

УДК 546:621.9.048.4:662.61

РАЗВИТИЕ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Харламов Ю.А.

DEVELOPMENT OF GASEOUS DETONATION TECHNOLOGIES

Kharlamov Y.A.

Рассмотрены особенности газовой детонации как источника энергии. Систематизированы и проанализированы основные области практического применения газовой детонации в промышленности, на транспорте и в энергетике. Показано, что более высокая эффективность сгорания топлива в детонационном режиме обуславливает перспективность расширения сфер применения газовой детонации.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, газовая детонация, детонационная волна, двигатель, напыление, устройство, энергетическая установка.

Введение. Взрывчатые вещества (ВВ), кроме применения в военных целях и в добывающей промышленности, используют для выполнения различных технологических операций в машиностроении и других отраслях. Применение взрывных технологий позволяет в короткие сроки с приемлемыми затратами решать многие технологические проблемы, в том числе возникающие при создании новой техники. Развитие взрывных технологий продолжается и в настоящее время.

Постановка проблемы. Для реализации взрывных технологий используются заряды твердых ВВ и изделия из них (например, удлиненные кумулятивные заряды, кумулятивные перфораторы), системы их инициирования, системы контроля безопасности и т. п. Вместе с объектами воздействия (свариваемыми пластинами, упрочняемыми деталями, заготовками для штамповки и др.), специальной оснасткой (матрицами для штамповки, контейнерами для сохранения готового изделия, основаниями и опорами) заряды ВВ и системы их инициирования образуют технологическое взрывное устройство. Очень часто технологические взрывные устройства располагаются в специальных защитных взрывостойких камерах (взрывных камерах), являющимися по сути промышленными взрывными установками [1]. Тем не менее широкое применение твердых ВВ ограничено, прежде всего,

по требованиям безопасности. Поэтому практический интерес представляет использование газовой детонации.

Анализ последних исследований и публикаций. Сейчас наблюдается «настороженное отношение неспециалистов к взрывным технологиям» [1]. Уровень давлений, температур и скоростей, развиваемых за детонационными или близкими к ним по интенсивности ударными волнами в газах, а также импульсный характер воздействия указанных факторов, определяют большие потенциальные возможности их технического и технологического использования. Многочисленные возможные приложения газовой детонации описаны в работах [1-8]. Частота повторения циклов газовой детонации достигает 10, а в отдельных случаях – до 100 Гц.

Цель статьи. Для дальнейшего развития и разработки новых способов и устройств, основанных на использовании газовой детонации, необходимо систематизировать и классифицировать детонационно-газовые технологии и устройства и сферы их применения.

Газовая детонация

Детонационная волна (ДВ) в газовой смеси представляет собой многофронтный газодинамический комплекс [8-11]. Движение поперечных волн в стационарно распространяющейся ДВ носит квазипериодический характер, а их траектории образуют упорядоченную структуру с характерным поперечным масштабом, называемым размером ячейки a . С использованием размера ячейки определяются минимальные размеры канала, в котором может распространяться детонация, критическая энергия инициирования детонации, скорость и размеры быстролетящего тела, необходимые для возбуждения детонационного режима сгорания смеси и т. д. Несмотря на многофронтный характер реальной ДВ, при теоретическом рассмотрении осредненных

характеристик процесса широко используются идеализированные классические представления о ДВ.

Идеальная детонационная волна в химически реагирующих газовых смесях представляет собой комплекс из ударной волны (УВ) и примыкающей к ней волны горения. Воспламенение смеси и основное тепловыделение происходят, как правило, в адиабатических условиях, хотя формирование волны в целом идет за счет процессов переноса. Согласно модели Зельдовича — Неймана — Дёринга [12] непосредственно к УВ примыкает зона индукции — область изотермической цепной реакции с приблизительно постоянными температурой T и давлением p (пик Неймана). В пике Неймана температура и плотность ρ в несколько раз, а давление — в десятки раз превышают значения перед УВ [13]. За зоной индукции следует зона основного тепловыделения, в которой температура повышается с 1500...2000 до 3000...4500 К, давление уменьшается вдвое, а плотность снижается до величины $(1,7...1,9)\rho_0$.

В *зоне индукции* многоатомные молекулы топлива, если таковые имеются, разлагаются с выделением или поглощением тепла, затем в быстрых реакциях обмена (в основном, между одно- и двухатомными молекулами) экспоненциально накапливаются активные центры. Качественно в конце зоны индукции реакции обмена становятся квазиравновесными, а концентрация активных центров — максимальной по порядку величины, сравнимой с концентрацией исходных реагентов.

В *зоне основного тепловыделения* реакции обмена квазиравновесны. Тепло выделяется в тримолекулярных реакциях рекомбинации, скорости которых пропорциональны кубу плотности и слабо зависят от температуры. Для углеводородных горючих при отсутствии свободного углерода в продуктах детонации (ПД) тепловые эффекты всех основных реакций рекомбинации близки друг к другу $((110 \pm 10)$ ккал/моль), все реакции рекомбинации приводят к одинаковому уменьшению числа частиц. Поэтому суммарный тепловой эффект приблизительно пропорционален изменению суммарной массовой концентрации молекул — величине, обратной средней молекулярной массе смеси μ .

За зоной основного тепловыделения следует квазиравновесное течение продуктов детонации (ПД). Идеальной детонацией Чепмена - Жуге (СЖ) называется детонация с мгновенными реакциями и условиями на звуковой поверхности: химическая равновесность ПД и $u = a_e$, где u — скорость газа и a_e — равновесная скорость звука. Скорость детонации, температура и отнесенные к начальным значениям давление и плотность ПД слабо зависят от начальной температуры смеси и изменения начальной плотности на два-три порядка, а размер ячейки приблизительно обратно пропорционален

начальному давлению и чувствителен к неидеальности газа [13].

Детонационные волны при $D > D_{СЖ}$ и $p > p_{СЖ}$ называются *пересжатыми*. Они возбуждаются под воздействием волн сжатия, догоняющих фронт, и без их «поддержки» быстро замедляются. Даже небольшоепересжатие волны (по скорости детонации) приводит к резкому увеличению давления, плотности и массовой скорости газа [13], а в реальной многофронтной ДВ — к резкому уменьшению размера ячейки. При значительном пересжатии из-за процессов диссоциации реакция становится эндотермической, вследствие чего фронт УВ становится устойчивым, а ячеистая структура исчезает.

При уменьшении диаметра трубы из-за больших теплопотерь и при некотором предельном диаметре звуковая скорость газа становится недостижимой ни при каких значениях D . Количественно этот диаметр близок к предельному диаметру реальной детонации, который приблизительно на порядок меньше размера ячейки многофронтной детонации [14-16]. Дефицит скорости предельной детонации зависит от состава смеси и может равняться 10...30 %. Отметим, что вблизи пределов влияние затухания турбулентности и влияние теплопотерь сравниваются, и численные модели, учитывающие оба фактора [14] и только взаимодействие ПД со стенками канала [17,18], дают приблизительно одинаковые результаты.

Аналитически существование и основные свойства предельной детонации были предсказаны Я. Б. Зельдовичем [12]. Полагая, что трение и теплоотвод влияют на процесс одинаково, он ограничился рассмотрением только теплоотвода. С помощью предположения об экспоненциальной зависимости скорости химического тепловыделения от температуры и условия роста температуры за УВ им было получено ограничение на мощность теплоотвода и дана оценка длины зоны реакции, экспоненциально зависящей от температуры, непосредственно за фронтом УВ. Была установлена двузначная подковообразная зависимость скорости детонации от диаметра трубы, и близко к реальности оценен дефицит скорости детонации. Но анализ показывает, что влияние трения и влияние теплоотвода на градиент температуры газа за УВ противоположны по знаку, причем температура за УВ под совместным воздействием трения и теплоотвода всегда растет [14]. Тем не менее модель [12] дает правильные результаты.

Понятие минимального размера канала, в котором может распространяться детонация, как характеристики смеси при фиксированных начальных условиях несколько условно. Потери энергии на трение и теплоотвод зависят от формы канала и шероховатости его стенок. Правильнее было бы говорить о предельном значении отношения гидравлического диаметра канала к коэффициенту сопротивления. Следует различать

шероховатость стенки и систему отдельных препятствий, соизмеримых с размером ячейки многофронтной детонации. Последние, благодаря турбулизации потока и локальному повышению температуры в отраженных волнах, могут не препятствовать, а, наоборот, способствовать распространению детонации. Также некорректно говорить о концентрационных пределах детонации. Любая смесь с экзотермической реакцией способна детонировать в каналах достаточно большого размера (принцип Харитона [19]) при достаточно большой энергии инициирования.

В реальности предельной может быть спиновая, галопирующая или низкоскоростная детонация.

Термодинамически детонация - самый эффективный способ прямого сжигания горючего. Именно поэтому в настоящее время активно разрабатываются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию управляемой детонации в энергетических установках, технологических горелках и других устройствах и технологиях. При успешном решении проблемы циклической детонации воздушных смесей обычных топлив (природный или попутный газ, угольные частицы, мазут и др.) ожидается значительная экономия горючего вследствие более высокой термодинамической эффективности детонационного горения и низкого выхода вредных веществ (ввиду очень малой продолжительности детонационного цикла) [5].

Энергетика и двигателестроение

Совершенствование современных авиационных двигателей и энергетических машин традиционных схем подошло к своему технологическому пределу. Тяга воздушно-реактивного двигателя выше, чем выше давление в камере сгорания и температура соответственно. Давление в камере сгорания можно увеличить, подняв температуру горения, а также подавая окислитель под возможно большим давлением. Это ведет к необходимости использования все более дорогостоящих жаростойких материалов, а также к увеличению массы и стоимости компрессоров. Другой способ увеличения давления в камере сгорания – увеличение скорости сгорания смеси. По своей термодинамической эффективности наиболее привлекательным режимом быстрого горения является детонация. Поэтому одним из основных прорывных направлений является разработка непрерывно-детонационных и ротационно-детонационных двигателей.

Силовые установки летательных аппаратов (ЛА). Вопрос об использовании детонационного горения в реактивных двигателях впервые поставлен Я. Б. Зельдовичем еще в 1940 г. [20,21]. По его оценкам прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД), использующие детонационное сгорание топлива, должны иметь максимально возможную термодинамическую эффективность. По

сравнению с ПВРД на обычном горении двигатель на детонации в идеале обеспечит топливную экономичность до 30% при числе Маха полета 2,5 и до 20% при числе Маха 3, что позволит значительно увеличить дальность полета аппарата с таким двигателем или заменить значительную часть топлива на полезную нагрузку. Другое принципиальное отличие детонационного ПВРД от ПВРД на обычном горении – его способность создавать реактивную тягу при низких скоростях полета вплоть до самостоятельного старта без разгонных устройств.

Одна из возможных схем организации детонационного цикла в сверхзвуковом летательном аппарате включает диффузор, механический клапан, связку детонационных труб и общее сопло. Трубы периодически заполняются топливно-воздушной смесью. Смесь периодически сгорает в бегущих детонационных волнах, а горячие продукты детонации выбрасываются с высокой скоростью в окружающее пространство через сопло, создавая реактивную тягу [20].

Существуют аналогичные схемы организации детонационного цикла без механических клапанов, т. е. в конструкции двигателя вообще отсутствуют подвижные элементы. Конструктивно такой двигатель – импульсный детонационный двигатель (ИДД) – прост, а его тягу можно практически неограниченно увеличивать, повышая количество детонационных труб. Кроме того, изменяя подачу топлива в трубы можно управлять вектором тяги без применения поворотных рулей.

Импульсные детонационные двигатели весьма привлекательны и по своим потенциальным тяговым характеристикам: они перекрывают широкий диапазон скоростей полета от 0 до числа Маха 4 – 5, обеспечивая почти постоянный удельный импульс по топливу на уровне 2000 – 2500 сек при работе на углеводородном горючем. При числе Маха полета выше 3 импульсный детонационный двигатель становится эффективнее не только ПВРД, но и турбореактивного двигателя [20].

