

УДК 536.46+662.611/612

*д.т.н. Харламов Ю. А.,  
к.т.н. Петров П. А.,  
к.т.н. Козачишен В. А.,  
к.т.н. Изюмов Ю. В.  
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

## **ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ. СООБЩЕНИЕ 1. ГАЗОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ДВИГАТЕЛЯХ И ЭНЕРГЕТИКЕ**

*Кратко рассмотрены сущность, преимущества и недостатки детонационного сгорания газов, его энергетическая эффективность и перспективные направления использования. В Сообщении 1 систематизированы данные о практическом использовании явления газовой детонации для совершенствования и разработки новых типов двигателей внутреннего сгорания, а также в энергетике при создании энергосберегающих горелочных устройств, производства электроэнергии и очистки поверхностей нагрева агрегатов, сжигающих различные виды жидкого и твердого топлива.*

***Ключевые слова:** взрывные технологии, детонационно-газовые устройства, энергетическое оборудование, горелочные устройства, дефлаграция, детонационная волна, детонация стационарная, ротационная, нестационарная, пульсирующая.*

**Введение.** Взрывные технологии находят все более широкое применение в мирных целях, например, в добывающих отраслях промышленности, в машиностроении для сварки, упрочнения и др. Применение взрывных технологий позволяет в короткие сроки с приемлемыми затратами решать многие технологические проблемы, в том числе возникающие при создании новой техники. Для реализации взрывных технологий используются заряды твердых взрывчатых веществ (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 распола-

гаются в специальных защитных взрывостойких камерах (взрывных камерах), являющихся по сути промышленными взрывными установками. Тем не менее широкое применение твердых ВВ ограничено, прежде всего, по требованиям безопасности. Поэтому всё возрастающее внимание вызывает использование более безопасного и удобного источника энергии в виде газовой детонации (ГД) [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.

Детонационный режим горения отличается от обычного (дефлаграционного) более быстрым выделением энергии, более высокими температурами и давлением продуктов сгорания. Термодинамически детонация — самый эффективный способ прямого сжигания горючего [1]. Этим объясняется

развитие научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по использованию управляемой детонации в энергетических установках, технологических горелках, 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). После длительных фундаментальных исследований (более чем 100 лет) расширяется опыт практического использования явления ГД в промышленности, науке и технике. Первые результаты практического применения ГД описаны в работе [2], однако за истекшее время детонационно-газовые технологии получили дальнейшее развитие.

Расширение областей применения ГД приводит к необходимости более детальной разработки конструкций детонационно-газовых устройств (ДГУ) и технологий для решения большого круга специфических задач. Проведенные к настоящему времени экспериментальные и теоретические исследования рабочих процессов и НИОКР по созданию новых ДГУ представляют большую научную и практическую ценность, однако носят разрозненный характер, что сдерживает поиск новых областей применения ГД, их детальную разработку и оценку их эффективности.

Целью данной статьи является анализ и систематизация практических применений газовой детонации и основных направлений НИОКР по ее практическому использованию, опыта ее применения в основных отраслях экономики, науки и техники, а также анализ перспектив дальнейшего развития.

**Детонационное горение газов в каналах (газовая детонация (ГД)).** Детонационная волна (ДВ) в газовой смеси представляет собой многофронтный газодина-

мический комплекс [1, 2]. Движение поперечных волн в стационарно распространяющейся ДВ носит квазипериодический характер, а их траектории образуют упорядоченную структуру с характерным поперечным масштабом — размером ячейки  $a$ . Размер ячейки характеризует минимальные размеры канала для распространения детонации, критическую энергию инициирования детонации, условия возбуждения детонационного режима сгорания смеси и пр. В теории газовой детонации для расчета осредненных характеристик процесса широко используются идеализированные классические представления о ДВ.

*Идеальная детонационная волна* в 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. Непосредственно к УВ примыкает зона индукции — область изотермической цепной реакции с приблизительно постоянными значениями температуры  $T$  и давления  $p$  (пик Неймана) [1]. Здесь температура и плотность  $\rho$  в несколько раз, а давление — в десятки раз превышают значения перед УВ. 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  $(1,7\div 1,9) \rho_0$  (где  $\rho_0$  — начальная плотность).

