

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ, ПРОЦЕССЫ И ОБЪЕКТЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ГОРЕНИЮ И ВЗРЫВУ

С. М. Фролов

**Создание научных основ проектирования  
непрерывно-детонационных камер сгорания  
для газотурбинных двигателей  
и энергетических установок нового поколения**

Использование камер сгорания с повышением полного давления — путь, позволяющий существенно повысить термодинамическую эффективность современных газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных энергетических установок (ГТУ). Повысить полное давление в камере сгорания можно, увеличив скорость горения топливно-воздушной смеси (ТВС) и/или изменив режим горения. Наиболее привлекательным (по термодинамической эффективности) режимом быстрого горения является детонация. Для использования детонации в силовых установках летательных аппаратов и в ГТУ никаких фундаментальных ограничений нет.

Известны три основные схемы организации детонационного горения: в детонационной волне (ДВ), стабилизированной в сверхзвуковом потоке; в периодических ДВ, бегущих вдоль камеры сгорания (КС); и в ДВ, непрерывно циркулирующих в тангенциальном направлении поперек КС (камеры с непрерывной детонацией, КНД). Первую и вторую схемы считают перспективными применительно к прямоточным реактивным двигателям, а третью — для ГТД и ГТУ.

На мой взгляд, сегодня одна из актуальных задач — создание научных основ проектирования КНД для ГТД и ГТУ нового поколения. Необходимо начать в нашей стране масштабные расчетно-теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении.

На первом этапе на основе многомерного численного моделирования рабочего процесса в КНД следует определить ключевые проблемы интеграции КНД в ГТД или ГТУ, включая тепловое состояние стенок камеры и параметры течения на входе и выходе КНД, и предложить пути решения этих проблем. Для этого следует провести расчеты для вариантов КНД с отдельной подачей компонентов ТВС (воздуха и углеводородного горючего), с воздушным охлаждением стенок и с подачей вторичного воздуха для охлаждения продуктов детонации, а также с устройствами ослабления ударных волн, бегущих вверх и вниз по потоку. Камера должна иметь компактную конструкцию, обеспечивающую:

- (1) устойчивый рабочий процесс с одной или несколькими ДВ;
- (2) повышение полного давления;
- (3) приемлемую температуру продуктов детонации в выходном сечении;
- (4) приемлемый уровень пульсаций температуры и давления в выходном сечении;
- (5) приемлемый уровень пульсаций давления во входном сечении;
- (6) приемлемую температуру стенки.

Под «приемлемыми» уровнями рабочих параметров и их пульсаций в КНД я понимаю их примерное соответствие тем уровням, которые допускаются в современных ГТД и ГТУ. Не исключено, что в процессе расчетно-теоретических исследований выяснится, что одновременное выполнение всех отмеченных требований невозможно, если за основу брать технологический уровень существующих ГТД и ГТУ. Может оказаться, что для выполнения этих требований понадобится разработка и внедрение новых жаропрочных и виброустойчивых материалов, новых лопаточных машин и др. В этом случае в результате таких исследований появятся новые научно обоснованные ориентиры для соответствующих областей знаний.

На втором этапе следует начинать проектирование, изготовление и испытания лабораторных образцов КНД повышенной эффективности с устойчивым рабочим процессом. Только при наличии таких образцов станут понятными реальные перспективы практических приложений: от краткосрочных до долгосрочных.

Следует также подчеркнуть, что переход от горения к детонации в ГТД и ГТУ позволит существенно снизить эмиссию вредных

веществ, в частности оксидов азота. На это указывают и расчет, и уже имеющиеся экспериментальные данные.

**В. С. Арутюнов, В. М. Шмелев, А. Н. Рахметов**

### **Новые подходы к созданию малоэмиссионных камер сгорания для газотурбинных установок**

Газотурбинные двигатели и стационарные ГТУ благодаря своей компактности, высокой удельной мощности, энергоэффективности, экономичности и маневренности стали одним из основных типов энергоприводов для авиации, наземного транспорта и энергетики. В течение десятилетий повышение именно этих качеств было движущей силой прогресса в разработке газовых турбин. Однако по мере нарастания экологических проблем и связанного с этим ужесточения норм экологического регулирования возникла необходимость кардинального улучшения эмиссионных характеристик ГТУ. Предлагавшиеся до сих пор решения проблемы создания малоэмиссионных газовых турбин основывались на различных модификациях процесса горения в камерах сгорания ГТУ, не затрагивающих основные принципы факельного сжигания топлива.