Основные приложения таких двигателей – дешевые средства доставки боеприпасов, силовые установки для самолетов-мишеней и беспилотных летательных аппаратов, а также крылатых ракет. В перспективе они могут использоваться и для форсирования тяги пилотируемых летательных аппаратов.

Для создания ИДД нет фундаментальных ограничений, однако есть эксплуатационные: чтобы успешно конкурировать с существующими аналогами такой двигатель должен работать на штатном авиационном керосине без активных добавок, использовать минимальную энергию зажигания детонации, быть компактным и легким. Однако, для инициирования детонации керосино-воздушной смеси в трубе с помощью известных классических способов требуются либо огромные энергии зажигания, либо очень длинные трубы, что

неприемлемо для силовых установок летательных аппаратов. Поэтому решается фундаментальная задача – найти новые способы инициирования детонации, которые позволят значительно уменьшить энергию инициирования детонации, значительно сократить длину и время перехода горения в детонацию. Сейчас удается получить периодическую детонацию керосино-воздушной смеси на длине 1,5 м при зажигании обычной автомобильной искрой. Энергия зажигания детонации понизилась более чем в 10000 раз, одновременно длина трубы уменьшилась более чем в 10 раз.

Потенциальные преимущества термодинамического цикла детонационных двигателей вызвали огромное множество исследовательских работ в этом направлении. Ведущие позиции по разработке детонационных двигателей занимает специализированный центр SeattleAerosciencesCenter (SAC), выкупленный в 2001 г. компанией PrattandWhitney у фирмы AdroitSystems. Большая часть работ центра финансируется BBC и NASA из бюджета межведомственной программы IntegratedHighPayoffRocketPropulsionTechnologyProgram (IHPRPTP), направленной на создание новых технологий для реактивных двигателей различных типов. Кроме компании PrattandWhitney в работах принимают участие Исследовательский центр UnitedTechnologiesResearchCenter (UTRC) и фирма BoeingPhantomWorks.

Проекты по детонационному горению в США включены в программу разработок перспективных двигателей ИРТЕТ [22]. В кооперацию входят практически все исследовательские центры, работающие в области двигателестроения, многие научные центры и университеты: ASI, NPS, NRL, APRI, MURI, Stanford, USAF RL, NASA Glenn, DARPA-GE C&RD, CombustionDynamicsLtd, DefenseResearchEstablishments, SuffieldandValcartier, UniversityofPoitiers, UniversityofTexasatArlington, McGillUniversity, PennsylvaniaStateUniversity, PrincetonUniversity.

Большой объем работы по клапанным детонационным двигателям выполнен в Институте химической физики РАН (ИХФ)[23]. В России над этой проблемой работают следующие университеты и институты Российской Академии наук (РАН): ЦИАМ им. П.И. Баранова, ИХФ, Институтмашинovedения РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Новосибирский институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева (ИГиЛ), ИТТИМ им. С.А. Христиановича, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, МГУ, Московский государственный авиационный институт, Новосибирский государственный университет, Чебоксарский государственный университет, Саратовский государственный университет и др.

В зависимости от скорости распространения детонационной волны в системе координат, связанной с двигателем, различают стационарную детонацию (stationarydetonation), ротационную детонацию (rotatingdetonation), когда детонация является стационарной во вращающейся системе координат, нестационарную детонацию (transientdetonation) и пульсирующую детонацию (pulsatingdetonation). Соответственно, могут быть созданы детонационные двигатели с непрерывной детонацией (CDE), ротационно-детонационные двигатели (RDE) и импульсно-детонационные двигатели (PDE) [3,22,23].

Основными направлениями развития детонационных двигателей по данным многочисленных публикаций являются:

1. Классический клапанный импульсный детонационный двигатель.

2. Многотрубный PDE. В таких двигателях частота работы отдельной трубы остается низкой, но за счет чередования импульсов в разных трубах пытаются получить приемлемые удельные характеристики.

3. PDE с высокочастотным резонатором, предварительно активированная топливная смесь подается в резонатор, в котором происходит фокусировка волн сжатия с образованием перешагнутой детонационной волны.

4. Детонационный ЖРД с вытеснительной подачей топлива.

5. Организация детонационного горения в стационарной системе ударных волн (CDE) или в периодически перемещающейся ударной волне (CPDE).

6. Ротационный детонационный двигатель Николса.

7. Ротационный двигатель Б.В. Войцеховского.

Энергетические установки на детонации природного газа. Эксплуатационные требования по весу, геометрическим размерам и рабочей частоте ИДД относятся, главным образом, к силовым установкам ЛА. Для стационарных же энергетических установок эти требования не являются определяющими и, следовательно, технологический прорыв в этом направлении следует ожидать в ближайшее время. Наиболее привлекательное направление работ – организация циклической детонации смесей природного газа с воздухом. В настоящее время в ИХФ РАН и МИФИ (ГУ) активно ведутся работы по организации импульсного детонационного сжигания природного газа с использованием новых комбинированных средств инициирования детонации. Успех на этом пути сулит существенную экономию природного газа и позволит значительно повысить эффективность работы энергетического оборудования, в частности, силовых установок газоперекачивающих агрегатов (ГПА) для магистральных газопроводов. Последнее приложение особенно важно ввиду острой

необходимости снижения собственного потребления природного газа газотранспортными компаниями. Разумеется, замена жаровых труб в газотурбинных установках ГПА на детонационные потребует дополнительных вложений (разработка устройств, сглаживающих импульсные ударные нагрузки на элементы турбин, и др.), однако экономический эффект, ожидаемый от новой технологии, несомненно, перекроет все сопутствующие затраты [20].

Силовые установки надводных и подводных аппаратов и транспортных средств различного назначения.

Предложен способ создания гидрореактивной тяги путем периодического вытеснения забортной воды из водовода под действием расширяющихся продуктов детонации горючей смеси, в котором забортная вода, поступающая в проточный водовод, барботируется газом с образованием сжимаемой двухфазной пузырьковой среды, а при взаимодействии детонационной волны с пузырьковой средой в эту среду проникает ударная волна, вовлекающая ее в движение, так что вытеснение среды через выходное сечение водовода вызвано не только действием расширяющихся продуктов детонации горючей смеси, но и действием ударной волны. Соответствующий водометный импульсный детонационный двигатель представляет собой водовод (профилированную трубу с водозаборным устройством и соплом, погруженную в воду) с введенной в него импульсно-детонационной трубкой. Импульсно-детонационная трубка предназначена для генерации коротких, но очень интенсивных периодических импульсов давления в виде ударных волн, выходящих в водовод и выбрасывающих забортную воду из водовода через сопло. Двигатель может содержать несколько камер сгорания, причем в каждой камере сгорания установлены источники зажигания и форсунки подачи топлива, окислителя и продувочного газа, а на выходе из камер сгорания последовательно установлены ускоритель пламени, детонационная труба с выпускными окнами, оборудованными клапаном, причем каждая детонационная труба присоединена к проточному водоводу, снабженному общим водозаборником, а также аэраторами и/или кавитаторами. Преимущества импульсно-детонационного горения обеспечивают минимальные потери динамического напора воды, обусловленного движением надводного или подводного аппарата [24,25].

Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Известны методы прямого и непрямого (машинного) преобразования тепловой энергии в электрическую. Высокую эффективность прямого преобразования тепловой энергии способны обеспечить магнитогидродинамические генераторы (МГД-генераторы). Для ионизации продуктов сгорания необходимо поддерживать температуру на уровне 10 000 К, при использовании

легкоионизирующих присадок температура может быть снижена в 4-4,5 раза. Перспективным является использование детонационного МГД-генератора со сверхвысокой скоростью высвобождения химической энергии. В детонационном цикле температура продуктов сгорания составляет 4 000 К и более, а скорость их движения является сверхзвуковой. Мощность, приходящаяся на единицу объема детонационной камеры (удельная мощность), на 2 порядка выше, чем камеры ракетного двигателя. Исследованиями детонационных систем занимаются в корпорациях GeneralElectric, Boeing, в исследовательских центрах NASA, BBC США, в компаниях AerojetRocketdyne, Pratt&Whitney и др. В ближайшие годы на крейсерах ВМС США планируется замена газотурбинных электрогенераторов на детонационные установки [26]. В [27] запатентованы способ прямого преобразования энергии импульсного детонационного сгорания топлива в электрическую энергию и генератор переменного тока для его реализации,

В детонационных газотурбогенераторах для производства электроэнергии используется турбина. Поскольку в стационарных установках высокая частота детонационных импульсов не входит в число обязательных требований, детонационная камера может быть выполнена в форме спирали, что делает ее более компактной. В спиральной камере легче обеспечить переход от дефлаграционного режима сжигания топливной смеси к детонационному. Также возможно использовать многокамерную детонационную установку с интегрированным эжекторным соплом [26]. Введение в конструкцию детонационного газотурбогенератора эжектора позволяет уменьшить вредное воздействие пульсирующего потока продуктов детонации на элементы турбины и ослабить параметры детонационной волны. Инжектирование воды в ДК и эжектирование воздуха в сопле дает прибавку к массе и увеличивает импульс истекающей реактивной струи, снижает температуру газов перед турбиной и демпфирует ударную волну. В [28] предложено использовать подводную турбину.

Другие энергосберегающие технологии импульсно-детонационного горения. Особенности импульсного детонационного горения можно использовать для многих других приложений. Например, в импульсных горелках, совмещающих ударное воздействие с воздействием высокоскоростной струей горячих продуктов детонации. Указанные выше факторы (импульсное ударное и конвективно-тепловое воздействие) будут в перспективе использоваться для дробления и газификации тяжелых фракций нефти и угля, а также бытовых и промышленных отходов, для дробления горных пород и льда и т. д. Ведутся работы по применению импульсной детонации природного газа для сжигания промышленных и

бытовых отходов, созданию импульсных детонационных горелок на природном газе для водонагревательных котлов тепловых электростанций [20].

Синтез и производство материалов

Удельные энергозатраты при детонационной обработке материалов заведомо ниже, чем, например, при плазменной; низкий уровень теплопотерь дает определенные преимущества и при сопоставлении с другими методами воздействия. Высокая концентрация энергии и возможность резко сбросить температуру и давление газа через заданный промежуток времени – дополнительные плюсы ударно-детонационных технологий синтеза и обработки материалов. Использование в технологиях обработки и получения материалов детонации конденсированных ВВ (тротил, гексоген и т.п.) осуществляется достаточно широко [1], исследования в этом направлении с целью достижения химических и фазовых превращений, а также повышения дисперсности получаемых продуктов продолжаются и дают обнадеживающие результаты [1].

Однако, проведение превращений с помощью газовой детонации, более предпочтительно: проще решается проблема производительности оборудования; параметры газовой детонации значительно «мягче», чем при использовании конденсированных ВВ (так, типичные давления в плоскости Чепмена-Жуге отличаются более чем на три порядка), следовательно и рабочий ресурс технологического оборудования при использовании газовых горючих смесей будет выше.

Газовая детонация перспективна для проведения химических и фазовых превращений (в том числе – изменения агрегатного состояния), а также для повышения дисперсности веществ и материалов. Ранее уже рассматривались применения для получения аморфных материалов и восстановления оксидов [2].

Детонационный синтез по способу [30] применяются для получения высокодисперсного порошка цирконат-титаната свинца (ЦТС или PZT), широко используемого для производства радиокомпонентов на основе электронной керамики. При детонационной обработке многокомпонентного раствора солей циркония, титана и свинца волна в сильно детонирующей горючей смеси распространяется по системе со взвешенными каплями раствора, поток продуктов горения ($v = 1$ км/с) распыляет их до микрокапель, при последующем испарении которых ($T = 3500$ К) образуются высокодисперсные частицы солей, разлагающихся при указанных температурах до оксидов [29].