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  $D$ , 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.

Детонационные волны при  $D > D_{CJ}$  и  $p > p_{CJ}$  называются пересжатыми. Они возбуждаются под воздействием волн сжатия, догоняющих фронт, и без их «поддержки» быстро замедляются. Даже небольшое пересжатие волны (по скорости детонации) приводит к резкому увеличению давления, плотности и массовой скорости газа [1], 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 теплотерь и при некотором предельном диаметре звуковая скорость газа становится не достижимой ни при каких значениях  $D$ . Количественно этот диаметр близок к предельному диаметру реальной детонации, который приблизительно на порядок меньше размера ячейки многофронтной детонации [1]. Дефицит скорости предельной детонации зависит от состава смеси и может равняться 10÷30 %. Вблизи пределов влияние затухания турбулентности и влияние теплотерь сравниваются, и численные модели, учитывающие оба фактора и только взаимодействие ПД со стенками канала, дают приблизительно одинаковые результаты.

С помощью предположения об экспоненциальной зависимости скорости химического тепловыделения от температуры и условия роста температуры за УВ академиком Я. Б. Зельдовичем [1] 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. Однако

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. Тем не менее модель [1] дает правильные результаты.

Потери энергии на трение и теплоотвод зависят от формы канала и шероховатости его стенок. 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. Любая смесь с экзотермической реакцией способна детонировать в каналах достаточно большого размера (принцип Харитона) при достаточно большой энергии инициирования.

Особенности горения газов и распылов топлива в детонационном режиме определяют возможность его использования для многих практических применений. Устройства, использующие газовую детонацию, могут быть как импульсными, так и непрерывного действия.

Термодинамически детонация — самый эффективный способ прямого сжигания горючего. Именно поэтому в настоящее время активно разворачиваются научные исследования, направленные на применение в энергетических установках управляемой детонации [2].

Согласно расчету по классической теории Жуге, при детонационном сгорании плотность продуктов в 2 раза превышает плотность начальной смеси, давление в 2 раза больше давления, развиваемого при взрыве в замкнутом объеме, температура на 10÷20 % превышает температуру при взрыве в замкнутом объеме, скорость потока продуктов сгорания составляет до половины скорости детонационной волны, что означает, что 17 % всей энергии смеси переходит в кинетическую энергию. Расчетное значение КПД детонационного сгорания

превышает КПД горения при постоянном объеме на 13 % [1]. Абсолютное преимущество детонации Чепмена — Жуге проявляется только при использовании кинетической энергии продуктов детонации.

Проблемы пульсирующей детонации интенсивно изучаются и широко обсуждаются в научной литературе. Установлено, что идеализированная схема процессов в камерах сгорания, положенная в основу расчетов, сильно отличается от реальности. В основу расчетов закладывается представление о том, что в камере возникает стационарная детонация (режим Чепмена — Жуге). В реальности после поджига смеси переход горения в детонацию происходит на значительном расстоянии. Полученная в экспериментах скорость образовавшейся детонационной волны не сразу достигает значений скорости стационарной детонации Чепмена — Жуге. Смещение вводимых топлива и окислителя происходит не мгновенно, необходимо принятие специальных мер для уменьшения пути смешения.

Ниже рассмотрены основные разработки по практическому использованию газовой детонации в промышленности и обслуживающих отраслях экономики.

**Применение ГД в двигателях внутреннего сгорания.** Детонация недопустима в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Поиски средств борьбы с детонацией — предмет неустанных исследований учёных и инженеров разных специальностей. Вследствие детонации падает мощность двигателя, повышается удельный расход топлива, резко понижается надёжность двигателя вследствие быстрого износа и разрушения ответственных деталей (клапанов, поршней, колец). Известны попытки создания гибридного детонационно-поршневого двигателя, в котором вместо выхлопных труб установлены детонационные трубы, создающие реактивную тягу [3].

