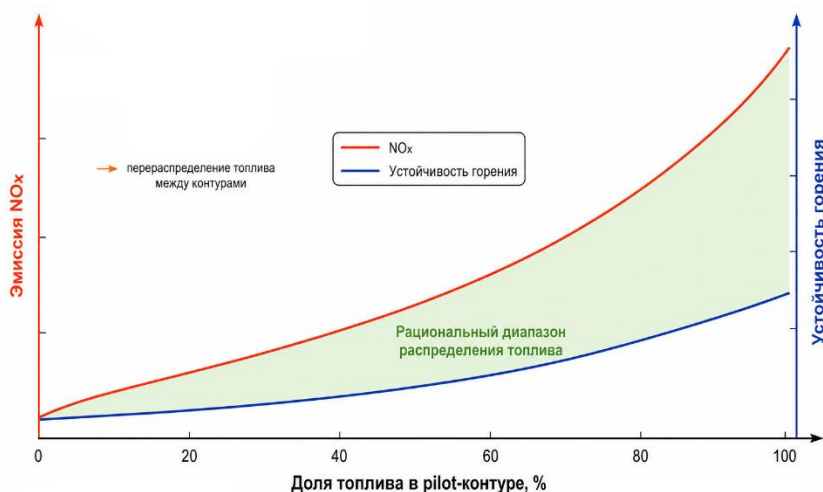


Рисунок 7.7. Влияние распределения топлива между premix- и pilot-контурами двухконтурной горелки на эмиссию NO_x и устойчивость горения

Не менее важной является минимизация необходимости внешнего разбавления, если речь идет о создании эффективной промышленной камеры сгорания. Использование азота, пара или иных разбавителей может снижать температуру горения и уровень NO_x , однако одновременно усложняет установку, поэтому в качестве более перспективного направления следует рассматривать совершенствование геометрии фронтального устройства, зоны предварительного смешения и схемы распределения топлива между контурами (рисунок 7.8).

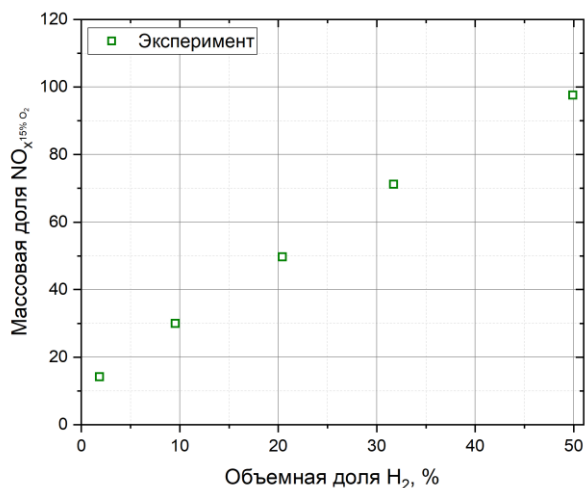


Рисунок 7.8. Изменение эмиссии NO_x и параметров рабочего процесса при увеличении доли водорода в метано-водородной смеси

Снижение эмиссии оксидов азота должно обеспечиваться не отдельным локальным приемом, а согласованным выбором состава топлива, коэффициента избытка воздуха и схемы горелочного устройства [50]. Увеличение доли водорода изменяет не только экологические характеристики, но и параметры воспламенения, устойчивости и тепловыделения, вследствие чего требуемый результат

может быть достигнут лишь при комплексном подборе состава топлива, режима работы и распределения топлива по контурам двухконтурной горелки.

Принципиально важным является и то, что снижение эмиссии оксидов азота должно подтверждаться расчетно-экспериментально для каждого конкретного варианта камеры сгорания. Представленные в монографии результаты экспериментальных исследований и их сопоставление с расчетными оценками показывают, что даже сравнительно небольшие изменения геометрии, температуры воздуха на входе, состава топлива и способа его распределения между контурами способны заметно повлиять на структуру факела и максимальную температуру, а следовательно, и на образование NOx.

Практический вывод состоит в том, что перспективные схемы снижения NOx для водородных камер сгорания должны опираться на вынос основной зоны тепловыделения из внутренних каналов горелочного устройства и на организацию горения в короткой зоне предварительного смешения с последующим формированием оторванного или слабо привязанного факела. Для двухконтурной малоэмиссионной горелки такой подход позволяет одновременно ограничивать локальные перегревы, улучшать качество смешения и согласовывать требования по низкой эмиссии оксидов азота и устойчивости рабочего процесса.

Таким образом, снижение эмиссии NOx в водородных камерах сгорания должно обеспечиваться за счет бедного предварительно смешанного горения, рационального деления топлива между premix- и pilot-контурами, ограничения локальных температур, отказа от избыточно диффузионных режимов и обязательной расчетно-экспериментальной верификации выбранной схемы. Именно сочетание этих мер позволяет сформировать низкоэмиссионную и устойчивую камеру сгорания, сохраняющую работоспособность при изменении доли водорода в топливе.

7.4. Рекомендации по обеспечению устойчивого горения

Обеспечение устойчивого горения в водородных и метано-водородных камерах сгорания следует рассматривать как одну из наиболее сложных задач проектирования, поскольку с увеличением доли водорода одновременно возрастают скорость распространения пламени, склонность смеси к самовоспламенению и вероятность проскока пламени в элементы горелочного устройства. Вследствие этого устойчивость рабочего процесса должна обеспечиваться не отдельным локальным приемом, а согласованной организацией геометрии горелки, структуры течения, распределения топлива между контурами и режимных параметров (рисунок 7.9).