С помощью детонации газовых смесей можно синтезировать частично стабилизированный диоксид циркония (ЧСДЦ), являющийся уникальным теплозащитным материалом конструкционной керамики, применяемым,

например, для покрытия сопел ракетных двигателей [31]. При температурном воздействии чистый диоксид циркония претерпевает обратимые фазовые превращения (участвуют три его кристаллические модификации [32]), сопровождающиеся изменением объема и, как следствие, появлением остаточных напряжений и трещинообразованием. Добавление, например, оксида иттрия расширяет область стабильности кубической кристаллографической формы ZrO_2 от точки плавления до комнатной температуры. Основным методом получения порошков ЧСДЦ является его совместное осаждение с легирующим оксидом из растворов оксихлоридов, либо распылительная сушка с последующим отжигом. Существенно, что для стабилизации кубической фазы ZrO_2 легирующий оксид должен образовывать с ним твердый раствор. При детонационном методе синтеза, добавляя стабилизатор в виде однотипного с оксидом циркония соединения в раствор, обрабатывая (как и при синтезе PZT) его взвешенные капли высокоскоростным и высокотемпературным потоком продуктов детонации, можно получить тонкодисперсный порошок твердого раствора заданного химического состава.

Получение покрытий

Детонационно-газовое напыление. Процессы и оборудование для детонационно-газового напыления остаются наиболее широко применяемой областью практического использования газовой детонации [2,4,6,7,31] и являются темой самостоятельного обзора. Однако появляются новые нетрадиционные области применения процессов напыления.

Балансировка абразивных кругов. В лаборатории наноструктурированных покрытий СамГТУ разработана высокоэффективная технология балансировки абразивных кругов на керамической связке, работающих на повышенных скоростях вращения [33-35]. Технология заключается в уравнивании абразивного инструмента путем напыления корундового покрытия на боковые стороны круга с одновременным их упрочнением. Способ позволяет управлять процессом балансировки не внося существенных изменений в традиционный технологический процесс изготовления и не увеличивая значительно себестоимость изготовления кругов. Высокая (сверхзвуковая) скорость напыляемых частиц (600...1000 м/с) и возможность высокоточного позиционирования деталей во время нанесения покрытия, позволяет осуществить балансировку вращающихся абразивных инструментов с использованием в качестве балансирующего груза порций (навесок) порошкового материала, разогреваемого и разгоняемого энергией взрыва.

Изготовление кумулятивных зарядов. Кумулятивные заряды применяют для перфорации нефте- и газодобывающих скважин [36]. С помощью

напыления получены кумулятивные перфораторы, обладающие повышенной пробивной способностью.

Осаждение покрытий из газовой фазы в потоке продуктов газовой детонации. Процесс образования нитрида титана осуществляется в стволе детонационно-газовой установки [37]. В реакторе происходит смешивание ингредиентов, их нагрев и впрыск в канал ствола детонационной установки, где происходит дальнейший нагрев, необходимый для завершения реакции синтеза, и вместе с продуктами детонации частицы нитрида титана ускоряются к напыляемому образцу. Проведенный элементный анализ на электронно-сканирующем микроскопе показал, что атомные доли титана и азота практически совпадают, что соответствует формуле нитрида титана – TiN.

Струйная обработка продуктами газовой детонации

Ранее уже рассматривалось использование газовой детонации для сверления и дробления горных пород, утилизации автомобильных покрышек с металлическим кордом и очистки технологического оборудования от пылевых отложений [38-41]. Возможно применение газовой детонации для рыхления, например, мерзлого угля и очистки вагонов, для разрушения (дробления) громоздких оболочек, в которые для этого напускается взрывчатая газовая смесь. При частичном разрушении оболочки начинается истечение ПД, и характер дробления зависит от импульса, переданного оболочке ПД до начала разрушения. Метод эффективен для относительно тонких оболочек, для которых статическое разрушающее давление много ниже детонационного. Возможна подобная детонационная переработка полимерных материалов [6,7].

Воздействовать на слой пылевых отложений можно либо непосредственно импульсной струей истекающих из ствола ПД, либо путем создания вибрации металлоконструкций, на которых есть отложения. В последнем случае важен импульс, передаваемый конструкции. Такой процесс был применен также для очистки электрофильтров от пылевых отложений в цементной промышленности [6,7,40,41].

При введении в детонационно-газовую струю абразивных частиц проводят струйно-абразивную обработку поверхностей.

При участии автора разработаны способы шаржирования поверхностей и дробления сверхтвердых материалов [2,42,43].

Обработка с помощью детонационной волны льносодержащих материалов (льносоломки) позволяет выделить до 70% технического волокна; при этом костра отделяется в виде мелкодисперсного порошка, показатели превышают нормативные требования, а удельные энергозатраты на обработку материала ниже, чем при традиционных методах и составляют 10 МДж/кг [29].

Разрушающее воздействие объемной детонации

Объемный взрыв (детонация) имеет место при образовании аэрозольной смеси летучих газообразных, жидких или твердых (порошковых взвесей) веществ с достаточно высокой калорийностью, которые воспламеняются случайно или с помощью детонаторов (в боеприпасах объемного взрыва) [44]. При этом в определенных условиях, зависящих в первую очередь от концентрации веществ в воздухе (в частности, углеводородных топлив), а также от ряда физико-химических свойств и сложных газодинамических процессов перемешивания и горения, в подобном топливно-воздушном облаке может возникнуть детонационный процесс в виде взрыва, вызывающего значительные разрушения. Основным поражающим фактором боеприпасов объемного взрыва является избыточное давление во фронте ударной волны, которое при возникновении детонации в топливно-воздушном облаке достигает в его центре около 30 кг/см^2 , а в зоне детонации за несколько десятков микросекунд развивается температура $2500\text{--}3000^\circ\text{C}$. По своим параметрам (длительность затухания внутри и вне облака) избыточное давление боеприпаса объемного взрыва превосходит давление во фронте ударной волны, создаваемой обычными ВВ. Топливо-воздушная смесь способна проникать в негерметичные объемы и формироваться по профилю рельефа местности, от поражающего воздействия боеприпасов объемного взрыва не защищают ни складки местности, ни полевые оборонительные сооружения.

Это оружие является средством поражения неукрытой и слабозащищенной живой силы, боевой техники на открытой местности, фортификационных и оборонительных сооружений, проделывания проходов в минных заграждениях, расчистки и подготовки временных площадок для десантирования и посадки вертолетов, разрушения зданий и подавления опорных пунктов при ведении уличных боев в городе, борьбы с противокорабельными ракетами и надводными кораблями, уничтожения растительности и посевов сельскохозяйственных культур и т. д.

Для решения задачи разминирования минных полей объемным взрывом используют детонационно-способную смесь в струе отработанных газов силовой установки бронетанковой техники [45-50]. Данный способ разминирования по сравнению с наиболее дешевым ручным способом обладает преимуществом по целому ряду основных показателей, таких как стоимость и производительность разминирования, степень безопасности при выполнении работ по разминированию. Например, по стоимости разминирования 1 м^2 минно-взрывного заграждения способ разминирования с применением бронетанковой техники является менее затратным в

5 раз, а по производительности превосходит ручной способ более чем в 100 раз.

Для инициирования детонации в неограниченном пространстве увеличивают интенсивность ударной волны в процессе её выхода из детонационной трубы за счет электродинамического ускорения газо-плазменного потока за фронтом волны [51].

Воздействие газовой детонации в ограниченном объеме

Посредством детонации газовых смесей возможно *повышение проницаемости* (создание разветвленной сети трещин) зоны продуктивного нефтяного пласта [29,52,53], нефтеотдача которого затруднена или полностью прекратилась из-за высокой вязкости нефти (в Беларуси по этой причине законсервировано более тысячи, т.е. около 2/3 всех скважин, при этом из недр извлечено только 25 - 30 % нефти, содержащейся в пласте).

Для восстановления дебита технологических скважин путем разрушения и диспергирования кольматирующих отложений, препятствующих притоку воды в скважины, разработан способ обработки скважин газовой детонацией, который отличается простотой, доступностью, низкой стоимостью [55].

Утилизация боеприпасов. Заряд твердого взрывчатого вещества дробят воздействием ударной волны, которую получают детонацией горючей газовой смеси, окружающей боеприпас [56].

Возбуждение упругих волн в земной коре

В сейсморазведке установки газовой детонации используют для возбуждения упругих колебаний с поверхности земли за счет взрыва газовой смеси в замкнутых, способных к расширению объемах взрывных устройств. Газовзрывная смесь заполняет цилиндр с подвижной нижней стенкой — поршнем или диафрагмой. Такой цилиндр прижимают к поверхности автомашины, на которой смонтирован источник. В заданный момент времени по команде с сейсмостанции газ поджигают и происходит его взрывообразное сгорание, при котором объем газа резко возрастает. Газ под большим давлением резко давит на поршень или мембрану и, поскольку движение цилиндра вверх затруднено инертной массой автомобиля, давление передается на грунт в место его контакта с рабочим органом газовзрывного источника. Известны также установки газовой детонации, в которых продукты детонации выбрасываются в воду, возбуждая в ней упругую волну. Источники сейсмических колебаний используются при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, инженерно-геологических и гидроакустических исследованиях [57,58].

Для создания многократно повторяющихся импульсных сейсмических сигналов предназначено устройство [59]. Устройство содержит скважину, пакер, установленный в скважине, через который проходят дренажная труба, топливная магистраль и

линия передачи детонации. Скважина пробурена в плотные горные породы ниже зоны малых скоростей, где установлен пакер. Он ограничивает рабочий объем скважины между ним и концом дренажной трубы. Этот объем заполнен воздухом по линии передачи детонации. При этом топливная магистраль имеет ресивер с газом (пропан, метан) для образования его стехиометрической смеси с воздухом в рабочем объеме скважины и детонации этой смеси с ее распространением вдоль скважины и излучением поперечных сейсмических волн. При распространении детонационной волны вдоль участка скважины, заполненного газовой смесью, в массив горной породы излучаются, в основном, поперечные сейсмические волны. После окончания детонации производят продувку рабочего объема воздухом, после чего цикл повторяется. Минимальная длительность полного цикла составляет около 10 с. Устройство может быть также использовано для вибровоздействия на коллекторы углеводородов с целью повышения продуктивности пластов и дебита скважин.

Термоимпульсная камерная обработка

Термоимпульсная обработка в закрытых камерах с использованием газовой детонации является также достаточно широко применяемым в производстве процессом.

Удаление заусенцев. Одной из трудоемких операций в машиностроении является удаление заусенцев, возникающих на металлических деталях при механической обработке [2,6,7]. В 1970 году был разработан метод, который стал альтернативой малоэффективному ручному способу удалению заусенцев и первоначально был известен как термоэнергетический метод снятия заусенцев (ТЭМ) [60]. Этот уникальный метод позволил обрабатывать глухие и пересекающиеся отверстия одновременно с внешней поверхностью детали. Так как при очистке не используются никакие абразивные элементы, размеры детали не изменяются. Применение охлаждаемых камер сгорания и малое время обработки предотвращают нагревание детали более чем на 150 °С (за исключением слишком тонких элементов), что не изменяет внутреннюю структуру материала детали. Удаляемые элементы не должны быть расположены в каком-либо конкретном направлении, так как газовая смесь окружает их со всех сторон.

Исторически процесс термоэнергетического удаления заусенцев был впервые использован в литейной промышленности и при обработке деталей и агрегатов гидравлических систем. В вопросах, связанных с гидравликой, делался акцент на гарантии удаления самых маленьких, самых неудобных заусенцев, которые, скорее всего, оторвутся во время эксплуатации. Таким образом, идея заключалась в следующем: если заусенец не оторвался при взрыве он не оторвется в эксплуатации. Количество удаленных заусенцев

зависит от количества тепла, материала и формы заусенцев.