По нашему мнению, радикальным решением этой проблемы может стать создание принципиально нового типа КС для ГТУ, процесс горения в которой изначально ориентирован на достижение минимального уровня выброса вредных веществ. В качестве прототипа для организации процесса горения в новом типе КС ГТУ нами предложены низкоэмиссионные горелочные устройства на основе проницаемых объемных матриц (объемных матричных горелок). Они сочетают отличные эмиссионные характеристики с высокой эффективностью конверсии различных типов топлива и высокой плотностью потока энергии с единицы поверхности.

Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что на основе объемных проницаемых матричных горелок могут быть созданы малоэмиссионные матричные КС (МКС) для ГТУ, практически не уступающие традиционным КС по основным энергетическим характеристикам, но обеспечивающие значительно более низкий уровень вредных выбросов. Основное преимущество МКС заключается в замене турбулентного факельного сжигания

топлива его ламинарным сжиганием вблизи поверхности объемной матрицы. Уникально низкая (1200–1300 °С) температура фронта пламени в МКС при высокой полноте сгорания даже очень бедных смесей позволяет обеспечить снижение объема вредных выбросов, прежде всего NO<sub>x</sub> и CO, до уровня, недоступного другим известным типам горелочных устройств.

Можно прогнозировать, что за счет ламинарного режима горения в матрице и более низких максимальных температур МКС обеспечит более высокую стабильность горения и, соответственно, значительно меньший уровень пульсаций потока, что позволит снизить требования к конструкционным материалам камеры сгорания и повысит ее рабочий ресурс. Новый тип КС позволит отказаться от таких сложных и ненадежных компонентов традиционных КС, как жаровая труба и система ее охлаждения, а также система подачи вторичного воздуха, что не только облегчит и упростит конструкцию, но и еще более повысит ресурс работы КС. Новый тип КС также расширяет возможность использования в ГТУ низкокачественных и альтернативных топлив. За счет упрощения конструкции КС и отсутствия зоны догорания топлива можно ожидать снижения габаритно-весовых характеристик МКС по сравнению с КС типовых ГТУ и приближения их к параметрам лучших авиационных ГТД.

**Н. Я. Василик, В. Г. Крупкин**

### **Технологические газодинамические установки нового поколения для нанесения покрытий и формирования на поверхности объектов слоев композиционных материалов**

По нашему мнению, одно из наиболее эффективных ресурсосберегающих технологических направлений — это создание на рабочей поверхности изделия слоя материалов с высокими эксплуатационными свойствами. Термические методы нанесения износостойких, теплозащитных, коррозионностойких и других покрытий на поверхности деталей самого разного назначения с использованием процессов горения и взрыва сегодня широко используются в промышлен-

ности. Так, термическое напыление — высокотехнологичная отрасль мировой экономики с годовым оборотом около 5 млрд долларов США [1]. Известно множество конструктивных схем технологических установок. Высокоскоростные газопламенные установки обеспечивают высокую производительность при скорости дисперсных материалов 500–600 м/с. Такие режимы в газопламенных установках реализуются за счет сжигания большого объема компонентов горючей смеси. Это дорогие, сложные и энергоемкие устройства. Технологические устройства, использующие детонационный режим сгорания, позволяют формировать покрытия более высокого качества с меньшей пористостью и большей прочностью сцепления с материалом подложки за счет более высокой скорости дисперсных материалов при значительно более низком (в 2–3 раза) расходе компонентов горючей смеси на 1 кг формируемого слоя покрытия. Применение устройств с детонационным режимом сгорания ограничивается неустойчивостью технологических режимов и сложностью управления. Вышеприведенные устройства имеют сравнительно низкий коэффициент использования напыляемых материалов, что снижает эффективность таких технологических установок.