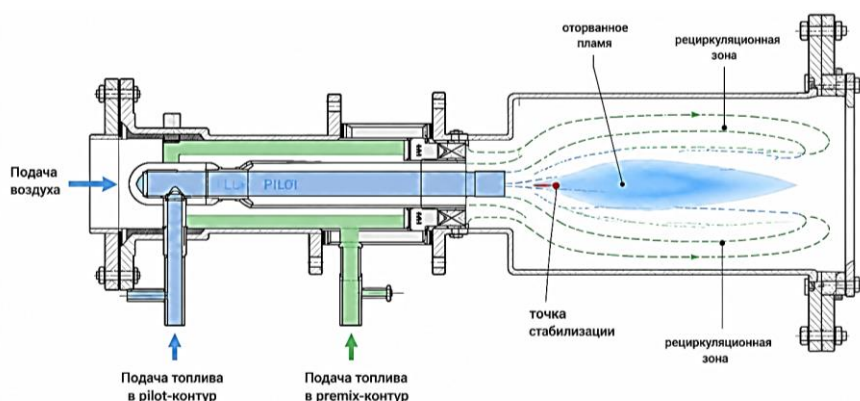


Рисунок 7.9. Принцип стабилизации факела в двухконтурной малоэмиссионной горелке

Ключевое значение имеет вынос зоны стабилизации пламени за пределы внутренних каналов горелочного устройства. Для двухконтурной малоэмиссионной горелки наиболее рациональной является такая схема, при которой устойчивое горение поддерживается не внутри смесительных полостей, а на некотором расстоянии от

выходного сечения, что снижает риск проскока пламени и одновременно уменьшает тепловую нагрузку на элементы фронтального устройства.

Не менее важным является сокращение длины участков, в которых возможно образование горючей предварительно смешанной смеси. Чем меньше время пребывания смеси внутри канала, тем ниже вероятность ее воспламенения до выхода в основную зону горения, поэтому для водородных систем предпочтительны короткие участки локального смешения, а не протяженные premix-каналы, характерные для схем, первоначально рассчитанных преимущественно на природный газ.

Существенную роль в обеспечении устойчивости играет аэродинамическая стабилизация факела с использованием рециркуляционных течений. Формирование устойчивой зоны рециркуляции обеспечивает возврат горячих продуктов сгорания в область воспламенения свежей смеси, благодаря чему создаются условия для поддержания факела даже при бедных смесях и при изменении состава топлива.

Рациональная работа двухконтурной горелки также требует функционального разделения контуров подачи топлива. Пилотный контур следует рассматривать прежде всего как средство поддержания устойчивости факела в переходных и сложных режимах, тогда как основная часть топлива должна подаваться в зону малоэмиссионного предварительно смешанного горения, что позволяет сочетать устойчивость рабочего процесса с ограничением выбросов и предотвращением локального перегрева (рисунок 7.10).

Устойчивость горения необходимо оценивать во всем диапазоне предполагаемых составов топлива, а не только на одном номинальном режиме. Экспериментальные исследования, представленные в монографии, охватывают изменение доли водорода, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха на входе и

распределения топлива между контурами, что показывает необходимость многопараметрической проверки устойчивости, поскольку схема, устойчивая на метане или на смеси с умеренным содержанием водорода, может оказаться недостаточно надёжной при переходе к высоководородному топливу.

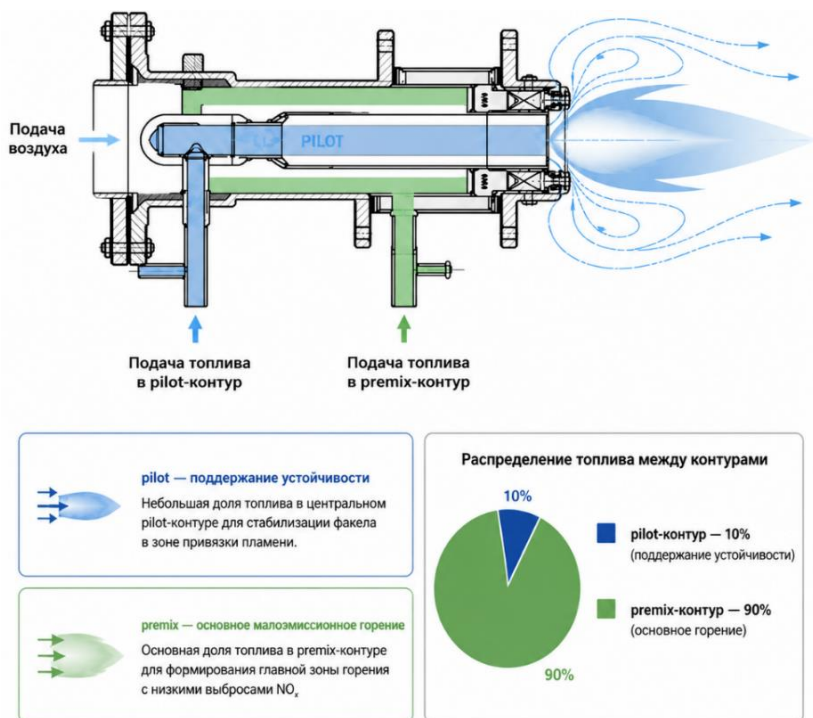


Рисунок 7.10. Разделение подачи топлива между pilot- и premix-контурами двухконтурной горелки как средство обеспечения устойчивого горения

С инженерной точки зрения устойчивость должна обеспечиваться и правильно выбранной газодинамикой на выходе из горелки.

Недостаточные скорости истечения повышают риск проскока пламени, тогда как чрезмерное форсирование потока может осложнить стабилизацию факела, поэтому выбор размеров выходных отверстий, структуры закрутки и соотношения расходов воздуха и топлива должен подчиняться задаче формирования устойчивой и одновременно малоэмиссионной зоны горения (рисунок 7.11).