Начальный этап развития термоимпульсной технологии рассмотрен в работах [2,6,7]. Список отраслей, которые пользуются ТЭМ, ежегодно растет. ТЭМ используется для очистки от заусенцев и микрочастиц широкого диапазона деталей, особенно при наличии в них ликвидов на внутренних поверхностях пересекающихся каналов, на резьбах и прочих зонах, где провести качественную очистку с помощью более традиционных методов невозможно или невыгодно.

Детали помещают в герметичную высокопрочную камеру, в которую под давлением нескольких десятков атмосфер газовую водородно-кислородную или углеводородно-кислородную смесь с повышенным содержанием кислорода. Газовая смесь полностью заполняет все пространство в камере и обрабатываемых деталях (включая глухие отверстия, пересечения длинных тонких каналов и т.п.). Далее горючая смесь воспламеняется от искры, которая создает тепловые волны температурой до 3500 К в зависимости от используемого горючего. В течение нескольких миллисекунд топливо выгорает. Так как большинство заусенцев обладает высоким соотношением площади поверхности к массе, они не могут передавать тепло в массив детали достаточно быстро, чтобы предотвратить их оплавление, выгорание или испарение (в зависимости от режима обработки) и будут продолжать разрушаться, пока тепло не начнет передаваться непосредственно в деталь. К этому времени все заусенцы, сколы и загрязняющие вещества будут удалены. Удаление заусенцев идет не под воздействием динамического напора ПД, а за счет их плавления. В этом процессе детонация служит для ускорения сжигания топлива и интенсификации теплообмена. Интенсивная передача тепла от продуктов детонации к заусенцу и детали происходит, когда газ движется относительно детали с высокими скоростями. Если к моменту прогрева основания заусенца толщиной 0,2...0,4 мм до температуры плавления скорость вынужденной конвекции достаточна для разрушения образовавшейся капли, то происходит удаление заусенца с образованием скругления. Процесс регулируется подбором начального давления. Окисление заусенца продуктами детонации приводит к снижению необходимого давления. Не следует одновременно помещать в камеру крупные и мелкие детали из-за возможности полного сгорания последних. При не очень высоких давлениях возможна даже импульсная термообработка пластмасс.

Несмотря на различия возможных механизмов удаления заусенцев (оплавление, сгорание, хрупкое скалывание), обработка в основном происходит в результате интенсивного теплового воздействия на удаляемые элементы за счет возникновения ударных волн [61,62].

На современном этапе развиваются метод развивается в двух направлениях: в виде термохимического и термоимпульсного методов.

При термохимической обработке удаление заусенцев на кромках происходит за счет инициации их сгорания в обедненной топливной смеси, т.е. за счет повышения содержания окислителя. Для обеспечения процесса термохимической очистки необходимо обеспечить в камере избыток кислорода, достаточный для обгорания наибольших по размеру заусенцев на детали. В процессе горения заусенцы преобразовываются в оксиды обрабатываемого металла. Оксиды оседают на элементы детали в виде отдельных порошкообразных остатков. Поэтому всякий раз, когда необходимо снять заусенцы при помощи термохимического метода, нужно рассмотреть необходимость очистки от окислов и возможные методы ее реализации. Это должно быть частью производственной стратегии, особенно когда стоимость очистки от окислов соизмерима со стоимостью удаления заусенцев. На сегодняшний момент термохимический метод более распространен и реализован в установках таких фирм как BOSCH, ExtrudeHone, ATL.

При термоимпульсном методе обработка происходит за счет быстрого воздействия на удаляемый элемент интенсивного теплового потока, вызывающего их оплавление, испарение или срыв с поверхности ударными волнами. Особенностью метода является то, что при термоимпульсной очистке, в отличие от термохимической, часть топливной смеси сгорает в режиме взрыва с резким увеличением скорости горения и давления. Это приводит к образованию ударных волн в камере сгорания с определенным временем их затухания, за которое все заусенцы и микрочастицы успевают нагреться до требуемых для обработки температур как на внешних, так и на внутренних поверхностях.

Термоимпульсная обработка деталей из пластмасс и композиционных материалов распространена в меньшей степени. В то же время зачисленной обработке по удалению облоя подвергается 85...95% деталей из термопластов, выпускаемых в различных отраслях промышленности. При этом, трудоемкость такой операции может составлять от 10 до 70% общих затрат на изготовление деталей [63]. Широкое применение термоимпульсного оборудования для обработки деталей из пластмасс сдерживается несовершенством методик назначения технологических режимов. В выполненных до настоящего времени исследованиях не рассматривались вопросы, касающиеся особенностей термоимпульсной обработки деталей из полимерных материалов. Для таких материалов характерны низкая температура плавления, что выдвигает повышенные требования к точности назначения времени обработки. Применение форкамерно-факельного поджога является перспективным методом обеспечения

равномерности температуры продуктов сгорания [63], что особенно важно в случае термоимпульсной обработки легкоплавких материалов.

Обработка кромок деталей включает в себя удаление заусенцев, притупление произвольным радиусом, размерное скругление, очистку от технологических загрязнений. Качество отделки кромок и поверхностей прецизионных деталей влияет на эксплуатационные характеристики гидротопливных агрегатов: станков, двигателей внутреннего сгорания, аэрокосмической и другой техники. Особое место занимает обработка кромок режущего инструмента и кромок золотниковых пар, в которых идеальным является радиус, равный нулю.

В настоящее время существуют более ста методов отделки и зачистки кромок и поверхностей деталей. Наиболее перспективным представляется термоимпульсный метод, в основу которого положен импульсный нагрев и плавление удаляемых с деталей элементов (ликвидов) [62]. Источниками тепла могут быть лазерные установки, плазмотроны, высокоэнергетические газовые струи, ТВЧ и т.п. [64,65]. Для этого метода не имеют значения твердость и прочность обрабатываемого материала. Основными факторами, влияющими на процесс плавления ликвидов, являются теплофизические свойства материалов, геометрические размеры, мощность источника тепла и время его действия. Широкое применение получила обработка в продуктах сгорания газовых смесей [66,67], где инструментом является газ. Известны экспериментальные исследования притупления кромок оплавлением на углах от 15 до 90°, в которых показано, что притупить кромку можно только на углах до 60° [66]. В работе [64] приведен численный анализ удаления заусенца в форме клина и установлено, что технологически возможным и целесообразным является способ разрушения заусенца посредством расплавления. Эти результаты хорошо согласуются с выводами других исследователей. В работе [68] приведены результаты исследования нагрева моделей заусенцев в виде неограниченных пластин, длина и ширина которых значительно больше толщины, где установлено, что с увеличением толщины необходимо увеличивать мощность источника тепла. При этом увеличивается температура поверхности детали. Чтобы минимизировать нагрев детали, процесс термоимпульсной обработки осуществляется при наименьшей мощности источника тепла и оптимальном времени нагрева. Установлено, что оно соответствует времени выравнивания температурного поля по толщине неограниченной пластины. Эти результаты положены в основу технологий термоимпульсной очистки и отделки поверхностей и кромок деталей.

Для выбора рациональных технологических режимов и характеристик источника тепла (оборудования) с учетом теплофизических свойств

материалов, наличия тонкостенных элементов детали, химического состава горючей смеси, размеров рабочей камеры и степени ее загрузки полезны аналитические модели

Термоимпульсная обработка детонирующими смесями является наиболее производительным процессом финишной очистки и отделки кромок [69]. Термоимпульсное оборудование серийно выпускается рядом фирм и широко используется в основном для обработки различных деталей из металлов. Термоимпульсная обработка деталей из пластмасс и композиционных материалов распространена в меньшей степени. В то же время зачистной обработке по удалению облоя подвергается 85...95% деталей из термопластов, выпускаемых в различных отраслях промышленности. При этом, трудоемкость такой операции может составлять от 10 до 70% общих затрат на изготовление деталей [69]. Широкое применение термоимпульсного оборудования для обработки деталей из пластмасс сдерживается несовершенством методик назначения технологических режимов.

Очистка поверхностей деталей. Топливные и гидравлические агрегаты летательных аппаратов имеют большое количество различных по конструкции и назначению золотниковых и плунжерных пар. По существу надежность агрегатов определяют наиболее точные элементы конструкции – золотниковые и плунжерные пары. Попадая в зазоры между рабочими поверхностями прецизионных пар, твердые частицы могут вызвать увеличение сил трения, задиры и заклинивание трущихся пар, интенсивный износ или зарастивание зазоров. Причем, чем точнее механизм, тем он чувствительнее к этим частицам [70]. Очистка деталей авиационной техники является обязательным этапом восстановительного ремонта. От ее эффективности во многом зависит послеремонтный ресурс техники. Основными источниками загрязнений поверхности деталей авиационной и военной техники, подлежащие удалению при восстановительных ремонтах являются: микрочастицы, появляющиеся в результате износа в ходе эксплуатации; рабочие среды; пыль в производственных помещениях; предметы, с которыми соприкасаются детали при ремонтных работах и др. [71,72].

При обеспечении чистоты поверхностей деталей и рабочих полостей многих машин их ресурс может быть увеличен в два – три раза. Поэтому интерес к отделочно-очистным технологиям в высокоразвитых в промышленном отношении странах не ослабевает на протяжении последних 20 лет.

Технологические загрязнения неизбежно образуются во время изготовления деталей, сборки, испытаний и эксплуатации изделий. При этом даже оптимизация режимов и применение инновационных способов обработки не может

исключить образование микрозаусенцев на ребрах и микрочастиц на поверхности обрабатываемых деталей.

Технология термоимпульсного удаления заусенцев и очистки поверхности в наибольшей степени удовлетворяет условиям промышленного производства. Инструментом при этом является горячая газовая смесь, а очистка происходит при интенсивном тепловом воздействии продуктов сгорания на деталь. Однако при очистке этим методом тепловому воздействию подвергаются не только ликвиды, но и все остальные поверхности детали, что может приводить к изменениям в структуре материала. Поэтому необходимо обеспечить такие режимы обработки, при которых негативное воздействие тепла на деталь было бы минимальным [73]. Установлено, что неоднородность топливной смеси оказывает существенное влияние на уровень температур продуктов сгорания для деталей, имеющих конструктивные элементы сложной формы. Перепад температур вблизи различных участков обрабатываемых поверхностей может составлять более 1000°C. Для соблюдения условий обработки в этом случае целесообразно использовать наполнение заранее подготовленной смесью.

На этапе производства необходима качественная очистка кромок и поверхностей деталей от заусенцев, микрочастиц и других микроликвидов, которые определяют величину абразивного износа, а для высокоточных механизмов, таких как агрегаты двигателей ЛА, существенно влияют на надежность работы изделия в целом [74,75]. Наиболее перспективными методами очистки поверхностей деталей агрегатов авиационных двигателей являются газодетонационный и лазерный методы. Однако лазерный метод, способный удалять как химические загрязнения, так и микрочастицы, эффективен только для очистки внешней поверхности деталей. Назначение режимов детонационной очистки на основе экспериментов является практически неразрешимой задачей, поскольку требует учета большого числа факторов.

На основе анализа баланса сил получена оценка для определения минимального диаметра микрочастицы, которая может быть удалена с поверхности детали при прохождении вдоль нее детонационной волны [71]. Полученная оценка относится к случаю отрыва частицы ударной волной, распространяющейся вдоль поверхности. В условиях распространения ударных волн в замкнутой камере волны могут отражаться от поверхности под различными углами, что приводит к образованию вихрей и даже отрыву пограничного слоя. В этих условиях на частицу дополнительно воздействует перепад давлений, вызванный разрежением в вихре [71]. Поэтому сделанная оценка может быть принята в качестве верхней границы качества детонационной очистки.

Сушка материалов. Воздействие детонационных волн на влажное сырье для получения бентонитов позволяет производить его сушку от влажности 15% до 1-2% за времена воздействия 10^{-3} с, при этом высушенный материал представляет собой порошок с размером частиц 10^{-6} – 10^{-5} м [83].