Накопленный опыт эксплуатации технологических установок для нанесения покрытий с использованием процессов горения и взрыва, результаты теоретических и экспериментальных исследований в области горения и взрыва позволяют создать установки нового поколения. Химические превращения в таких установках мы предлагаем проводить в процессах, сочетающих распространение ударной волны и следующей за ударной волной зоной дефлаграции (такие комплексы могут реализовываться и в виде низкоскоростных режимов детонации), а процесс разгона дисперсных материалов — в основном, за счет газодинамических процессов расширения продуктов сгорания. Теоретическое обоснование возможности стационарного распространения комплекса, состоящего из ударной волны и зоны дефлаграции, для различных условий было сделано еще в прошлом веке в работах Я. Б. Зельдовича, Г. М. Бам-Зеликовича, К. П. Станюковича [2] и Р. И. Солоухина [3]. В последнее время возможность устойчивого формирования квазистационарного комплекса, состоящего из ударной волны и зоны дефлаграции, была продемонстрирована экспериментально [4]. Скорость распространения полученных комплексов составляет от 0,5 до 0,7 от скорости

детонации Чепмена–Жуге. Весьма важным является то обстоятельство, что низкая скорость распространения комплекса в этом случае не связана с увеличением потерь энергии, выделяющейся в ходе химических реакций во внешнюю среду.

Представляется перспективным исследовать комплекс процессов, при котором в технологических установках реализуется процесс, промежуточный между процессом диффузионного сгорания, как в газопламенных установках, и сгорания в нормальной детонационной волне, как в существующих детонационных установках.

Необходимо сформулировать условия и определить конструктивные параметры, при которых в установках будут устойчиво формироваться режимы протекания химических реакций в комплексе ударная волна и следующая за ней зона дефлаграции и исследовать технологические возможности установок нового типа, сравнить характеристики рабочей среды, образующейся в ходе предлагаемой системы процессов и в случае возникновения нормальной детонационной волны.

Использование комбинации «ударная волна – зона дефлаграции» в технологических установках, использующих энергию сгорания широко используемых горючих газов (пропан, ацетилен), позволит не только сохранить лучшие качества установок предыдущих поколений, но и повысить их характеристики, так как

- энергия продуктов сгорания будет использоваться более эффективно для разгона материалов покрытия, а потери скорости частиц, связанные с торможением в волне Тейлора, следующей за волной детонации, уменьшатся;
- температура и давление рабочего тела при разгоне в ходе газодинамических процессов увеличатся и, следовательно, увеличится коэффициент использования материалов;
- интенсивность акустических волн, характерных для детонационных установок, уменьшится;
- уровень теплового воздействия продуктов сгорания на материал подложки, характерный для газопламенных установок, снизится.

А. А. Борисов, Г. И. Скачков, К. Я. Трошин

### **О влиянии добавок водорода на воспламенение и горение углеводородов**

Мы считаем, что горение углеводородных топлив в области концентрационных пределов изучено недостаточно глубоко. Главным образом, это объясняется тем, что горение таких смесей сопровождается незначительным выделением тепла и низкими скоростями процесса. Однако в современных условиях возникает ряд проблем, требующих более детального исследования этих явлений.

Воспламенение и горение алканов в области нижнего и верхнего концентрационных пределов в большой степени определяется кинетикой их окисления. В силу того, что температура пламени в таких условиях невелика, предпламенные кинетические процессы протекают при относительно низких температурах, для которых характерны стадийные воспламенения, холодные пламена и области отрицательного температурного коэффициента. Кинетика таких процессов изучена недостаточно.

Хорошо известно, что повышение начального давления существенно влияет на расширение верхнего концентрационного предела воспламенения алканов. Это объясняется тем, что в предпламенную зону идет активная диффузия водорода, образующегося в продуктах сгорания.

Наши экспериментальные исследования, проведенные в последние десятилетия, показывают, что добавки водорода в богатых смесях метана и кислорода существенно влияют на кинетику образования продуктов сгорания.

Введение добавок водорода может привести к полному подавлению сажеобразования. Это показывает, что диффузия водорода в предпламенную зону из продуктов сгорания не равнозначна введению добавок водорода в заранее приготовленную смесь, поскольку в последнем случае водород уже находится в предпламенной зоне, а не диффундирует в нее из области продуктов сгорания.

Остается непонятным, каким образом присутствие водорода в предпламенной области приводит к подавлению сажеобразования. Эта проблема остается серьезной фундаментальной задачей в науке о горении.

В бедных смесях в продуктах сгорания водород не образуется, и влияние начального давления на нижний концентрационный предел очень невелико.

В последние годы возрос интерес к влиянию добавок водорода на горение алканов вблизи нижних концентрационных пределов. Это связано, прежде всего, с практической задачей — интенсификации горения бедных смесей углеводородного топлива за счет добавок водорода, что может привести к снижению таких вредных выбросов, как оксиды азота и оксид углерода.