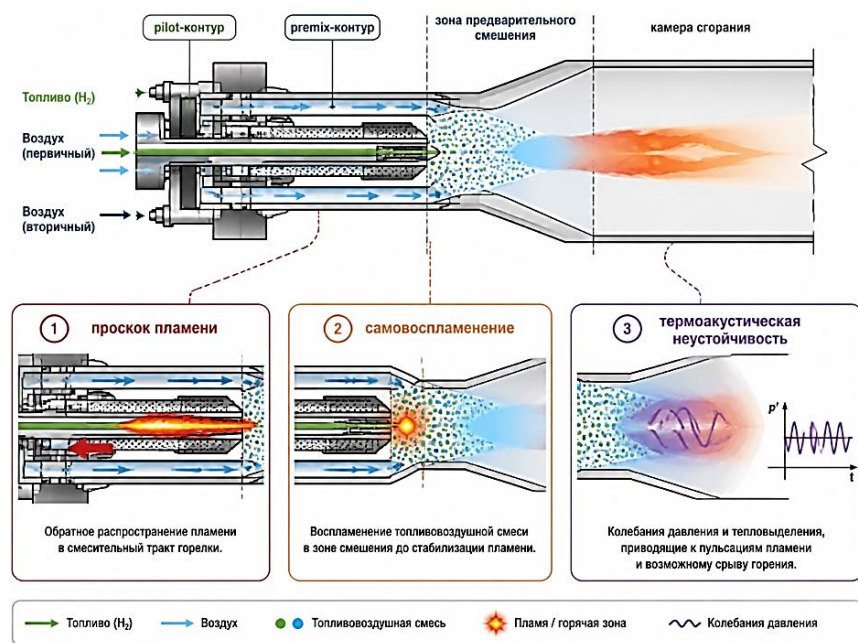


Рисунок 7.11. Основные угрозы устойчивости горения в водородной двухконтурной камере сгорания: проскок пламени, самовоспламенение и термоакустическая неустойчивость

Особого внимания требует согласование устойчивости горения с бедностью смеси. Работа на бедных смесях является необходимым

условием снижения NO_x , однако чрезмерное обеднение без соответствующей аэродинамической организации и без рационального распределения топлива между pilot- и premix-контурами может привести к срыву пламени, вследствие чего устойчивость следует обеспечивать не простым увеличением доли пилотного топлива, а комплексным подбором коэффициента избытка воздуха, схемы подачи топлива и конфигурации зоны рециркуляции.

Принципиально важным является и то, что устойчивость горения должна подтверждаться расчетно-экспериментально. Для водородных камер сгорания, чувствительных к сравнительно небольшим изменениям геометрии и режима, только сочетание эксперимента и расчетного анализа позволяет надёжно определить область безопасной и устойчивой работы и оценить влияние конструкции на положение фронта пламени, структуру течения и запас по проскоку и срыву.

Дополнительный аспект задачи связан с учетом термоакустических рисков. При высоком содержании водорода изменяются не только условия стабилизации факела, но и амплитудно-частотные характеристики колебательных процессов, поэтому устойчивость рабочего процесса нельзя сводить только к отсутствию срыва и проскока пламени; она должна включать также анализ склонности камеры сгорания к развитию термоакустической неустойчивости [51].

Таким образом, устойчивое горение в водородных камерах сгорания должно обеспечиваться за счет вынесенной зоны стабилизации пламени, коротких участков предварительного смешения, развитой рециркуляционной аэродинамики, рационального разделения premix- и pilot-контуров, выбора достаточных скоростей течения и обязательной проверки схемы во всем рабочем диапазоне составов топлива и режимных параметров. Именно такой комплексный под-

ход позволяет совместить топливную гибкость, безопасность и экологическую эффективность при работе на водороде и метано-водородных смесях.

7.5. Направления дальнейшего развития камер сгорания на водороде и метано-водородных смесях

Дальнейшее развитие камер сгорания для водорода и метано-водородных смесей должно быть связано с переходом от частичной адаптации традиционных конструкций к созданию специализированных систем, изначально рассчитанных на работу в широком диапазоне составов топлива – от природного газа до высоководородных смесей и чистого водорода.

Современный этап развития показывает, что сама постановка задачи уже меняется. Если ранее основное внимание уделялось приспособлению существующих малоэмиссионных схем к умеренным добавкам водорода, то в настоящее время все более актуальной становится разработка таких камер сгорания, которые сохраняют устойчивость, приемлемый уровень эмиссии и надёжность при существенном изменении физико-химических свойств топлива. Именно поэтому перспективные конструкции должны рассматриваться не как модификация «метановой» камеры сгорания, а как самостоятельный класс горелочных и камерных устройств, ориентированных на топливную гибкость и управляемость рабочего процесса.

С этим напрямую связано расширение допустимого диапазона содержания водорода в сухих малоэмиссионных камерах сгорания. Практика показывает, что многие существующие DLE- и DLN-схемы пока обеспечивают работоспособность главным образом при умеренных или средних долях водорода, тогда как дальнейшее развитие должно быть направлено на продвижение таких систем к суще-

ственно более высокому уровню водородной гибкости без применения внешнего разбавления. Решение этой задачи требует одновременного совершенствования геометрии горелочного устройства, структуры течения, организации предварительного смешения и алгоритмов управления подачей топлива и воздуха.

Важным направлением остается развитие распределенных и многозонных схем горения, в том числе решений с короткими участками предварительного смешения и вынесенной зоной тепловыделения. Именно такие подходы создают предпосылки для уменьшения риска проскока пламени, ограничения локальных температур и повышения устойчивости факела при росте доли водорода [52]. В рамках дальнейших исследований особый интерес представляют схемы, в которых удастся совместить управляемое распределение топлива между контурами, развитую рециркуляционную аэродинамику и локализацию основной зоны горения вне внутренних полостей горелки (рисунок 7.12).