Совершенствование оборудования и автоматизация. Уникальным свойством термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями является возможность очистки наружных и внутренних поверхностей произвольно сложной формы, присущих элементам гидравлических и топливных систем летательных аппаратов (ЛА). Однако отсутствие автоматизированного оборудования, реализующего данный способ обработки, считается одной из основных проблем, мешающих широкому использованию термоимпульсных технологий очистки в авиационной промышленности [61,75].

Применение аналитической модели для дискретного нагрева при термоимпульсной обработке кромок с учетом отвода тепла в тело детали и дискретного увеличения толщины кромки позволяет решить задачу автоматизации процесса скругления кромок заданным радиусом путем регулирования двух параметров – времени нагрева и мощности источника тепла [62].

Учеными Национального аэрокосмического университета «ХАИ» в конце 80-х годов был разработан и прошел промышленную проверку термоимпульсный способ финишной очистки, который по качеству обработки не уступает лучшим из существующих на сегодня технологиям финишной обработки, а по технологическим возможностям даже превосходит их [74,76]. В ходе многочисленных экспериментальных исследований подтверждена эффективность данного метода и перспективность его развития [70, 77].

В ходе численного моделирования процессов смесеобразования в камерах импульсных машин было показано, что при последовательном наполнении камеры компонентами смеси ее состав крайне неравномерен [78, 79]. Наибольшие отличия от стехиометрического состава наблюдались вблизи конструктивных элементов сложной формы – проточек, глухих отверстий, т.е. элементов, характерных для корпусных деталей агрегатов двигателей ЛА. При наполнении камеры готовой топливной смесью обеспечивается необходимая степень однородности смеси для качественной термоимпульсной очистки всех внутренних поверхностей детали. Для дальнейшего использования при обработке деталей сложной формы следует рекомендовать смесеобразование по схеме совместного наполнения компонентами.

Одной из основных проблем, которые мешают широкому использованию термоимпульсных технологий очистки в промышленности, является отсутствие автоматизированного оборудования,

реализующего данный способ [81]. В то же время, анализ показывает, что для создания такого оборудования созданы необходимые предпосылки – накоплен большой объем экспериментальных результатов, созданы и экспериментально проверены теоретические модели процесса термоимпульсной очистки, накоплен опыт разработки компонентов систем энергообеспечения и регулирования термоимпульсных машин.

При очистке деталей термоимпульсным методом тепловому воздействию подвергаются как удаляемые элементы, так и вся деталь, поэтому необходимо обеспечить плавление удаляемых элементов и при этом исключить необратимые изменения как в материале, так и в конструкции деталей [82].

Термомеханическая импульсная обработка

Листовая штамповка. Начальный опыт применения газовой детонации для листовой штамповки рассмотрен в работах [2,6,7]. В детонационном устройстве по а.с. № 574888 (СССР) матрица установлена в бассейне с передающей средой. Разработан способ листовой штамповки, когда на заготовку воздействуют детонационными импульсами и подвергают факельно-пламенному нагреву для последующей деформации с помощью одного или нескольких импульсов газовой или гетерогенной детонации топливной смеси [84]. При этом управляют частотой, интенсивностью и длительностью импульсов. Штамповку осуществляют с помощью устройства, содержащего камеру сгорания, системы подачи топлива, окислителя, инициирования, детонационную трубу и матрицу. К камере сгорания с одной стороны присоединены системы подачи топлива, окислителя, продувочного газа и смесительное устройство, а с другой стороны последовательно присоединены ускоритель пламени, сменная детонационная труба и сменный выходной насадок, образующие единый газодинамический тракт, соединенный с вентилируемым шумопоглощающим контейнером. В контейнере на некотором расстоянии от насадка размещена заготовка и подвижная сменная матрица. Устройство может работать как в импульсно-детонационном режиме, так и в режиме факельно-пламенного нагрева заготовки перед детонационной штамповкой.

Формование бетонных изделий. Ударно-волновая газодинамическая установка для формования бетонных объектов с пустотами используется в производстве строительных материалов, при формировании структуры бетонов и растворов на минеральных вяжущих веществах и др. Установка состоит из внешней ограждающей конструкции, внутренней формы-пустотообразователя, размещаемого в бетонной смеси, снабженных детонационными камерами. Детонационные камеры внутренней формы-пустотообразователя образованы пространством между внутренней трубой

пустотообразователя и его эластичной оболочкой, внешние детонационные камеры образованы пространством между опорной и резонансной плитами, соединенными упругими элементами, например пружинами. Детонационные камеры внутренней формы-пустотообразователя выполнены из условия обеспечения периода цикла больше времени релаксации смеси, который соответствует для жестких бетонных смесей частоте цикла в пределах 0,5-20,0 Гц, внешние детонационные камеры установлены из условия обеспечения периода цикла меньше времени релаксации смеси, который соответствует для жестких бетонных смесей частоте цикла более 50 Гц [85].

Уплотнение пористой массы. Повышение эффективности уплотнения пористой массы в газовом баллоне достигается однократным воздействием на нее импульса повышенного давления детонационной волны газообразного ацетилена [86]. Импульс давления детонационной волны формируется в установке, содержащей ударную трубу с инициирующим взрывной распад ацетилена устройством. Для заполнения баллона и ударной трубы ацетиленом, вакуумирования и контроля ударная труба снабжена соответствующими газовыми коммуникациями, запорной арматурой и приборами. На первоначально неуплотненную пористую массу в баллоне воздействуют взрывным импульсом такой формы, чтобы давление было как можно больше, а время действия как можно меньше. При этом зерна пористой массы уплотняются друг с другом, но разрушиться не успевают, так как действие волны кратковременно. В качестве рабочего взрывного газа предпочтительно использовать ацетилен по следующим причинам: форма импульса взрывного давления (большая амплитуда и высокая частота) предпочтительна для уплотнения пористой массы; ацетилен способен к взрывному распаду, в том числе и к детонации, в чистом виде без добавок каких-либо других газов-окислителей. Это упрощает установку, облегчает ее эксплуатацию, повышает надежность и безопасность работы; мощность взрыва, необходимая для требуемого уплотнения пористой массы, достигается при невысоких начальных давлениях ацетилена.

Измельчение и плавление снежно-ледяной массы. Разработаны способ и устройство, в которых измельчение и плавление снежно-ледяной массы происходит благодаря периодическому воздействию ударных волн, а также высокоскоростных, струй горячих продуктов импульсно-детонационного горения топливной смеси, и может быть использовано для быстрой утилизации снежно-ледяной массы [87]. Снежно-ледяная масса нагревается через стенки трубы, горячими газами, а также полученной в процессе плавления горячей водой, она одновременно измельчается и плавится под действием ударных волн и высокоскоростных струй горячих продуктов детонации, причем

ударные волны и высокоскоростные струи горячих продуктов детонации периодически генерируются в трубе с топливной смесью благодаря переходу горения в детонацию; при этом кроме измельчения и расплавления снежно-ледяной массы ударные волны и высокоскоростные струи горячих продуктов детонации вовлекают в движение фрагменты снежно-ледяной массы и горячую талую воду, полученную в процессе плавления, а также приводят к образованию водяной пелены и брызг, проникающих в снежно-ледяную массу, что в целом обеспечивает плавление снежно-ледяной массы без ее предварительной подготовки и без использования предварительно поданной подогретой воды. Это позволяет использовать в полной мере преимущества импульсно-детонационного горения, заключающиеся в более высокой термодинамической эффективности, в более высокой температуре продуктов детонации, в комбинированном тепловом и механическом (ударно-волновом) воздействии на расплавляемую среду, а также в снижении эмиссии экологически вредных веществ.

Метание тел

Ускорение компактных тел. При движении «снаряда» в заполненной взрывчатой газовой смесью трубе со скоростью, превышающей D_{C1} , смесь будет сгорать в системе отраженных косых ударных и детонационных волн, возникающих в кольцевом зазоре между «снарядом» и стенкой трубы. Можно так подобрать форму и размеры «снаряда», что он будет раз-гоняться (концепция прямого ускорителя – RamAccelerator). Расчеты показали, что в 12-метровой трубе диаметром 38 мм, заполненной водородно-воздушной смесью под давлением 25 атм, «снаряд» массой 70 г можно разогнать до скорости 4 км/с. При скорости 3,2 км/с головная баллистическая волна является ударной, а отраженная от стенок – детонационной. При повышении скорости головная волна становится детонационной и тяга исчезает. В экспериментах [6,7] получена скорость снаряда 2,1 км/с, ненамного превышающая скорость детонации.

Возможен разгон тел продуктами газовой детонации и по обычной пушечной схеме. В экспериментах [6,7] вращающийся стальной диск диаметром 0,5 м и толщиной 6 мм ускорялся при детонации смеси $4H_2+O_2$ ($D_{C1} \cong 3,2$ км/с) до скорости 3,5 км/с на длине 60 м.

Метание тушащих веществ. Весьма актуальна проблема метания огнетушащих веществ различной массы с высокой производительностью и эффективностью на заданные расстояния с целью дистанционного тушения крупных пожаров. В работе [88] разработана установка метания тушащих веществ в контейнерах на основе газовой детонации, в которой повышение энергоэффективности и дальности метания обеспечивается за счет более высокого давления в рабочей камере и снижения времени теплоотдачи при детонационном сгорании

газового заряда в сравнении с установками, где реализуется медленный процесс дефлаграционного сгорания газового заряда.

Безыгольные инъекции применяются для того, чтобы уменьшить боль и снизить повреждение тканей. Вытеснение дозы жидкости происходит под действием на поршень газа под давлением или пружины. Эффективность метода тем выше, чем больше скорость нарастания давления на поршень. В связи с этим возникли предложения использовать для безыгольных инъекций энергию микровзрыва твердого взрывчатого вещества (ВВ) [89] для ускорения микрокапсул лекарственных препаратов при введении их в эпидермис. Заряд ВВ заключается в трубку, на конце которой помещается контейнер с лекарством, отделенный от трубки металлической мембраной. При взрыве ВВ мембрана прогибается, лекарство выбрасывается через отверстие в торце трубки и образует тонкую струйку. Измеренная скорость струйки составляет 100 м/с, что достаточно для осуществления безболезненной безыгольной инъекции [89]. Недостатком подобного метода является необходимость использования твердого взрывчатого вещества, продукты сгорания которого токсичны. В данной работе исследована возможность замены твердого ВВ в аппаратах, предназначенных для безыгольных инъекций на водородовоздушные смеси, продуктами сгорания которых является вода, что позволит значительно расширить область применения данной методики. Для этого необходимо создать устройство, передающее энергию продуктов газовой детонации лекарственному веществу, чтобы создать такой же крутой фронт давления, как при взрыве твердого ВВ.

Для компактности устройства для безыгольных инъекций необходимо, чтобы преддетонационное расстояние было как можно меньшим.

Проведенное исследование показало, что энергия детонационной волны в водородовоздушной смеси может передаваться жидкости и разгонять ее до скоростей порядка 70 м/с, при этом наблюдается проникновение струйки жидкости в модельную среду на расстоянии 15 мм. Использование газовой детонации позволит заменить менее эффективные источники энергии для ускорения лекарственных препаратов в аппаратах, предназначенных для безыгольных инъекций, на газовые смеси, что позволит упростить, удешевить устройства для безыгольных инъекций и избежать выбросов ядовитых продуктов сгорания твердых топлив.

Иницирование горения и взрыва ВВ

В научных исследованиях и технике широко применяется иницирование взрыва трудндетонирующих газовых, гетерогенных и конденсированных ВВ посредством ДВ, сформированной в узкой трубке, заполненной легкодетонирующей газовой смесью. Трубку можно не закрывать мембраной. Тогда легкодетонирующую смесь можно инжектировать к электродам

непосредственно перед подачей инициирующего импульса. Переход ДВ по смеси из трубки в объем является хорошо известным способом возбуждения сферической и цилиндрической детонации. Газовой детонацией можно возбудить УВ «со сшитой контактной поверхностью», что значительно удлиняет «пробку» постоянных параметров за УВ. Данный эффект можно использовать в импульсных газодинамических лазерах. ДВ, распространяющаяся по газовой смеси, способна при определенных условиях возбудить детонацию в заряде насыпного взрывчатого вещества [90-92].