Совершенствование современных авиационных двигателей и энергетических ма-

шин 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.

Импульсный детонационный двигатель (Pulsing Detonating Engine — PDE — в международной терминологии) является наиболее интересным примером импульсного детонационного устройства [4]. Простейшим примером PDE может служить детонационная труба с открытым концом. На закрытом конце устанавливаются инжекторы для подачи горючего и окислителя. После заполнения трубы смесью детонация может быть инициирована в двух различных положениях: на закрытом или открытом конце. В любом случае давление продуктов детонации на закрытый конец трубы производит тягу. Скорость детонационного поршня на два порядка выше скорости нормального горения. Частота циклов может варьироваться путем независимого инициирования детонации контролируемой системой зажигания. Поэтому одним из основных прорывных направлений является разработка непрерывно-детонационных и ротационно-детонационных двигателей.

Совершенствование двигательных установок заключается главным образом в повышении удельной мощности реализации запасенной энергии при минимальном изменении массогабаритных характеристик. Аналитический и численный анализ модели обобщенного пульсирующего детонационного двигателя показал перспек-

тивность использования этого устройства в авиации и ракетной технике. Детонационный двигатель использует термодинамически эффективный цикл при постоянном объеме. Весогабаритные характеристики детонационного двигателя соизмеримы с характеристиками турбореактивного двигателя. Преимущество детонационного двигателя с автоматическим подсосом воздуха в полете состоит также в том, что в нем отсутствуют движущиеся части.

По 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. Смесью периодически сгорает в бегущих детонационных волнах, а горячие продукты детонации выбрасываются с высокой скоростью в окружающее пространство через сопло, создавая реактивную тягу. 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 с при работе на углеводородном горючем. При числе Маха полета выше 3 импульсный детонационный двигатель становится эффективнее не только ПВРД, но и турбореактивного двигателя [4].

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 удастся получить периодическую детонацию керосино-воздушной смеси на длине 1,5 м при зажигании обыч-

ной автомобильной искрой. Энергия зажигания детонации понизилась более чем в 10000 раз, одновременно длина трубы уменьшилась более чем в 10 раз.

Ведущие позиции по разработке детонационных двигателей занимает специализированный центр Seattle Aerosciences Center (SAC) компании Pratt and Whitney, исследовательский центр United Technologies Research Center (UTRC) и фирма Boeing Phantom Works. Проекты по детонационному горению в США включены в программу разработок перспективных двигателей ИРТЕТ. В кооперацию входят практически все исследовательские центры, работающие в области двигателестроения, многие научные центры и университеты. Большой объем работы по клапанному детонационным двигателям выполнен в Институте химической физики РАН (ИХФ). В России над этой проблемой работают многие университеты и институты Российской Академии наук (РАН): ЦИАМ им. П. И. Баранова, ИХФ, Институт машиноведения РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Новосибирский институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева (ИГиЛ), ИТПМ 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 (stationary detonation), ротационную детонацию (rotating detonation), когда детонация является стационарной во вращающейся системе координат, нестационарную детонацию (transient detonation) и пульсирующую детонацию (pulsating detonation). Соответственно, могут быть созданы детонационные двигатели с непрерывной детонацией (CDE), ротационно-детонационные двига-

тели (RDE) и импульсно-детонационные двигатели (PDE).

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 пересжатой 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.

**Силовые установки на детонации природного газа.** Эксплуатационные требования по весу, геометрическим размерам и рабочей частоте ИДД относятся главным образом к силовым установкам летательных аппаратов (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 иницирования 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.

**Силовые установки надводных и подводных аппаратов и транспортных средств различного назначения.** Принцип нового типа движителя для скоростного водного транспорта — прямоточного импульсно-детонационного гидрореактивного движителя (ИДГРД) — предложен в работах [5]. В ИДГРД гидрореактивная тяга создаётся импульсно периодическими ударными волнами, выходящими в прямоточный водовод из камеры сгорания (КС), в которой происходит циклическое импульсно-детонационное сгорание топлива.