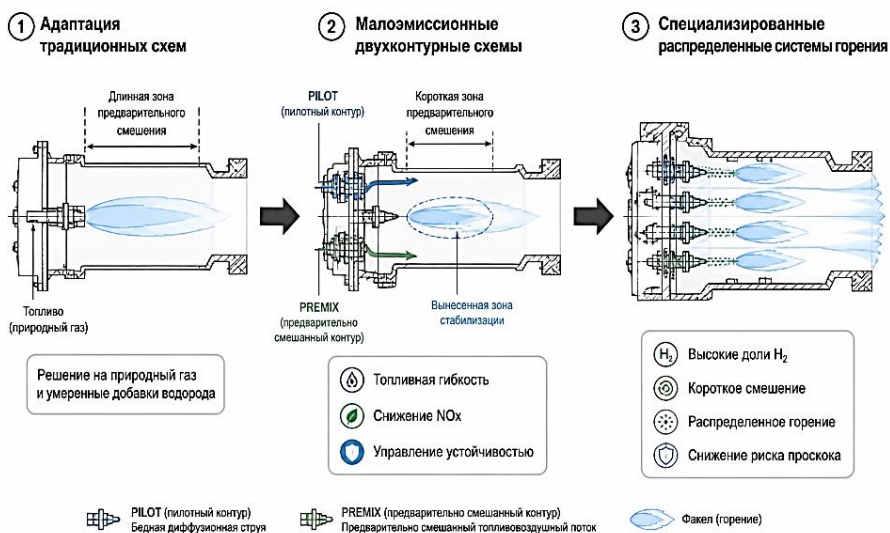


Рисунок 7.12. Эволюция подходов к разработке водородных камер сгорания

Не менее значимым направлением является дальнейшее совершенствование методов снижения эмиссии NO_x без использования внешнего разбавления. Опыт исследований показывает, что наибольший эффект достигается не отдельным локальным приемом, а сочетанием бедного предварительно смешанного горения, распределения тепловыделения по объему камеры и рационального деления топлива между контурами. Следовательно, дальнейшее развитие камер сгорания должно быть связано с поиском таких конструкций, которые обеспечивают пониженный уровень локальных температур при сохранении устойчивости факела и допустимого запаса по проскоку и срыву пламени.

Перспективная камера сгорания должна также обладать расширенной топливной гибкостью в реальном эксплуатационном диапазоне, а не только на одном расчетном составе топлива. Практика энергетического применения водорода показывает, что переход к высоководородным смесям будет происходить постепенно, поэтому камера сгорания должна сохранять работоспособность, экологические характеристики и ресурс при последовательном изменении состава топлива от природного газа к водороду. Это требует закладывать топливную вариативность в конструкцию с самого начала, а не рассматривать ее как дополнительную опцию на поздней стадии проектирования.

Дальнейшее развитие невозможно и без углубления расчетных методов проектирования. Для водородных камер сгорания особенно важны CFD-подходы, учитывающие особенности смешения, химической кинетики, теплообмена, формирования рециркуляционных зон и образования вредных веществ. Однако сами по себе математические модели не могут рассматриваться как достаточный инструмент, поэтому их развитие должно идти параллельно с экспериментальной валидацией, позволяющей уточнять положение фронта пламени, границы устойчивости и эмиссионные характеристики.

Особое значение в этой связи приобретает дальнейшее развитие экспериментальной базы. Для достоверной оценки новых схем необходимы специализированные стенды, оснащенные средствами измерения расходов, давления, температуры, состава продуктов сгорания и визуализации структуры факела. При этом перспективная стендовая база должна обеспечивать исследование не только стационарных режимов, но и переходных процессов, пусков, остановов и колебательных явлений, поскольку именно в этих условиях наиболее отчетливо проявляются ограничения водородных камер сгорания.

Наряду с этим возрастают требования к надёжности и ресурсу конструкционных элементов. По мере увеличения доли водорода изменяются температурные поля, тепловые потоки и условия локального нагрева, вследствие чего повышается нагрузка на фронтные устройства, форсунки, элементы смешения и жаровые трубы. Поэтому дальнейшее развитие камер сгорания должно сопровождаться не только оптимизацией рабочего процесса, но и подбором материалов и конструктивных решений, обеспечивающих долговечность при высокотемпературной эксплуатации (рисунок 7.13).

Отдельное направление связано с интеграцией требований безопасности в саму архитектуру камеры сгорания и топливной системы. Для водородных систем принципиальное значение имеют герметичность, сокращение объема предварительно смешанной горючей смеси, рациональное размещение зон подвода топлива и соответствие специальным нормативным требованиям. По этой причине меры безопасности не должны добавляться к конструкции постфактум; напротив, они должны становиться внутренним принципом построения камеры сгорания уже на стадии компоновки и выбора схемы рабочего процесса.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ

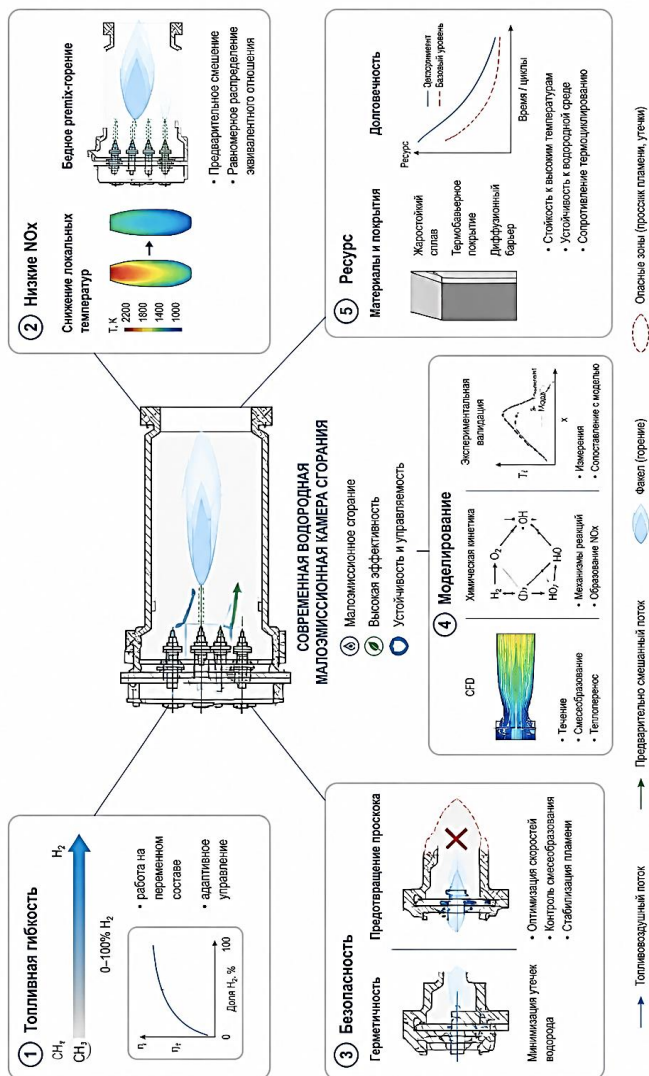


Рисунок 7.13. Ключевые направления дальнейшего развития водородных камер сгорания: топливная гибкость, низкие NOx, безопасность, моделирование и ресурс

В более широком смысле развитие водородных камер сгорания должно быть ориентировано не только на получение работоспособного исследовательского образца, но и на создание промышленно реализуемых решений для конкретных газотурбинных установок. Переход от модельных устройств к реальной энергетической технике требует учета масштабного фактора, особенностей компоновки, эксплуатационной надёжности, требований к автоматике и допустимых диапазонов нагрузок. Именно поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на перевод выявленных закономерностей в инженерные решения промышленного уровня.