Пересжатая ДВ обеспечивает надежное инициирование промышленного детонатора, употребляемого в горном деле [90-92]. Обычная электрическая схема, используемая при одновременном подрыве большого количества разнесенных зарядов, кроме опасности несанкционированного срабатывания от блуждающих электрических наводок обладает еще одним опасным свойством - при отказе какого-либо детонатора заряд оказывается в снаряженном состоянии (электродетонатор + заряд взрывчатого вещества в сборке). Это диктует необходимость обязательного устранения угрозы его срабатывания при последующих производственных операциях. Если электродетонаторы заменить газовыми, объединенными гибкой, например, полихлорвиниловой трубкой в единую протяженную и разветвленную сеть, то после заполнения системы взрывчатой газовой смесью и инициирования детонации волна, распространяясь вдоль магистралей, взорвет все заряды. При многократных испытаниях последовательной сети длиной 1 км, содержащей около сотни зарядов, не было зарегистрировано ни одного отказа. Если же какой-либо газовый детонатор откажет, то обезвредить его можно продувкой магистрали азотом или воздухом. Это эквивалентно устранению детонатора и обеспечивает безопасность при дальнейшей работе с этим зарядом.

Выводы. Газовая детонация как источник энергии постепенно расширяет области практического применения. Кроме освоенных в промышленности детонационно-газового напыления и термоимпульсной обработки в ближайшее время следует ожидать внедрения пульсирующих детонационных двигателей и энергетических установок.

Для использования всех потенциальных возможностей газовой детонации необходима разработка методик инженерных расчетов и совершенствование теории физико-химических явлений, сопровождающих ее развитие и распространение.

Л и т е р а т у р а

1. Селиванов, В. В., Взрывные технологии: учебник для вузов / В. В. Селиванов, И. Ф. Кобылкин, С. А. Новиков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 519 с.

2. Харламов, Ю. А., Детонационно-газовые процессы в промышленности / Ю. А. Харламов, Н. А. Будагьянц; Восточноукр. гос. ун-т. - Луганск: Изд-во ВУГУ, 1998. - 223 с.
3. Pulsedetonationpropulsion: challenges, currentstatus, andfutureperspective / G.D. Roya, S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer // ProgressinEnergyandCombustionScience, 30 (2004). – P. 545–672.
4. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
5. Фролов С.М. Наука о горении и проблемы современной энергетики // Рос.хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2008, т. LII, № 6. – С.129-134.
6. Николаев Ю.А., Васильев А.А., Ульяницкий В.Ю. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 4. С. 22-54.
7. Баженова Т.В., Голуб В.В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 4. С. 3-21.
8. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчян М. Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
9. Детонационные волны в конденсированных средах / А. Н. Дреммин, С. Д. Савров, В. А. Трофимов, К. К. Шведов. М.: Наука, 1970.
10. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. — М.: Изд-во АН СССР.- 1963.-256 с.
11. Неглетон М. Детонация в газах: Пер . с англ.- М.: Мир, 1989 . - 280 с .
12. Зельдович Я. Б., Компанеец А. С. Теория детонации. М.: Гостехиздат, 1955.
13. Николаев Ю. А., Топчян М. Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах газах // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, №3. С. 393-404.
14. Николаев Ю. А., Гапонов О. П. О пределах детонации в газах // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 3. С. 139-145.
15. Васильев А. А. О геометрических пределах распространения газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 2. С. 132-136.
16. Манжалей В. И. Пределы низкоскоростной детонации газовых смесей // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 3. С. 89-96.
17. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е. О предельном диаметре распространения газовой детонации в трубах // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312, № 5. С. 1177-1180.
18. Агафонов Г. Л., Фролов С. М. Расчет пределов детонации газовых водородсодержащих смесей // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 1. С. 92-100.
19. Харитон Ю. Б. О детонационной способности взрывчатых веществ // Вопросы теории взрывчатых веществ. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. № 1. С. 7-28.
20. Фролов С. М. Импульсное детонационное горение: новое поколение энергетических установок // Интеграл. 2008. № 3(41). С. 44—45.
21. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // Журнал технической физики. – 1940. – Т.10. – Вып. 17. – С. 1453.
22. Булат П.В., Денисенко П.В., Волков К.Н. Тенденции разработки детонационных двигателей для высокоскоростных воздушно-космических летательных аппаратов и проблема тройных

- конфигураций ударных волн. Часть I - Исследования детонационных двигателей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. - С. 1-21.
23. Фролов С.М. Импульсные детонационные двигатели. М.: Торус Пресс, 2006. 592 с.
 24. <http://www.google.com.pg/patents/WO2015099552A1?cl=ru&hl=ru>
 25. <https://www.kommersant.ru/doc/3283615>
 26. Сосновская А.В. Детонационно-эжекторный электрогенератор // Матеріали II-ї Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики». – Херсон: ХНТУ, 2017. – С.95-96.
 27. Способ прямого преобразования энергии импульсного детонационного сгорания топлива в электрическую энергию и генератор переменного тока для его реализации. Патент РФ № 2418968.
 28. http://adam-armen.ru/article8/s8_rus.html
 29. Сычевский В.А., Борисов Е.В., Миронов В.Н. Использование численного моделирования для выбора параметров газовых течений в ударно-детонационных технологиях // V Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. May 24-28, Minsk, 2004.
 30. Борисов Е.В., Яглов В.Н., Бабушкин О.С. Способ получения порошков тугоплавких оксидов. А.с. 1649738 (СССР).
 31. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. – Киев: Наукова думка, 1987. - 544 с.
 32. Букаемский А.А. Нанопорошок диоксида циркония. Взрывной метод получения и свойства // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 4. С. 129-134.
 33. Воронин В.Н. Технология балансировки абразивных кругов, используемых для шлифования пар трения методами детонационного напыления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 18, № 4(2), 2016. – С.237-241.
 34. Детонационные технологии балансировки и упрочнения абразивных кругов / М.В. Ненашев, Д.А. Деморецкий, И.Д. Ибатуллин, С.Г. Ганигин, А.Н. Журавлев, Р.Г. Гришин, А.С. Дьяконов, В.Н. Воронин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т.14. №1(2). С.409-412.
 35. Воронин В.Н., Ибатуллин И.Д. Технология упрочнения и балансировки абразивных кругов [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2014. №2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2372>.
 36. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2012, № 4
 37. Система нанесения покрытий осаждением из газовой фазы в потоке продуктов газовой детонации / С.Ю. Ганигин, А.Ю., Мурзин, О.Ю. Глазунова, П.К. Кондратенко, М.В. Ненашев, И.В. Нечаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16, № 1(2), 2014. – С.385-389.
 38. Разрушение горного массива машинами взрывоимпульсного действия. М.: Наука, 1974. – 230 с.
 39. Взрывоимпульсное разрушение горных пород. – М.: Наука, 1979. – 212 с.
 40. Методы наружной очистки котлов-утилизаторов / Я.М. Щелоков, Э.М. Телегин, В.Н. Подымов, В.И. Гасников. – Казань: изд-во КГУ, 1974. – 213 с.
 41. Щелоков Я.М., Аввакумов А.М., Сазыкин Ю.К. Очистка поверхностей нагрева котлов-утилизаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
 42. А.с. № 674886 (СССР). Способ изготовления алмазно-абразивного-инструмента / В.В. Пименов, Н.Д. Сусликова, Н.И. Корнилов, Ю.А. Харламов и др.
 43. А.с. № 669531 (СССР). Способ дробления сверхтвердого трещиноватого материала / В.В. Пименов, Н.Д. Сусликова, Н.И. Корнилов, Ю.А. Харламов и др.
 44. <http://otvaga2004.ru/kaleydoskop/kaleydoskop-ammo/boeprigasy-obyomnogo-vzryva/>
 45. Стаховский О.В. Иницирование детонации в неограниченном объеме // Механіка та машинобудування, 2009, № 1. – С.174-181.
 46. Сиротенко А.М., Довбня А.М., Стаховський О.В., Коритченко К.В. Застосування бронетанкової техніки для розмінування мінних полів об'ємним вибухом // Механіка та машинобудування. – 2006. - №1. – С.178-188.
 47. Сиротенко А.Н., Довбня А.Н., Стаховский О.В., Корытченко К.В. Создание детонационно-способной смеси в газовой струе с приложением для разминирования минных полей // Механіка та машинобудування. – 2006. - №1. – С.166-177.
 48. Патент України на винахід № 78083 від 21.02.2005 МПК7: F41H11/12 Спосіб розмінування мінних вибухових загороджень / Сиротенко А.М., Янчик О.Г., Стаховський О.В., Коритченко К.В., Ларин О.Ю.
 49. Серпухов А.В., Сиротенко А.Н., Стаховський О.В., Корытченко К.В. Технические средства разминирования минных полей взрывным способом // Механіка та машинобудування, Харків: ХПІ. – 2007. - №1. – С.48-55.
 50. Серпухов О.В. Спеціальне обладнання до бронетанкової техніки для розширення колійних проходів у мінних вибухових загородженнях // Системи обробки інформації, Харків: ХУПС. – 2008.
 51. Стаховський О.В., Корытченко К.В., Угрюмов М.Л., Скоб Ю.А. Способ иницирования детонации в неограниченном пространстве // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Харків: Харківський університет повітряних сил імені Івана Кожедуба, 2008. – Випуск 2 (69). – С. 105 – 107.
 52. Борисов Е.В. и др. Способ обработки призабойной зоны пласта. А.с. 1405384 (СССР).
 53. Борисов Е.В. Способ обработки призабойной зоны пласта. А.с. 1595069 (СССР).
 54. Снитка Н.П., Норов Ж.А., Норов А.Ю. Методы восстановления производительности водозаборных технологических скважин // Горный вестник Узбекистана, 2015, №1(60). – С.6-8.
 55. Способ утилизации боеприпасов. Патент РФ 2137089.
 56. Геофизические методы исследований / В.К. Хмелевской, Ю.И. Горбачев, А.В. Калинин, М.Г. Попов, Н.И. Селиверстов, В.А. Шевнин. - Петропавловск-Камчатский: изд-во КГПУ, 2004, 232 с.
 57. Установка газовой детонации. А.с. 603929 (СССР).
 58. Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Свинцов И.С. Устройство для многократного создания сейсмических волн в массиве горных пород. Патент РФ № 2199660.
 59. Трифонов О. В. Современное состояние технологии и оборудования для очистки от заусенцев детонирующими газовыми смесями и направления их совершенствования / О. В. Трифонов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. - 2013. - Вып. 1. - С. 115-121.