Чтобы ответить на вопрос, как повлияют добавки водорода на воспламенение и горение алканов в условиях температур, лежащих вне полуострова воспламенения водорода, необходимо иметь детальные кинетические механизмы окисления каждого из компонентов топлива и их взаимодействия в этом процессе. К сожалению, существующие детальные кинетические механизмы окисления алканов чрезвычайно громоздки и, что самое главное, не всегда адекватно описывают окисление алканов в тех или иных условиях, поэтому ответить на поставленный вопрос с позиции существующих кинетических моделей не представляется возможным. Необходимо иметь четкое представление о кинетике стадийного окисления алканов, механизме отрицательного температурного коэффициента и о роли водорода в этих механизмах.

Единственно возможным путем получить ответ на поставленный вопрос является экспериментальное установление закономерностей воспламенения и горения смесей алканов с водородом в воздухе в условиях, близких к верхним и нижним концентрационным пределам. Кроме того, дополнительная экспериментальная информация, полученная для таких условий, может подсказать пути, ведущие к пониманию сложных кинетических процессов окисления алканов в смесях с водородом в низкотемпературной области воспламенения.

Проведенные нами эксперименты дали весьма неожиданный результат. Оказалось, что в области нижнего и верхнего концентрационных пределов добавки водорода ингибируют воспламенение и горение алканов. Ответить на вопрос, в чем причина такого эффекта, в настоящий момент достаточно сложно. Мы предложили лишь некоторую гипотезу, которая в той или иной степени объясняет этот эффект. Однако дальнейшие исследования и дополнитель-



ная экспериментальная информация могут привести к иным объяснениям.

На наш взгляд, указанные проблемы влияния добавок водорода на закономерности воспламенения и горения алканов в области концентрационных пределов являются фундаментальными вопросами теории и практики науки о горении и взрыве.

**П. А. Власов**

### **Что мы знаем и что пока не знаем о механизме образования частиц сажи?**

Наши экспериментальные исследования процесса сажеобразования при пиролизе ряда ароматических и алифатических углеводородов и сравнение результатов экспериментов с результатами детальных кинетических расчетов образования частиц сажи показали, что для ароматических углеводородов (бензол, толуол и этилбензол) и алифатических углеводородов без кратных углерод-углеродных связей (метан, пропан) в целом наблюдается хорошее согласие результатов кинетических расчетов и экспериментов по выходу сажи и температуре реакционной смеси.

Ситуация изменилась, когда мы перешли к исследованию процесса сажеобразования при пиролизе ацетилена и этилена, алифатических углеводородов с кратными связями. Для этих углеводородов экспериментально измеряемая температура достижения максимума выхода частиц сажи гораздо выше (на  $\sim 200\text{--}300\text{ K}$ ), чем расчетная температура. Поскольку в случае кратных углерод-углеродных связей легче оторвать атом или молекулу водорода от углеродного каркаса, чем разорвать кратную углерод-углеродную связь, то в случае пиролиза  $\text{C}_2\text{H}_2$  и  $\text{C}_2\text{H}_4$  в газовой фазе будут образовываться углеводородные фрагменты только с четным числом атомов углерода. В случае алифатических углеводородов с одинарными углерод-углеродными связями сила связи углерод-водород превышает силу связи углерод-углерод и при пиролизе таких углеводородов в газовой фазе будут присутствовать углеводородные фрагменты как с четным, так и с нечетным числом атомов углерода.

Ситуация меняется, если в реагирующей системе присутствует кислород. В этом случае могут образовываться весьма прочные

связи углерод–кислород и прочный углеродный каркас исходного углеводорода начинает разрушаться с образованием фрагментов как с четным, так и с нечетным числом атомов углерода.

По нашему мнению, проблема заключается в кинетическом описании процессов образования зародышей частиц сажи из газофазных компонентов. В системах, в которых при пиролизе и окислительном пиролизе возможно образование достаточно высоких концентраций радикалов  $C_3H_3$ , наблюдается хорошее согласие результатов экспериментов и кинетических расчетов, а в системах, в которых при пиролизе образуются только фрагменты с четным числом атомов углерода, наблюдается максимальное расхождение результатов расчетов и экспериментов.

Экспериментально показано, что в процессах горения образуются не только частицы сажи, но также и фуллерены и углеродные нанотрубки.

Весьма важными аспектами проблемы образования углеродных частиц новой фазы является влияние заряженных частиц (электронов, положительных и отрицательных ионов) и внешнего электрического поля на процессы образования частиц новой фазы.