Наконец, перспективная камера сгорания должна рассматриваться как элемент более широкой низкоуглеродной энергетической системы. Ее эффективность определяется не только параметрами собственно горелочного устройства, но и условиями получения водорода, способами его хранения и транспортировки, характеристиками топливной инфраструктуры и общим энергетическим балансом установки. В этом контексте развитие камер сгорания на водороде и метано-водородных смесях следует связывать с задачами декарбонизации не изолированно, а как часть единой технологической цепочки.

Таким образом, дальнейшее развитие камер сгорания на водороде и метано-водородных смесях должно идти по пути расширения топливной гибкости, совершенствования малоэмиссионных и распределенных схем горения, углубления расчетно-экспериментального проектирования, ограничения эмиссии NOx без внешнего разбавления, повышения ресурса материалов и интеграции требований безопасности в саму конструкцию камеры сгорания [53]. Именно совокупность этих направлений формирует основу для перехода от исследовательских и опытных решений к надёжным промышленным водородным камерам сгорания нового поколения.

Рассмотренные в главе подходы показывают, что разработка камер сгорания для водорода и метано-водородных смесей требует согласованного решения нескольких взаимосвязанных задач, включающих выбор схемы горелочного устройства, организацию предварительного смешения, ограничение эмиссии NO_x, обеспечение устойчивого горения и выполнение специальных требований безопасности.

По мере увеличения доли водорода традиционные схемы горения все в большей степени приближаются к своим конструктивным и режимным ограничениям. Это делает необходимым переход к специально адаптированным или вновь разрабатываемым архитектурам камер сгорания, в которых учитываются высокая реакционная способность водорода, рост скорости распространения пламени, опасность проскока и самовоспламенения, а также повышенная чувствительность процесса к локальным температурным максимумам [54, 55].

Анализ материалов главы позволяет заключить, что наиболее перспективными являются решения, сочетающие короткие участки предварительного смешения, вынесенную зону стабилизации пламени, управляемое распределение топлива между контурами и меры по ограничению локальных температур, определяющих интенсивность образования оксидов азота. В этом отношении развитие водородных камер сгорания следует связывать с дальнейшим совершенствованием малоэмиссионных двухконтурных и распределенных схем горения, обеспечивающих одновременно устойчивость, экологическую эффективность и топливную гибкость.

Не менее важным является и то, что дальнейший прогресс в данной области невозможен без объединения экспериментальных исследований, расчетного моделирования, материаловедческих разработок и инженерных решений по безопасности. Только такой ком-

плексный подход позволяет перейти от изучения отдельных эффектов к созданию камер сгорания, пригодных для длительной и надёжной работы в составе реальных энергетических установок.

Тем самым практические рекомендации, сформулированные в главе, следует рассматривать не как набор изолированных конструктивных приемов, а как основу для формирования нового поколения камер сгорания, ориентированных на использование водорода и метано-водородных смесей в низкоуглеродной газотурбинной энергетике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемые в монографии вопросы показывают, что использование водорода и метано-водородных смесей в газотурбинных установках относится к числу ключевых направлений развития низкоуглеродной энергетики. Такие топлива позволяют снижать углеродную нагрузку при сохранении присущих газотурбинной технике эффективности и маневренности. Вместе с тем совокупность экспериментальных и теоретических данных убеждает в том, что водород нельзя рассматривать как простой аналог природного газа: переход к водородосодержащим топливам требует иного подхода к организации рабочего процесса в камере сгорания.

По сравнению с метаном водород характеризуется высокой реакционной способностью, малым временем задержки воспламенения, повышенной скоростью распространения пламени и широкими пределами воспламеняемости. Эти особенности радикально изменяют требования к смесеобразованию, геометрии горелочного устройства и способам стабилизации факела. Именно ими обусловлены основные трудности водородного и метано-водородного горения: рост вероятности проскока пламени, риск самовоспламенения в трактах предварительного смешения, изменение структуры факела, усиление чувствительности процесса к режимным параметрам и к локальной аэродинамике. В результате проектирование перспективных камер сгорания должно основываться не на частичной модернизации традиционных схем, а на системном пересмотре принципов организации горения применительно к водородному топливу.

Сопоставление традиционных и новых схем сжигания показывает, что малоэмиссионные камеры, изначально ориентированные на природный газ, могут быть адаптированы к работе на метано-водородных смесях лишь в ограниченном диапазоне составов топлива. При увеличении объёмной доли водорода противоречие между требованиями по снижению NO_x , обеспечению устойчивости и предотвращению проскока пламени последовательно нарастает, и возможности классических premix- и DLE/DLN-схем постепенно исчерпываются. В области умеренных долей водорода оправдана рациональная адаптация существующих решений; при переходе к высоководородным и предельным режимам требуются специальные подходы, изначально учитывающие иные физико-химические свойства топлива.

К числу таких подходов относятся схемы, в которых последовательно сокращается длина участков предварительного смешения, локализуется область формирования горючей смеси, выносятся зона стабилизации пламени вниз по потоку и распределяется тепловыделение между множеством локальных элементов. В этом ряду особый интерес представляют кластерные горелочные устройства. Они сочетают короткие пути локального смешения с развитой системой аэродинамической стабилизации и возможностью регулировать распределение топлива между контурами, что позволяет уменьшать риск обратного распространения пламени и управлять температурным полем. С научно-технических позиций кластерный подход следует рассматривать как одно из наиболее перспективных направлений развития водородных камер сгорания нового поколения.