60. Моделирование теплообмена при затухании ударных волн в замкнутой камере / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, Е. С. Палазюк, В. Л. Малашенко // *Авиационно-космическая техника и технология*, 2014, № 1. – С.104-109.
61. Моделирование процесса оплавления заусенцев при термоимпульсной обработке детонирующими смесями / С. И. Планковский, А.В. Гайдачук, О. В. Шипуль, Е. С. Палазюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 3 (100). – С. 4-11.
62. Расчет тепловых потоков при термоимпульсной обработке с форкамерно-факельным поджогом / О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, В.Л. Малашенко, С.А. Красовский // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии* № 62, 2013. – С.89-97.
63. Пак Н.И. Численное моделирование процесса термического удаления заусенцев концентрированным потоком энергии / Н. И Пак, С.А. Шкиунов // *Обработка материалов импульсными нагрузками*. - Новосибирск, 1990. – С. 168–175.
64. Манжалей В.И. Затухания ударных волн и теплопередачи телам после детонации газа в камере / В.И. Манжалей - Новосибирск, 1989. – С. 123-132.
65. Отработка технологических режимов удаления заусенцев с деталей из алюминиевых сплавов газои́мпульсным методом: Отчет, Инв. №02830007717. – Новосибирск. – 1982. – 103 с.
66. Лосев А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода: дис. ...канд. техн. наук: 05. 02. 08. А.В. Лосев. – Х., 1995. – 210 с.
67. Фадеев В.А. Обеспечение промышленной чистоты изделий машиностроения в производстве с использованием термоимпульсного метода / В.А. Фадеев, А.В. Лосев, О. А. Лосева // *Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – НТУ "ХПИ", Х., 2006. – Вып. 70. – С. 516 – 512.*
68. Расчет тепловых потоков при термоимпульсной обработке с форкамерно-факельным поджогом / О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, В.Л. Малашенко, С.А. Красовский // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии* № 62, 2013. – С.89-97.
69. Жданов О.А. Термоімпульсна технологія очистки поверхонь деталей агрегатів авіаційних двигунів. Автореф. ... ктн. – ХАИ, 2003. – 19 с.
70. Аналитическая модель удаления микрочастиц детонирующими газовыми смесями при очистке деталей ГТД / И. Б. Кузнецов, В. П. Божко, Е. В. Цегельник, Д. А. Брега // *Авиационно-космическая техника и технология*, 122 2016, № 8(135). – С.122-127.
71. Планковский С.И., Шипуль О.В. Проблемы развития методов финишной отделки и очистки интенсивными тепловыми потоками // *Пробл. машиностроения*, 2011, Т. 14, № 2. – С.72-82.
72. Моделирование термоимпульсной обработки с учетом неоднородности топливной смеси / С.И. Планковский, О.В. Шипуль, О.В. Трифонов, О.С. Борисова // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, № 46, 2010. – С.75-87.
73. Gillespie L. *Deburringandedgefinishinghandbook* / L. Gillespie. – NewYorkCity: IndustrialPress, 1999. – 404 p.
74. Назначение режимов обработки для автоматизированных термоимпульсных установок в условиях информационно-интегрированного производства [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, В. Л. Малашенко, В. Г. Козлов // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. научных трудов «ХАИ»*. – Вып. 45. – Х., 2012. – С. 67-77.
75. Современное состояние и перспективы развития технологий финишной отделки прецизионных деталей летательных аппаратов / С.И. Планковский, А.В. Лосев, О.В. Шипуль, О.С. Борисова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 2 (69). – С. 39-47.
76. Лосев А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08; защищена 14.05.1995; утв. 07.10.1995 / Лосев Алексей Васильевич. – Х., 1995. – 210 с.
77. Мазниченко С.А. Об особенностях смесеобразования в тепловых приводах импульсного оборудования / С.А. Мазниченко, С.И. Планковский, О.С.Борисова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 7 (44). – С. 45-52.
78. Моделирование термоимпульсной обработки с учетом неоднородности топливной смеси / С.И. Планковский, О.В. Шипуль, О.В.Трифонов, О.С. Борисова // *Открытые информационные компьютерные технологии*. – 2010. – №3. – С. 37-47.
79. Математическое моделирование горения топливной смеси в камерах термоимпульсных машин с учетом перехода сгорания в детонационный режим / С.И. Планковский, О.В. Трифонов, О.В. Шипуль, В.Г. Козлов // *Авиационно-космическая техника и технология*, 2012, № 1 (88). – С.5-9.
80. Назначение режимов обработки для автоматизированных термоимпульсных установок в условиях информационно-интегрированного производства / С.И. Планковский, О.В. Шипуль, В.Л. Малашенко, В. Г. Козлов // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии* № 56, 2012. – С.67-77.
81. Методика расчета тепловых потоков при термоимпульсной обработке детонирующими газовыми смесями / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, Е. С. Палазюк, С. А. Красовский // *Авиационно-космическая техника и технология*, 18 2014, № 6 (113). – С.17-23.
82. Борисов Е.В., Мартынов О.Г., Миронов В.Н. Обезжелезивание глины в детонирующих газовых смесях // *Тепло- и массоперенос-97*. Минск: ИТМО, 1997. С.69-73.
83. Способ детонационной штамповки и устройство для его реализации. Межд. патент WO 2016/ 060582 A1.
84. Ударно-волновая газодинамическая установка для формирования бетонных объектов с пустотами. Патент РФ 2169073.
85. Способ уплотнения пористой массы в газовом баллоне и установка для его осуществления. Патент РФ № 2079769.
86. Способ измельчения и плавления снежно-ледяной массы и устройство для его реализации. Межд. патент WO 2015/099553 A1.
87. Сакул А.В., Хилько Ю.В., Корытченко К.В. Численное моделирование внутрибаллистических процессов в газодетонационной установке метания тушащих веществ // *Проблемы пожарной безопасности*.

- Сборник научных трудов. Выпуск 36, 2014. – С.208-217.
88. Применение детонации водородовоздушной смеси в устройствах для безыгольной инъекции / В. В. Голуб, Т. В. Баженова, Д. И. Бакланов, К. В. Иванов, М. С. Кривокорытов // Теплофизика высоких температур, 2013, том 51, выпуск 1, С.147–150.
 89. Лукьянчиков Л. А. Системы инициирования на вторичных взрывчатых веществах // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, № 5. – С.48-61.
 90. Григорьев В. В., Лукьянчиков Л. А., Пруэлл Э. Р. Поджигание частиц тэна волной газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 2. С. 133–138.
 91. Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А., Митрофанов В. В., Тесленко В. С. Возбуждение детонации порошковых ВВ взрывом газовых смесей // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 4. С. 153–155.
 92. Кріль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі АРМWinMachine. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2011. – 388 с.
 93. Соколов В.І., Кріль О.С., Спіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
 94. Кріль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
- ### References
1. Selivanov, VV, Explosive technologies: a textbook for high schools / V. V. Selivanov, I. F. Kobylkin, S. A. Novikov. - 2 nd ed., Pererab. and additional. - Moscow: Publishing house MSTU. NE Bauman, 2014. - 519 p.
 2. Kharlamov, Yu. A., Detonation-gas processes in industry / Yu. A. Kharlamov, NA Budagyants; East-Ukr. state. un-ty. - Lugansk: Publishing house of VUGU, 1998. - 223 c.
 3. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective / G.D. Roya, S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer // Progress in Energy and Combustion Science, 30 (2004). – P. 545–672.
 4. Shorshorov M.H., Kharlamov Yu.A. Physicochemical bases of detonation-gas spraying of coatings. - Moscow: Nauka, 1978. - 224 p.
 5. Frolov S.M. The science of combustion and the problems of modern energy // Ros. chem. f. (Zh.M., D.I. Mendeleev Chemical Society of the Russian Federation), 2008, vol. LII, No. 6. - P.129-134.
 6. Nikolaev Yu.A., Vasilyev AA, Ulyanitsky V.Yu. Gas Detonation and its Application in Engineering and Technology // Physics of Combustion and Explosion. 2003. T. 39, No. 4. P. 22-54.
 7. Bazhenova TV, Golub V.V. Use of gas detonation in controlled frequency mode // Physics of combustion and explosion. 2003. T. 39, No. 4. P. 3-21.
 8. Voitsekhovskiy BV, Mitrofanov VV, Topchiyan ME The structure of the detonation front in gases. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1963.
 9. Detonation waves in condensed media / AN Dremine, SD Savrov, VA Trafimov, K. K. Shvedov. M.: Nauka, 1970.
 10. Shchelkin KI, Troshin Ya.K. Gas dynamics of combustion. - Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. - 1963.-256 p.
 11. Netleton M. Detonation in gases: Trans. with English. - M.: Mir, 1989. 280 p.
 12. Zel'dovich Ya. B., Kompaneets AS Theory of detonation. Moscow: Gostekhizdat, 1955.
 13. Nikolaev Yu. A., Topchiyan M. Ye. Calculation of equilibrium flows in detonation waves in gases // Physics of combustion and explosion. 1977. Vol. 13, No. 3. P. 393-404.
 14. Nikolaev Yu. A., Gaponov OP On the limits of detonation in gases // Physics of Combustion and Explosion. 1995. T. 31, No. 3. P. 139-145.
 15. AA Vasiliev, Geometric limits of the propagation of gas detonation, Fiz., Combustion and Explosion. 1982. Vol. 18, No. 2. P. 132-136.
 16. VI Mangaleley, Limits of low-velocity detonation of gas mixtures, Fiz., Combustion and Explosion. 1999. Vol. 35, No. 3. P. 89-96.
 17. Frolov, SM and Gel'fand, BE, On the limiting diameter of the propagation of gas detonation in pipes, Dokl. AN SSSR. 1990. T. 312, No. 5. P. 1177-1180.
 18. Agafonov GL, Frolov SM Calculation of the limits of detonation of gas hydrogen-containing mixtures // Physics of Combustion and Explosion. 1994. Vol. 30, No. 1. P. 92-100.
 19. Khariton Yu. B. About the detonation ability of explosives. // Questions of the theory of explosives. M.; L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1947. No. 1. P. 7-28.
 20. Frolov, SM, Impulse detonation combustion: a new generation of power plants, Integral. 2008. № 3 (41). Pp. 44-45.
 21. Zel'dovich Ya. B. On the question of the energy use of detonation combustion // Journal of Technical Physics. - 1940. - T.10. - Вып. 17. - P. 1453.
 22. Bulat PV, Denisenko P.V., Volkov K.N. Trends in the development of detonation engines for high-speed aerospace aircraft and the problem of triple shock wave configurations. Part I - Studies of detonation engines // Scientific and Technical Herald of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2016. T. 16. № 1. - P. 1-21.
 23. Frolov S.M. Pulse detonation engines. Moscow: Torus Press, 2006. 592 p.
 24. <http://www.google.com.pg/patents/WO2015099552A1?cl=ru&hl=ru>
 25. <https://www.kommersant.ru/doc/3283615>
 26. Sosnovskaya A.V. Detonation-ejector electrogenerator // Materiali II-i All-Ukrainian scientific-practical conference-students, aspirants and young adults "Actual problems of the future energy". - Kherson: KhNTU, 2017. - P.95-96.
 27. A method for direct conversion of the energy of pulsed detonation combustion of fuel into electrical energy and an alternating current generator for its implementation. Patent of the Russian Federation No. 2418968.
 28. http://adam-armen.ru/article8/s8_rus.html
 29. Sychevsky VA, Borisov EV, Mironov V.N. The use of numerical modeling for the choice of parameters of gas flows in shock-detonation technologies // V Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. May 24-28, Minsk, 2004.
 30. Borisov EV, Yaglov VN, Babushkin O.S. Method for obtaining powders of refractory oxides. A.S. 1649738 (USSR).
 31. Gasothermic coatings from powder materials: Reference / Yu.S. Borisov, Yu.A. Kharlamov, S.L. Sidorenko, E.N. Ardatovskaya. - Kiev: Naukova Dumka, 1987. - 544 p.