Очень важной проблемой остается выяснение роли атомов и молекул водорода в процессе зарождения и поверхностного роста частиц сажи. В широко распространенной модели H-abstraction-acetylene-addition (НАСА) именно атомы водорода необходимы для активации поверхности частицы сажи для ее дальнейшего поверхностного роста. Однако при пиролизе в ударной трубе  $C_3O_2$  ( $OC=C=CO$ ), когда в газовой фазе образуется пересыщенный пар атомов углерода и различных фрагментов термического распада  $C_3O_2$ , наблюдаются процессы образования углеродных частиц, аналогичные процессам сажеобразования при пиролизе углеводородов.

Возникает естественный вопрос: а что тогда активирует поверхность углеродных частиц в случае пиролиза  $C_3O_2$ ? С уверенностью можно сказать, что это точно не атомы водорода. В этой связи возникает вопрос о том, а нужно ли активировать чем-либо поверхность частицы для продолжения поверхностного роста.

Проблема кинетического описания поверхностного роста частиц углерода и сажи также остается весьма актуальной и должна быть в центре внимания будущих исследований этих процессов.

**Ю. В. Фролов**

**Наноконпоненты в энергетических конденсированных системах**

В последнее время в России и за рубежом активно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки в области получения и использования наноразмерных материалов в качестве компонентов энергетических конденсированных систем (ЭКС). Прогнозируется, что введение таких наноразмерных компонентов в ЭКС позволит расширить пределы регулирования скорости их горения, повысить эффективность работы двигательных установок в результате снижения химических и двухфазных потерь, увеличить работоспособность взрывчатых веществ и пиротехнических изделий, а также эффективность использования ЭКС в промышленных процессах (металлургия, горнодобывающая промышленность, СВС-процессы).

С одной стороны, влияние наноразмерных компонентов на свойства ЭКС пропорционально величине их удельной поверхности или общему изменению структуры ЭКС, т. е. определяется физическим фактором. Например, введение порошков алюминия марки ALEX (15%–20%) в ЭКС приводит обычно к 2–3-кратному росту скорости горения.

С другой стороны, известно, что наночастицы малого размера (10–15 нм, хотя бы в одном направлении) обладают высокой химической активностью. В нанобъектах с уменьшением их размера возрастает реакционная способность, падает температура плавления, изменяется температура полиморфных превращений, снижается температура начала разложения, а кинетика реакций может отличаться от «обычной» классической. Таким образом, при введении в ЭКС наноразмерных порошков металлов или катализаторов наряду с физическим фактором (удельная поверхность) может действовать кинетический (химический) фактор. Их совместное действие (особенно в катализе) будет приводить к усиленному эффекту (например, увеличению скорости горения ЭКС в 7–10 раз).

По моему мнению, при работе с нанобъектами целесообразно исследовать необходимость, возможность и преимущества использования как физического, так и кинетического факторов нанодисперсности.

С. В. Чуйко

### **Что и зачем нужно сегодня исследовать в процессах горения и взрыва?**

В области горения твердых топлив (весь дальнейший текст только об этом), уверен, *налицо глобальный кризис идей*, вызванный нарушением процесса постановки практикой интересующих ее реальных задач нашей науке, поскольку практика не может делить свои скромные финансовые возможности с наукой. Кроме того, практически иссяк поток новых соединений — прорывных компонентов топлив; новые структуры легко не получают, их синтез весьма сложный и потому затратный. Эта часть от нас не зависит.

Попытки взбодриться многократным повторением заклинания «нано, нано!!!» — лишь ритуал модернизации словаря модных лозунгов, главная цель которого — выбить фонды. Не было и нет ответа на вопрос: «Ради чего нужны бешеные затраты на нанокomпоненты, какие задачи, в принципе не решаемые нынешней практикой, можно будет решить?» С одной стороны, есть пустопорожние обещания вселенского «шоколада» для науки и практики в неопределенном будущем, а с другой — нет реальных достойных упоминания результатов: масштаб достижений действительно на уровне «нано».