Периодическое вытеснение забортной воды из водовода происходит под действием расширяющихся продуктов детонации горючей смеси, в котором заборная 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 водоза-

борным 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.

В отличие от других известных движителей в ИДГРД происходит прямое преобразование химической энергии топлива в кинетическую энергию направленного движения забортной воды, т. е. в нём отсутствуют какие-либо промежуточные подвижные элементы типа гребного винта, импеллера и т. д. Наибольшая эффективность передачи количества движения от ударных волн к забортной воде (наибольший удельный импульс) достигается при газосодержании воды в водоводе на уровне 20÷25 %, т. е. рабочее тело в водоводе — сжимаемая пузырьковая жидкость. Такое газосодержание воды может быть обеспечено газообразными продуктами детонации предыдущего цикла.

**Возможные применения ИДД.** В связи с дороговизной земли возрастает доля высотного строительства. В её стоимости противопожарные системы и их обслуживание весьма весомы. Они сложны, требуют по-

стоянного обслуживания и часто выходят из строя именно при пожарах. Наземные транспортные средства, в их лучших образцах, не могут подать материалы и оборудование на высоту более 60 м. Обеспечение пожарного ведомства дешевой и надежной аэромобильной техникой позволит снизить стоимость квадратного метра жилья и стоимость его обслуживания, что может дать дополнительные финансовые ресурсы. По топливной эффективности летающая платформа значительно уступает вертолету [6]. Использование пульсирующего двигателя в качестве усилителя тяги позволит уменьшить это различие и успешно конкурировать в тех областях, где использование вертолета недостаточно выгодно, имеет ограничения или невозможно, например, для противопожарного обслуживания высотных объектов. Летающая платформа может быть использована как безопорное транспортное средство в системе МЧС для противопожарного обслуживания высотных объектов, для судов с малым водоизмещением — как ЛА корабельного базирования, а также как носитель системы залпового огня или средств ПВО, имеющий возможность быстро занимать позицию для пуска вне зависимости от состояния грунта и рельефа местности и быстро уходить с занятой позиции.

**Применение ГД в энергетике. Горелочные устройства.** В существующих горелочных устройствах химическая энергия горючего преобразуется в тепло и механическую работу за счет медленного горения — дефлаграции. При детонации химическая реакция окисления горючего протекает в режиме самовоспламенения при высоком давлении за сильной ударной волной. Если при дефлаграции воздушных смесей углеводородных горючих мощность тепловыделения с единицы площади поверхности фронта реакции составляет  $\sim 1 \text{ МВт/м}^2$ , то мощность тепловыделения в детонационном фронте приблизительно на 4 порядка выше —  $\sim 10000 \text{ МВт/м}^2$ . Кроме того, в отличие от продуктов медленного

горения продукты детонации обладают огромной кинетической энергией: скорость продуктов детонации в  $\sim 20 \div 25$  раз выше скорости продуктов медленного горения. Если вместо существующих камер сгорания с непрерывным горением использовать импульсно-детонационные камеры сгорания с периодическим заполнением камеры горючей смесью и сгоранием смеси в бегущей волне детонации, то такие камеры сгорания могли бы дать большие выгоды при использовании в энергетике благодаря совмещению комбинированного ударно-волнового (механического) и теплового воздействий на объекты, обдуваемые продуктами детонации [7].

Импульсно-детонационное горение в энергетике не применяли в связи с проблемой циклического инициирования детонационной волны: для получения детонации в каждом цикле необходимо использовать либо очень мощный источник энергии, генерирующий сильную ударную волну (УВ), либо обеспечить переход горения в детонацию (ПГД), используя, например, очень длинные гладкие трубы или трубы с регулярными препятствиями. Детонационная способность воздушных смесей практических топлив при нормальных условиях очень низка. В [7] впервые экспериментально доказана возможность управляемого циклического ПГД в трубе диаметром 94 мм с открытым концом на длине около  $2,5 \div 3,0$  м (с учетом размера форкамеры и устройства ускорения пламени) при отдельной непрерывной подаче природного газа и воздуха. Максимально возможная частота детонационных циклов в созданном образце ИДГУ — около 30 Гц. Такую частоту циклов можно получить при «мгновенном» заполнении трубы горючей смесью. При использовании высоконапорных компрессоров скорость заполнения может достигать  $\sim 100$  м/с, и на образце ИДГУ можно получить достаточно высокую частоту импульсов до  $\sim 15$  Гц.

