

УТВЕРЖДАЮ



Проректор – начальник управления  
научной политики Московского  
государственного университета  
имени М.В. Ломоносова

А.А. Федянин

21 октября 2012 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Ковалю Алексея Сергеевича «Переходные режимы горения и детонация метано-воздушных смесей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 — «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Применение новых принципов организации процесса горения в промышленных установках (например, в скоростных горелках) является актуальной задачей по причине роста стоимости углеводородных топлив и постоянно возрастающих экологических требований, накладываемых на такие установки. Камеры сгорания, работа которых основывается на медленном дефлаграционном сжигании топлива при невысоких избыточных давлениях, обладают фундаментальными ограничениями на теплонпряженность, а также на коэффициент использования тепловой энергии продуктов. Применение детонационного цикла сгорания топливо-воздушных смесей, как более эффективного, позволяет обойти указанные ограничения.

Диссертационная работа Ковалю Алексея Сергеевича посвящена разработке научных основ проектирования энергосберегающих и энергоэффективных импульсно-детонационных горелочных устройств, обеспечивающих комбинированное (тепловое и механическое) воздействие на объекты, обдуваемые продуктами детонации. Однако, в скоростные горелки, эксплуатирующихся в промышленности, в качестве топлива используется природный газ, основным компонентом которого является метан, имеющий низкую детонационную способность, что требует либо крайне высоких энергий прямого инициирования детонации, либо особой организации процесса перехода горения в детонацию на максимально коротких расстояниях. Использование автором диссертации методики «быстрого» перехода горения в детонацию позволило получить стабильный детонационный процесс на приемлемых для промышленного применения расстояниях.

Диссертация состоит из введения, семи глав, формулировки основных результатов и выводов, списка цитируемой литературы из 116 источников. Диссертация изложена на 135 страницах и включает в себя 69 рисунков и 6 таблиц.

Во **введении** достаточно убедительно обоснована актуальность выбранной темы исследования и достоверность полученных результатов, сформулированы ее цель и за-

дачи, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Кратко описаны использованные методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, представлены дымные по апробации результаты на российских и международных конференциях, отмечен личный вклад автора, принимавшего непосредственное участие на всех этапах исследований, а также в подготовке статей и представлении докладов.

**В первой** главе диссертации дан исчерпывающий литературный обзор по теме работы и представлено убедительное доказательство преимущества детонационного режима сжигания природного газа по сравнению с медленным горением, представлена схема функционирования детонационной камеры сгорания, рассмотрена термодинамическая эффективность детонационного цикла и приведены примеры его практической реализации. Описаны методики инициирования детонации и исследования, посвященные механизму быстрого перехода горения в детонацию и способам его организации.

**Вторая** глава содержит описание многовариантных параметрических расчетов, проведенных для оптимизации конфигурации устройства зажигания и ускорителя пламени, являющихся основными компонентами импульсно-детонационного горелочного устройства. В расчетах использовался алгоритм многомерного численного моделирования, в основе которого лежит метод явного выделения фронта пламени. В результате анализа полученных данных была выбрана форкамерно-факельная конфигурация устройства зажигания, обеспечивающая максимальные показатели по давлению, видимой скорости пламени в расширительной емкости и скорости потока в трубе горелочного тракта, а также определена форма и расстановка препятствий в секции ускорителя пламени, при которой достигается максимальное расчетное ускорение в трубе и максимальная стационарная скорость пламени.

**В третьей** главе описаны результаты расчетных и экспериментальных исследований динамики процессов горения стехиометрической метано-воздушной смеси при переходе волны горения из трубы большого диаметра в трубу меньшего диаметра. Для разработанных во второй главе схем проведено трехмерное численное моделирование системы «узел зажигания – устройство ускорения пламени» с целью уточнения эффективности их совместного функционирования. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало их хорошее соответствие. Проведены экспериментальные исследования распространения комплекса «ударная волна – зона реакции», позволившие определить условия, в которых возникают режимы быстрого дефлаграционного горения, близкие к детонационным, при зажигании источником, не создающим интенсивных волн сжатия. По результатам расчетно-экспериментальных исследований определены достаточные для инициирования быстрого перехода горения в детонацию значения интенсивности ударной волны и видимой скорости пламени, предложена схема ускорителя пламени для экспериментального горелочного устройства:

**Четвертая** глава посвящена описанию результатов экспериментальной работы, направленной на реализацию быстрого перехода горения в детонацию при высокоскоростной отдельной подаче природного газа и воздуха. Скорость течения в рабочем объеме составляла около 10 м/с. Необходимость отдельной подачи топливных компо-

ентов обусловлена требованиями безопасности при промышленном применении. При этом использовался слабый источник зажигания с энергией около 1 Дж. Полученные результаты позволяют значительно увеличить рабочую частоту, а соответственно и тепловую мощность перспективных устройств.

В **пятой** главе приводятся результаты модернизации установки, описанной в четвертой главе. Впервые был получен циклический быстрый переход горения в детонацию в условиях высокоскоростного течения с отдельной подачей топливных компонентов в трубе околопредельного диаметра (150 мм) на расстояниях 3–4 м от источника зажигания при работе установки на частоте 1 Гц с теоретической возможностью увеличения частоты до 1.5–2 Гц. В ходе экспериментов коэффициент цикловой неустойчивости не превышал 5–10 %, что свидетельствует о хорошей повторяемости перехода горения в детонацию. Таким образом полученный ПГД может стать основой функционирования промышленных ИДГУ.