Новые аппаратурные возможности модернизации методик исследований в области процессов горения твердых топлив вселяют умеренный оптимизм и надежду на выявление новых фундаментальных фактов, важных для сути процессов. Однако и с новым «железом» без существенно новых идей мы будем «красиво» топтаться на месте. К сожалению, пока что в массовом порядке «открывают» пройденное 30, а то и 50 лет назад. Замечательным исключением является пересмотр Б. В. Новожиловым и В. Н. Маршаковым (журнал «Химическая физика») теории нестационарных процессов при горении топлив. Есть и другие примеры полезной обработки старых данных с использованием новых подходов (Г. Я. Павловец и др.). Возможно, идет заполнение временной паузы перед принципиальным рывком в теории и практике твердых топлив. Будем надеяться!

А. А. Сулимов, Б. С. Ермолаев

### **Управляемое конвективное горение пористых энергетических материалов**

Нам хотелось бы обратить внимание на проблему, которая связана с разработкой научных основ управления процессом конвективного горения высокоплотных пороховых зарядов и обоснованием возможности создания эффективных блочных зарядов для ствольных систем. Конвективное горение охватывает диапазон скоростей горения пороха от нескольких метров в секунду до нескольких сотен метров в секунду, который представляет интерес для ряда технических приложений, однако склонность к ускорению и опасность перехода горения во взрыв являются, казалось бы, почти непреодолимым препятствием. Однако, изучая способы затормозить самоускоренное развитие конвективного горения, нам удалось показать, что если на поверхность дисперсного энергетического материала нанести тонкую полимерную пленку и затем спрессовать материал в блочный заряд с пористостью 5%–10%, то это не только стабилизирует горение, но и дает возможность регулировать его характеристики, варьируя содержание покрытия, размер зерна и пористость заряда. Разработка инструментов, позволяющих подбирать нужную скорость горения в зависимости от давления и обеспечивать полное сгорание образующейся дисперсной взвеси, является основой для плодотворного применения конвективного горения в таких областях, как импульсные ракетные двигатели и газогенераторы, ствольные метательные устройства и пр. Чтобы реализовать этот потенциал, необходимо продолжить фундаментальные исследования механизмов и закономерностей конвективного горения блочных зарядов, собрать представительную базу данных характеристик горения для различных условий, близких к возможным условиям применения, разработать предсказательные модели.

Большой интерес представляет нетрадиционная схема выстрела с присоединенным зарядом, когда бронированный по боковой поверхности, кроме воспламеняемого торца, вкладной блок приклеивается к метаемому телу и движется вместе с ним по стволу. В этом случае можно получить прирост дульной скорости за счет ряда дополнительных физических факторов, прежде всего за счет

реактивной тяги и увеличения давления на дно снаряда благодаря перераспределению давления в заснарядном пространстве. Расчеты предсказывают значительный прирост дульной скорости (до 25% и выше), особенно в случае высокоскоростного метания. Однако экспериментальные работы, проведенные различными группами исследователей в разных странах, оказались малопродуктивными. Нам удалось продвинуться в этом направлении, используя в качестве присоединенного заряда пористые блоки из пироксилиновых порохов мелких марок, и получить в 23-миллиметровой баллистической установке прирост дульной скорости на уровне 12%. Ключевой трудностью в данной проблеме является компоновка и выбор пороха для присоединенного заряда, который должен гореть с очень высокой и воспроизводимой скоростью при экстремальных нагрузках, необычных для классического порохового заряда. Горение должно начаться вблизи максимума диаграммы давления (при 300–500 МПа) и продолжаться во время движения вместе со снарядом при спаде давления, желательно с возрастающей скоростью. Это вводит во внутреннюю баллистику концепцию управляемого горения и существенно отличается от привычной классической схемы, в которой пороховой заряд полностью охвачен горением еще на начальной стадии выстрела, при низких давлениях. Для успеха требуется планомерное изучение закономерностей горения пороха, предлагаемого в качестве присоединенного заряда, в условиях, близких к реальным. Фактически основным инструментом исследований является теоретическая обработка результатов выстрела в модельных ствольных устройствах.

### Литература

1. Коробов Ю.С. Термическое напыление. Современное состояние // Мат-лы междунар. научно-практического семинара. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2010. С. 4.
2. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. — М.: Наука, 1971. С. 442.
3. Soloukhin, R. I. 1974. Ignition and detonation processes in interaction of shock waves with perforated plates. *Acta Astronautica* 1:249.
4. Хомик С.В., Медведев С.П., Гельфанд Б.Е. Иницирование взрывных процессов в водородосодержащих газовых смесях многоструйным потоком продуктов детонации // ФГВ, 2010. Т. 46. № 10.