Отдельного внимания заслуживает задача ограничения эмиссии оксидов азота. Материал монографии показывает, что уровень NO_x при сжигании водорода определяется не каким-то одним пара-

метром, а совокупным влиянием состава топлива, степени предварительного смешения, коэффициента избытка воздуха, структуры факела, распределения тепловыделения и схемы подачи топлива. Малоэмиссионная водородная камера сгорания должна рассматриваться как единая система, в которой однородность смеси, работа на бедных режимах, распределённое тепловыделение и согласованная работа premix- и pilot-контуров образуют взаимосвязанную конструктивно-режимную концепцию.

Не менее сложным оказывается и вопрос устойчивости горения. Для водородных и метано-водородных смесей устойчивость следует трактовать шире, чем отсутствие срыва факела. Важны также защита от проскока пламени и самовоспламенения в каналах смешения, подавление опасных термоакустических колебаний, способность камеры сохранять контролируемое состояние при изменении состава топлива и режимных параметров. Достижение такой устойчивости возможно только при согласованном выборе аэродинамической структуры течения, положения и характера зоны стабилизации, скорости подачи компонентов и распределения топлива между основным и пилотным контурами.

Представленные расчётные и экспериментальные материалы позволяют сформулировать и более общий вывод о методологии разработки водородных камер сгорания. Высокая чувствительность водородного горения к локальным изменениям режима и структуры потока делает недостаточным как чисто эмпирический, так и сугубо расчётный подход. Эффективное проектирование требует сочетания теоретического анализа, численного моделирования и экспериментальной верификации на модельных и опытных образцах. Современные методы вычислительной газодинамики (включая RANS-подходы, модели напряжений Рэйнольдса, FGM-методику и LES-моделирование) открывают возможности для детального анализа течения, смесеобразования и образования загрязняющих веществ,

однако приобретают практический смысл только в связке с надёжными экспериментальными данными, полученными на специализированных стендах в условиях, близких к реальным.

Важной составной частью единой концепции является и обеспечение безопасности. Свойства водорода и особенности его использования в камерах сгорания показывают, что требования безопасности не могут рассматриваться как внешнее ограничение, накладываемое на уже спроектированную систему. Они должны включаться в замысел конструкции с самого начала: при выборе материалов, определении допустимого объёма предварительно смешанной среды, проектировании трассировки и герметизации топливных трактов, системе контроля и диагностики, алгоритмах пуска и останова. Без такого подхода невозможно обеспечить надёжную и длительную эксплуатацию водородных камер сгорания.

В итоге перспективную камеру сгорания для водорода и метано-водородных смесей следует рассматривать как многофакторную инженерную систему, в которой топливная гибкость, низкий уровень выбросов, устойчивость горения и безопасность эксплуатации достигаются не набором отдельных мер, а целостной конструктивно-режимной стратегией. В её основе лежат локализованное и контролируемое смесеобразование, распределённое тепловыделение, управляемая стабилизация пламени, ограничение температурных максимумов и адаптация схемы горения к широкому диапазону составов топлива.

В более широком научно-техническом контексте рассмотренный материал позволяет заключить, что дальнейшее развитие газотурбинных камер сгорания будет связано с переходом от частично модернизированных метановых решений к специализированным водородным архитектурам, рассчитанным на длительную работу при изменяющемся составе топлива. Такие архитектуры должны сочетать конструктивную новизну, расчётно-экспериментальную

обоснованность и высокий уровень эксплуатационной надёжности. Именно в этом направлении следует ожидать последующего развития водородных и метано-водородных камер сгорания, предназначенных для энергетических газотурбинных установок нового поколения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. International Energy Agency. The Future of Hydrogen. – Paris: IEA, 2019. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/TheFutureofHydrogen.pdf> (дата обращения: 21.06.2021).
2. Taamallah, S. Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion / S. Taamallah, K. Vogiatzaki, F. M. Alzahrani // *Applied Energy*. – 2015. – Vol. 154. – P. 1020–1047.
3. Schefer, R. W. Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner / R. W. Schefer, D. M. Wicksall, A. K. Agrawal, D. O. White, K. O. Keller // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2002. – Vol. 29. – P. 843–851.
4. Griebel, P. Lean Blowout Limits and NO_x Emissions of Turbulent, Lean Premixed, Hydrogen-Enriched Methane/Air Flames at High Pressure / P. Griebel, D. Stollen, B. Emonts // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2007. – Vol. 129, No. 2. – P. 404–412.
5. Van Oijen, J. A. State-of-the-art in premixed combustion modeling using flamelet generated manifolds / J. A. Van Oijen, A. Donini, R. J. M. Bastiaans, J. H. M. Thije Boonkkamp, L. P. H. de Goeij // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2016. – Vol. 57. – P. 30–74.
6. Cheng, L. Large eddy simulation of the effect of hydrogen ratio on the flame stabilization and blow-off dynamics of a lean CH₄/H₂/air bluff-body flame / L. Cheng [и др.] // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, No. 5. – P. 1846.
7. Matveev, S. S. Kinetic Models of Methane-Hydrogen Mixture Combustion: Brief Review and Validation / S. S. Matveev [и др.] // *Thermal Engineering*. – 2022. – Vol. 69, No. 10. – P. 792–801.