32. Bukaemsky A.A. Nanopowder of zirconia. Explosive method of obtaining and properties // Physics of combustion and explosion. 2001. P. 37, No. 4. P. 129-134.
33. Voronin V.N. Technology of balancing of abrasive wheels used for grinding friction pairs by methods of detonation deposition // Izvestiya Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences, vol. 18, No. 4 (2), 2016. - P.237-241.
34. Detonation technologies of balancing and hardening of abrasive wheels / M.V. Nenashev, D.A. Demoretsky, I.D. Ibatullin, S.G. Ganigin, A.N. Zhuravlev, R.G. Grishin, A.S. Dyakonov, V.N. Voronin // Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012. T.14. №1 (2).C.409-412.
35. Voronin VN, Ibatullin ID Technology of hardening and balancing of abrasive wheels [Electronic resource] // Engineering bulletin of the Don. 2014. №2. URL:<http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2372>.
36. Electronic Scientific Journal "Oil and Gas Business", 2012, No. 4
37. A system for deposition of coatings by deposition from the gas phase in a stream of gas detonation products / S.Yu. Ganigin, A.Yu. Murzin, O.Yu. Glazunov, P.K. Kondratenko, M.V. Nenashev, I.V. Nechaev // Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vol. 16, No. 1 (2), 2014. - P.385-389.
38. Destruction of the mountain massif by explosion-action machines. Moscow: Nauka, 1974. - 230 p.
39. Explosive destruction of rocks. - Moscow: Nauka, 1979. - 212 p.
40. Methods of external cleaning of waste-heat boilers / Ya.M. Shchelokov, E.M. Telegin, V.N. Podymov, V.I. Gasnikov. - Kazan: Publishing House of KSU, 1974. - 213 p.
41. Shchelokov YM, AvvakumovAM, SazykinYu.K. Cleaning of the heating surfaces of waste heat boilers. - Moscow: Energoatomizdat, 1984. - 160 p.
42. Ac. № 674886 (USSR). Method of manufacturing a diamond-abrasive tool / V.V. Pimenov, N.D. Suslikova, N.I. Kornilov, Yu.A. Kharlamov et al.
43. Ac. No. 669531 (USSR). Method of crushing of superhard cracked material. Pimenov, N.D. Suslikova, N.I. Kornilov, Yu.A. Kharlamov et al.
44. <http://otvaga2004.ru/kaleydoskop/kaleydoskop-ammo/boepripasy-obyomnogo-vzryva/>
45. Stakhovsky O.V. Initiation of detonation in an unlimited volume // Mehannikatachanobuduvnya, 2009, No. 1. - P.174-181.
46. Sirotenko AM, Dovbnya AM, Stakhovsky OV, Koritchenko K.V. Застосування бронетанкової техніки для розмінування мінівихових загорджен / Mehanika that machinebuilding. - 2006. - №1. - P.178-188.
47. Sirotenko AN, Dovbnya AN, Stakhovsky OV, Korytchenko KV Creation of a detonation-capable mixture in a gas jet with an application for the demining of minefields. Mekhanikata machinebuilding. - 2006. - №1. - P.166-177.
48. Patent of Ukraine on the Wine № 78083 dated: 21.02.2005 IPC7: F41H11 / 12 The process of rozmiznuyannaminnovibuhovihzagorodzhenn / Sirotenko AM, Yanchik OG, Stakhovsky OV, Koritchenko KV, Larin O .YU.
49. Serpukhov AV, Sirotenko AN, Stakhovsky OV, Korytchenko KV Technical means of demining minefields by an explosive method. Mekhanik ta mashinobuduvannya, Khar'kov: KhPI. - 2007. - №1. - P.48-55.
50. Serpuhov O.V. Specialnyeobladnannya to armored vehicles for rozshirennakoliynihprohodiv u minnovibuhovihzagorodzhenni // Sistemibrobkiiinformatsii, Kharkiv: HUPS. - 2008. - S.
52. Borisov E.V. and others.The method of processing the bottomhole formation zone.A.S. 1405384 (USSR).
53. Borisov E.V. Method of processing bottomhole formation zone.A.S. 1595069 (USSR).
54. Snitka NP, NorovZh.A., NorovA.Yu. Methods for recovering the productivity of water intake technological wells // GornyVestnik of Uzbekistan, 2015, No. 1 (60). - C.6-8.
55. Method of disposal of ammunition. Patent of the Russian Federation No. 2137089.
56. Geophysical methods of research / V.K. Khmelevskoy, Yu.I. Gorbachev, A.V. Kalinin, M.G. Popov, N.I. Seliverstov, V.A. Shevnin. - Petropavlovsk-Kamchatsky: publishing house KSPU, 2004, 232 p.
57. Installation of gas detonation. A.S. 603929 (USSR).
58. Kostyuchenko VN, Kocharyan GG, Svintsov IS The device for multiple creation of seismic waves in a massif of rocks. Patent of the Russian Federation No. 2199660.
59. Trifonov, OV, "Current state of technology and equipment for cleaning deburring gas mixtures from burrs and the direction of their improvement," OV Trifonov, in: Problems of Design and Production of Aircraft Structures. - 2013. - Issue. 1. - P. 115-121.
60. Modeling of heat transfer in the case of attenuation of shock waves in a closed chamber / SI Plankovskii, OV Shipul, OV Trifonov, ES Palazyuk, VL Malashenko // Aviation and space technology and technology, 2014, No. 1. - P.104-109.
61. Simulation of the process of deburring with thermoimpulse treatment of detonating mixtures / SI Plankovskii, A.V. Gaidachuk, OV Shipul, ES Palazyuk // Aviation and space technology and technology. - 2013. - No. 3 (100). - P. 4-11.
62. Calculation of heat fluxes during thermoimpulse treatment with prechamber-torch arson / O.V. Shipul, E.V. Tsegelnik, V.L. Malashenko, S.A. Krasovskiy // Open information and computer integrated technologies No. 62, 2013. - P.89-97.
63. Pak N.I. Numerical modeling of the process of thermal deburring by concentrated energy flow / N.I. Pak, S.A. Shikunov // Processing of materials by impulse loads. - Novosibirsk, 1990. - P. 168-175.
64. Manzhaley VI. Damping of shock waves and heat transfer to bodies after detonation of gas in the chamber.Manzhaley - Novosibirsk, 1989. - P. 123-132.
65. Elaboration of technological modes of deburring from aluminum alloy parts by gas-pulse method: Report, Inv. №02830007717. - Novosibirsk. - 1982. - 103 p.
66. Losev A.V. Improving the efficiency of stripping of parts of pneumatic and hydro-fuel systems using the thermoimpulse method: dis. ... cand. tech. Sciences: 05. 02. 08.A.V. Losev. - H., 1995. - 210 p.
67. Fadeev VA Providing industrial purity of engineering products in production using the thermoimpulse method / V.A. Fadeev, A.V. Losev, OA Loseva // Cutting and the tool in technological systems: Intern. scientific-techn. Sat. - NTU "KhPI", H., 2006. - Issue. 70. - P. 516 - 512.
68. Calculation of heat fluxes during thermoimpulse treatment with prechamber-torch arson / O.V. Shipul, E.V. Tsegelnik, V.L. Malashenko, S.A. Krasovskiy // Open information and computer integrated technologies No. 62, 2013. - P.89-97.

69. Zhdanov OA Thermoimpulse cleaning technologies inverting parts of aggregates in aviatsynnyhdvigniv. Autoref ... act. - KhAI, 2003. - 19 p.
70. Analytical model for the removal of microparticles by detonating gas mixtures during the purification of GTE parts / IB Kuznetsov, VP Bozhko, EV Tsegelnik, DA Brega // Aviation and space technology and technology, 122 2016, No. 8 (135). - P.122-127.
71. Plankovski SI, Shipul O.V. Problems of the Development of Finishing Techniques and Cleaning by Intensive Heat Flows. Probl.machine building, 2011, T. 14, № 2. - P.72-82.
72. Modeling of thermoimpulse treatment taking into account the heterogeneity of the fuel mixture / S.I. Plankovsky, O.V. Shipul, O.V. Trifonov, O.S. Borisov // Open information and computer integrated technologies, No. 46, 2010. - P.75-87.
73. Gillespie L. Deburring and edge finishing handbook / L. Gillespie. - New York City: Industrial Press, 1999. - 404 p.
74. Designation of processing modes for automated thermoimpulse plants in conditions of information-integrated production [Text] / SI Plankovskiy, OV V. Shipul, VL Malashenko, VG Kozlov // Open information and computer integrated technologies : Sat. scientific works "KhAI". - Вып. 45. - Н., 2012. - P. 67-77.
75. The current state and prospects for the development of finishing technologies for precision parts of aircrafts / S.I. Plankovsky, A.V. Losev, O.V. Shipul, O.S. Borisova // Aviation and space technology and technology. - 2010. - No. 2 (69). - P. 39-47.
76. Losev A.V. Improving the efficiency of stripping of parts of pneumatic and hydro-fuel systems using the thermoimpulse method: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.02.08; is protected on May 14, 1995; ut.10.10.1995 / Losev Alexey Vasilyevich. - Н., 1995. - 210 p.
77. Maznichenko S.A. On the features of the mixture formation in thermal drives of pulsed equipment / S.A. Maznychenko, S.I. Plankovsky, OS Borissova // Aviation and space technology and technology. - 2007. - No. 7 (44). - P. 45-52.
78. Modeling of thermoimpulse treatment taking into account the heterogeneity of the fuel mixture / S.I. Plankovsky, O.V. Shipul, OV Trifonov, O.S. Borisov // Open information computer technologies. - 2010. - №3. - P. 37-47.
79. Mathematical modeling of combustion of a fuel mixture in the chambers of thermo-pulsed machines, taking into account the transition of combustion into a detonation regime / S.I. Plankovsky, O.V. Trifonov, O.V. Shipul, V.G. Kozlov // Aviation and Space Technology and Technology, 2012, No. 1 (88). - C.5-9.
80. Purpose of processing modes for automated thermoimpulse plants in the conditions of information-integrated production / S.I. Plankovsky, O.V. Shipul, V.L. Malashenko, VG Kozlov // Open information and computer integrated technologies No. 56, 2012. - P.67-77.
81. A method for calculating heat fluxes in the thermoimpulse treatment with detonating gas mixtures. SI Plankovskii, OV Shipul, ES Palazyuk, SA Krasovskii // Aviation and Space Technology and Technology, 18 2014, No. 6 (113). - P.17-23.
82. Borisov EV, Martynov OG, Mironov VN Dehydration of clay in detonating gas mixtures. Heat and mass transfer-97. Minsk: ITMO, 1997. P.69-73.
83. Detonation stamping method and device for its implementation. Int. patent WO 2016/060582 A1.
84. Shock-wave gas-dynamic installation for the molding of concrete objects with voids. Patent of the Russian Federation No. 2169073.
85. A method for compacting a porous mass in a gas container and an installation for carrying it out. Patent of the Russian Federation No. 2079769.
86. A method for grinding and melting a snow-ice mass and a device for its implementation. Int. patent WO 2015/099553 A1.
87. Sakun AV, Khil'koYu.V., Korytchenko K.V. Numerical simulation of intraballistic processes in a gas detonation installation of quenching substances / / Problems of fire safety. Collection of scientific papers. Issue 36, 2014. - P.208-217.
88. Application of detonation of a hydrogen-air mixture in devices for needleless injection / VV Golub, TV Bazhenova, DI Baklanov, KV Ivanov, MS Krivokorotov // Thermophysics of High Temperatures, 2013, vol. 51, issue 1, C.147-150.
89. Luk'yanchikov LA Systems of initiation on secondary explosives // Applied Mechanics and Technical Physics. 2000. Vol. 41, No. 5. - P.48-61.
90. Grigoryev VV, Lukyanchikov LA, Prueel E. R. Ignition of the particles of the ten by a wave of gas detonation // Physics of Combustion and Explosion. 1997. Vol. 33, No. 2. P. 133-138.
91. Andreev VV, Lukyanchikov LA, Mitrofanov VV, Teslenko VS The excitation of detonation of powder explosives by the explosion of gas mixtures // Physics of combustion and explosion. 1980. V. 16, No. 4. P. 153-155.
92. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
93. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
94. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.

Харламов Ю.О. Розвиток детонаційно-газових технологій

Розглянуто особливості газової детонації як джерела енергії. Систематизовані та проаналізовані основні області практичного застосування газової детонації в промисловості, на транспорті і в енергетиці. Показано, що більш висока ефективність згоряння являється в детонаційному режимі обумовлює перспективність розширення сфер застосування газової детонації.

Ключові слова: вибухові речовини, газова детонація, детонаційна хвиля, щодвигун, напілення, пристрій, енергетична установка.

Kharlamov Y.A. Development of gaseous detonation technologies

The features of gas detonation as a source of energy are considered. Systematized and analyzed are the main areas of practical application of gas detonation in industry, transport and energy. It is shown that the higher combustion efficiency of the fuel in the detonation mode determines the prospects for expanding the areas of application of gas detonation.

Key words: explosives, gas detonation, detonation wave, engine, spraying, device, power plant.

Харламов Ю.О. – д.т.н., професор, професор кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**