В **шестой** главе описаны результаты тепловых испытаний лабораторного образца устройства, работающего с частотой 2 Гц на смеси природного газа и воздуха. Получены необходимые данные для разработки энергоэффективной системы принудительного охлаждения.

В **седьмой** главе рассматривается схема организации быстрого перехода горения в детонацию за счет создания условий для быстрого ускорения пламени с помощью перекрестных сверхзвуковых газовых струй, обеспечивающих высокую турбулентность. Представленные результаты экспериментального исследования могут быть востребованы при создании эффективных преддетонаторов, которые могут потребоваться в тех случаях, когда использование препятствий-турбулизаторов в рабочем объеме затруднено или невозможно.

В качестве наиболее значимых результатов можно выделить следующее:

1. С помощью расчетов и экспериментов определены условия возникновения режимов быстрого дефлаграционного горения в смесях природного газа и воздуха при зажигании источником, не генерирующим интенсивных волн давления в системах, представляющих собой каналы разного диаметра и содержащих препятствия-турбулизаторы.

2. Экспериментально показана возможность осуществления быстрого перехода горения в детонацию слабым источником зажигания (с энергией до 1 Дж) в смесях природного газа и воздуха в трубах околопредельного диаметра (150 мм) при отдельной подаче топливных компонентов.

3. Экспериментально получен циклический быстрый переход горения в детонацию в условиях высокоскоростного течения при непрерывной отдельной подаче компонентов смеси в трубе длиной 5.5 м.

4. Экспериментально показана возможность реализации циклического перехода горения в детонацию на расстояниях до четырех калибров трубы при зажигании слабым источником за счет турбулентности, создаваемой перекрестными сверхзвуковыми струями природного газа и кислорода.

Полученные в работе результаты являются актуальными и новыми. Их достоверность обеспечивается использованием апробированных измерительных методик, непротиворечивостью получаемых результатов и их удовлетворительным согласием с результатами численных расчетов, воспроизводимостью результатов при неизменных условиях экспериментов.

Научная значимость полученных результатов состоит в том, что на основе проведенных исследований созданы научные основы проектирования энергосберегающих и энергоэффективных импульсно-детонационных горелочных устройств, применение которых позволит значительно повысить эффективность технологий скоростного нагрева, переработки отходов, а также теплоэнергетических технологий. Такие устройства обеспечивают комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами детонации – тепловое и ударно-волновое – при более низкой эмиссии токсичных веществ (оксидов азота и углерода, сажи и др.). Кроме того, полученные результаты можно использовать для создания компактных преддетонаторов для детонационных камер сгорания перспективных прямоточных двигателей летательных аппаратов.

Полученные результаты полностью отражены в 6 публикациях, в российских и международных изданиях, входящих в перечень ВАК. Материалы диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Работа выполнена автором самостоятельно на высоком научном и методическом уровне. Результаты работы наряду с очевидной научной новизной имеют практическую значимость.

По тексту и содержанию работы имеется несколько вопросов и замечаний:

1) В работе приводятся распределения параметров газа, полученные в результате численного моделирования такие, как турбулентная кинетическая энергия, давление, температура. Из описания методики численного расчета не ясен метод определения параметров газа в сечении: осреднение по объёму, массе или максимальные значения.

2) В главе 2 на основании результатов трехмерного численного моделирования сделаны выводы о влиянии геометрической конфигурации кольцевых препятствий на характер измерения величины турбулентных пульсаций вдоль канала. Как полученные результаты использованы при определении эффективности различных конфигураций устройства зажигания и были ли использованы при проектировании экспериментальных устройств?

3) В Главе 7 представлены экспериментальные результаты по инициированию детонации в перекрестных высокоскоростных струях при отдельной подаче топливных компонентов. В тексте диссертации не приведён теоретический анализ процессов, сопровождающих переход горения в детонацию в перекрестных струях, а также не приведена информация о величине скорости струй топливных компонентов и их пространственных характеристиках.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей ценности диссертационной работы Коваля А.С.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, с изменениями от 26.09.2022 № 1690, и является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработаны теоретические основы метода циклической генерации детонационных волн в промышленных газозвудушных смесях и экспериментально тестированы в опытных образцах импульсно-детонационных горелочных устройств. Результаты могут быть рекомендованы к использованию при проектировании энергоэффективных и энергосберегающих промышленных скоростных горелок.

Коваль Алексей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 — «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Отзыв ведущей организации обсужден и одобрен на заседании подсекции НТС по физико-химической газовой динамике (протокол №10 от 20.09.2022)

Зав. лаб. НИИ механики МГУ  
академик, д.ф.-м.н.

В.А.Левин

В.н.с. НИИ механики МГУ,  
к.ф.-м.н.

А.Н. Хмелевский

Подписи В.А. Левина,  
А.Н. Хмелевского удостоверяю  
Зам. директора НИИ механики МГУ  
д.ф.-м.н.



М.З. Досаев

Лаборатория 112 "Газодинамики взрыва и реагирующих систем" НИИ Механики МГУ  
119192 Москва, Мичуринский проспект, д. 1

Тел: +7 (495) 939-31-83

E-mail: levin@imec.msu.ru