8. Matveev, S. S. Stability Limits of the Methane–Hydrogen Mixture Combustion / S. S. Matveev [и др.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – Vol. 50, No. 4. – P. 150–157.
9. Beita, J. Thermoacoustic Instability Considerations for High Hydrogen Combustion in Lean Premixed Gas Turbine Combustors: A Review / J. Beita, M. Talibi, S. Sadasivuni, R. Balachandran // Hydrogen. – 2021. – Vol. 2. – P. 33–57.
10. Lieuwen, T. Unsteady Combustor Physics / T. Lieuwen. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 424 p.
11. Hydrogen Gas Turbines. – URL: <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/02/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf> (дата обращения: 21.06.2021).
12. Lieuwen, T. Synthesis Gas Combustion: Fundamentals and Applications / T. Lieuwen, V. Yang, R. Yetter. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 400 p.
13. Asai, T. Applicability of a Multiple-Injection Burner to Dry Low-NO_x Combustion of Hydrogen-Rich Fuels / T. Asai, H. Koizumi, S. Dodo, H. Takahashi, S. Yoshida, H. Inoue // Proceedings of ASME Turbo Expo. – 2010. – Paper GT2010-22286. – P. 1–10.
14. Asai, T. Effects of Multiple-Injection-Burner Configurations on Combustion Characteristics for Dry Low-NO_x Combustion of Hydrogen-Rich Fuels / T. Asai, S. Dodo, H. Koizumi, H. Takahashi, S. Yoshida, H. Inoue // Proceedings of ASME Turbo Expo. – 2011. – Paper GT2011-45295. – P. 1–10.
15. Buttler, A. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: a review / A. Buttler, H. Spliethoff // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 2440–2454.
16. Demir, M. E. Cost assessment and evaluation of various hydrogen delivery scenarios / M. E. Demir, I. Dincer // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Vol. 43. – P. 10420–10430.
17. Wijayanta, A. T. Liquid hydrogen, methylcyclohexane and ammonia as potential hydrogen storage: comparison review /

A. T. Wijayanta, T. Oda, C. W. Purnomo, T. Kashiwagi, M. Aziz // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Vol. 44. – P. 15026–15044.

18. Aakko-Saksa, P. T. Liquid organic hydrogen carriers for transportation and storing of renewable energy / P. T. Aakko-Saksa, C. Cook, J. Kiviaho, T. Repo // *Journal of Power Sources*. – 2018. – Vol. 396. – P. 803–823.

19. Niermann, M. Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties / M. Niermann, A. Beckendorff, M. Kaltschmitt, K. Bonhoff // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Vol. 44. – P. 6631–6654.

20. Al-Ghaferi, A. Using Hydrogen Blends as Fuel in a Swirl Burner / A. Al-Ghaferi [и др.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 870. – 012154.

21. Wang, Z. Effect of hydrogen addition on the laminar burning velocity and flame stability / Z. Wang [и др.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48. – P. 3490–3502.

22. Matveev, S. S. Numerical and Experimental Study of NO_x Formation during Hydrogen Combustion in a Model Combustor with a Cluster Microflame Burner / S. S. Matveev [и др.] // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2024. – Vol. 60, No. 4. – P. 508–514.

23. Wind, T. Co-Firing of Hydrogen and Natural Gases in Lean Premixed Conventional and Reheat Burners: Alstom GT26 / T. Wind, F. Guthe, K. Syed // *Proceedings of ASME Turbo Expo*. – 2014. – Vol. 4A. – P. 1–10.

24. Matveev, S. S. Numerical and Experimental Determination of the Flame Flashback in a Methane–Hydrogen Fuel Used in Combustors of Gas-Turbine Engines and Propulsion Facilities / S. S. Matveev [и др.] // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2024. – Vol. 60, No. 4. – P. 515–522.

25. York, W. D. Development and Testing of a Low NO_x Hydrogen Combustion System for Heavy-Duty Gas Turbines / W. D. York, W. S. Ziminsky, E. Yilmaz // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2013. – Vol. 135, No. 2. – P. 1–10.

26. Cocchi, S. Experimental Characterization of a Hydrogen Fueled Combustor With Reduced NO_x Emissions for a 10 MW Class Gas Turbine / S. Cocchi, S. Sigali, M. Provenziale, V. Cinti, L. Carrai, D. Cappetti // Proceedings of ASME Turbo Expo. – 2008. – Paper GT2008-51271. – P. 991–1000.

27. Cocchi, S. Development of a Low NO_x Hydrogen Fuelled Combustor for 10 MW Class Gas Turbines / S. Cocchi, S. Sigali // Proceedings of ASME Turbo Expo. – 2010. – Paper GT2010-23348. – P. 1025–1035.

28. Cerutti, M. Hydrogen Fueled Dry Low NO_x Gas Turbine Combustor Conceptual Design / M. Cerutti, S. Cocchi, R. Modi, S. Sigali, G. Bruti // Proceedings of ASME Turbo Expo. – 2014. – Paper GT2014-26136. – P. 1–11.

29. Zhang, K. Experimental and numerical study on flow/flame interactions and lean blowout limits of premixed hydrogen-enriched methane flames / K. Zhang [и др.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 52. – P. 1186–1198.

30. Zhang, J. Experimental study on the excitation of thermoacoustic instability of hydrogen-methane-air premixed flames under atmospheric and elevated pressure conditions / J. Zhang, A. Ratner // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44. – P. 21324–21335.

31. Shanbhogue, S. J. Flame macrostructures, combustion instability and extinction strain scaling in swirl-stabilized premixed CH₄-H₂ combustion / S. J. Shanbhogue, Y. S. Sanusi, S. Taamallah // Combustion and Flame. – 2016. – Vol. 163. – P. 494–507.

32. Runyon, J. Lean methane flame stability in a premixed generic swirl burner: isothermal flow and atmospheric combustion characterization / J. Runyon, R. Marsh, P. Bowen, D. Pugh, A. Giles, S. Morris // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – Vol. 92. – P. 125–140.

33. Runyon, J. Experimental Analysis of Confinement and Swirl Effects on Premixed CH₄-H₂ Flame Behavior in a Pressurized Generic Swirl Burner / J. Runyon, R. Marsh, D. Pugh, P. Bowen, A. Giles, S. Morris, A. Valera-Medina // Proceedings of the ASME Turbo Expo

2017 Turbomachinery Technical Conference and Exposition. – 2017. – Vol. 4B. – P. 1–5.

34. Gupta, A. K. Swirl Flows / A. K. Gupta, D. G. Lilley, N. Syred. – Tunbridge Wells: Abacus Press, 1984. – 488 p.

35. Figura, L. The effects of fuel composition on flame structure and combustion dynamics in a lean premixed combustor / L. Figura, J. G. Lee, B. D. Quay, D. A. Santavicca // ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air. – 2007. – P. 181–187.

36. Dodo, S. Performance of a Multiple-Injection Dry Low NO_x Combustor with Hydrogen-Rich Syngas Fuels / S. Dodo, T. Asai, H. Koizumi, H. Takahashi, S. Yoshida, H. Inoue // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2013. – Vol. 135, No. 1. – P. 1–7.

37. Stöhr, M. Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor / M. Stöhr [и др.] // Proceedings of the Combustion Institute. – 2011. – Vol. 33. – P. 2953–2960.

38. Asai, T. A Dry Low-NO_x Gas-Turbine Combustor with Multiple-Injection Burners for Hydrogen-Rich Syngas Fuel: Testing and Evaluation of its Performance in an IGCC Pilot Plant / T. Asai, S. Dodo, Y. Akiyama, A. Hayashi, M. Karishuku, S. Yoshida // ASME Power Conference. – 2013. – Paper 98122. – P. 1–10.

39. Asai, T. Part Load Operation of a Multiple-Injection Dry Low NO_x Combustor on Hydrogen-Rich Syngas Fuel in an IGCC Pilot Plant / T. Asai, S. Dodo, M. Karishuku, N. Yagi, Y. Akiyama, A. Hayashi // Proceedings of ASME Turbo Expo. – 2015. – Paper GT2015-42312. – P. 1–10.

40. Asai, T. Performance of Multiple-Injection Dry Low-NO_x Combustors on Hydrogen-Rich Syngas Fuel in an IGCC Pilot Plant / T. Asai, S. Dodo, M. Karishuku, N. Yagi, Y. Akiyama, A. Hayashi // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2015. – Vol. 137, No. 9. – P. 1–11.

41. Karlis, E. H₂ enrichment of CH₄ blends in lean premixed gas turbine combustion: an experimental study on effects on flame shape and thermoacoustic oscillation dynamics / E. Karlis, Y. Liu, Y. Hardalupas, A. M. K. P. Taylor // Fuel. – 2019. – Vol. 254. – P. 1–16.

42. Davis, D. W. Effect of hydrogen on the thermo-acoustics coupling mechanisms of low-swirl injector flames in a model gas turbine combustor / D. W. Davis, P. L. Therkelsen, D. Littlejohn, R. K. Cheng // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2013. – Vol. 34. – P. 3135–3143.

43. Wicksall, D. M. Acoustics measurements in a lean premixed combustor operated on hydrogen-hydrocarbon fuel mixtures / D. M. Wicksall, A. K. Agrawal // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2007. – Vol. 32. – P. 1103–1112.

44. Yilmaz, I. Experimental investigation of thermoacoustic coupling using blended hydrogen-methane fuels in a low swirl burner / I. Yilmaz, A. Ratner, M. Ilbas, Y. Huang // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2010. – Vol. 35. – P. 329–336.

45. Indlekofer, T. The effect of hydrogen addition on the amplitude and harmonic response of azimuthal instabilities in a pressurized annular combustor / T. Indlekofer, B. Ahn, Y. H. Kwah // *Combustion and Flame*. – 2021. – Vol. 228. – P. 375–387.

46. Garcia-Armingol, T. Operational issues in premixed combustion of hydrogen-enriched and syngas fuels / T. Garcia-Armingol, J. Ballesster // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2015. – Vol. 40. – P. 1229–1243.

47. Zubrilin, A. Lean blowout limit prediction in a combustor with the pilot flame / A. Zubrilin [и др.] // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 141. – P. 273–281.

48. Matveev, S. S. Lean Blowout Limits in Combustion Chambers during Lean CH₄-H₂-Air Mixture Burning / S. S. Matveev [и др.] // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2024. – Vol. 51, No. 10. – P. 403–409.

49. Matveev, S. S. Effect of hydrogen addition on the thermal state of the flame tube / S. S. Matveev [и др.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2023. – Vol. 2999, No. 1. – P. 020033.

50. Vashishtha, A. CFD-CRN Study of NO_x Formation in a High-Pressure Combustor Fired with Lean Premixed CH₄-H₂-Air Mixtures / A. Vashishtha, S. Yousefian, G. Goldin, K. Frojd, S. Jella, G. Bourque,

R. F. D. Monaghan // ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air. – 2020. – Paper GT2020-14819. – P. 1–12.

51. Ji, L. Structure and thermoacoustic instability of turbulent swirling lean premixed methane/hydrogen/air flames in a model combustor / L. Ji, J. Wang, W. Zhang [и др.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 60. – P. 890–901. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.162.

52. Haj Ayed, A. Experimental and numerical investigations of the DLN hydrogen micromix combustion chamber of an industrial gas turbine / A. Haj Ayed, K. Kusterer, H. H.-W. Funke, C. Striegan, D. Bohn // Propulsion and Power Research. – 2015. – Vol. 4, No. 3. – P. 123–131.

53. Stuttaford, P. Extended Turndown, Fuel Flexible Gas Turbine Combustion System / P. Stuttaford, H. Rizkalla, Y. Chen, B. Copley, T. Faucett // Proceedings of ASME Turbo Expo. – 2010. – Paper 22585. – P. 483–492.

54. Bothien, M. R. Sequential combustion in gas turbines: the key technology for burning high hydrogen contents with low emissions / M. R. Bothien, A. Ciani, J. P. Wood, G. Fruechtel // ASME Turbo Expo. – 2019. – Vol. 4A. – P. 1–10.

55. Ciani, A. Superior fuel and operational flexibility of sequential combustion in Ansaldo Energia gas turbines / A. Ciani, M. R. Bothien, B. Bunkute, J. P. Wood, G. Fruechtel // Proceedings of Global Power and Propulsion Society Technical Conference. – 2019. – Vol. 3. – P. 630–638.

Научное издание

Матвеев Сергей Сергеевич
Идрисов Дмитрий Владимирович

**ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ
И УСТАНОВКАХ: ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ
И КОНСТРУКТИВНЫЕ АСПЕКТЫ**

Монография

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета

Подписано в печать 23.06.2026. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 11,25.

Тираж 120 экз. (1-й з-д 1-27). Заказ № .

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.