Проблема инициирования детонации была решена в результате тщательного

подбора формы и расстановки препятствий турбулизаторов, обеспечивающих оптимальное согласование темпов ускорения пламени и усиления УВ, впервые экспериментально доказана возможность быстрого циклического ПГД в условиях высокоскоростного течения ( $\sim 10$  м/с) с отдельной подачей топливных компонентов — природного газа (98,9 % метана) и воздуха — в трубе диаметром 150 мм с открытым концом при слабом источнике зажигания с энергией  $\sim 1$  Дж. Достигнутая на экспериментальной установке максимальная частота циклов — 2 Гц. Результаты исследований используются при разработке промышленного горелочного устройства нового типа — импульсно-детонационной горелки для скоростного нагрева и фрагментации, совмещающей комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения: тепловое и ударно-волновое (механическое).

Опытный образец ИДГУ имеет следующие основные технические характеристики [7]: тепловая мощность — от 2000 до 2500 кВт (соответствует мощности наиболее распространенных скоростных горелок обычного типа); максимальная скорость продуктов детонации в выходном сечении — регулируемая, от 400 до 1500 м/с; рабочая частота — регулируемая, от 0,01 до 2 Гц; максимальная температура продуктов детонации в выходном сечении — регулируемая, от 1400 до 2500 °С; максимальное избыточное давление продуктов детонации в выходном сечении — регулируемое, от 2 до 14 атм; энергия зажигания — не более 1,0 Дж; длина горелочного тракта — не более  $5\div 6$  м. Указанные характеристики должны быть достигнуты при сниженном расходе природного газа и сниженной эмиссии оксидов азота по сравнению с существующими скоростными горелками равной тепловой мощности. Горелка предназначена для применения в нагревательных печах металлургической и других отраслей промышленности, а также в различных теплоэнергетических установках.

Максимальное значение стационарной температуры ( $\sim 500$  °С) достигается приблизительно через 200 с работы горелки у внутренних элементов — препятствий турбулизаторов, расположенных в той части горелочного тракта, через которую циклически «пробегают» волна детонации [7]. Стенки в этой части горелочного тракта нагреваются до  $\sim 420$  °С за время порядка 1000 с. В той части горелочного тракта, через которую циклически «пробегают» волна дефлаграции, стенки и внутренние элементы нагреваются до стационарной температуры, не превышающей  $\sim 330$  °С. Поэтому принудительное охлаждение горелки требуется только на тех участках горелочного тракта, через которые циклически «пробегают» волна детонации.

**Производство электроэнергии.** Импульсно-детонационное сжигание может быть использовано, например, на электроэнергетических предприятиях или на промышленных предприятиях в составе различных технологических комплексов для получения электромеханической энергии, в том числе в арктических условиях. Предложен способ, в котором ударные волны и импульсные высокоскоростные струи продуктов детонации, перед тем как направляться на традиционный турбоагрегат, сначала приводят во вращение массивный зубчатый маховик, а высокотемпературные продукты детонации далее используются для получения тепловой, механической и электрической энергии с помощью известных газо- и паротурбинных энергетических установок. Предложенный способ реализован в предложенном устройстве, включающем импульсно-детонационную трубу, промежуточный демпфирующий объем, турбоагрегат, системы подачи воздуха и горючего, систему зажигания и систему охлаждения, в котором к импульсно-детонационной трубе присоединены зубчатый маховик в герметичном корпусе и промежуточный демпфирующий объем, из которого высокотемпературные продукты детонации да-

лее поступают на известные газо- и паротурбинные энергетические установки для получения тепловой, механической и электрической энергии.

В детонационных газотурбогенераторах для производства электроэнергии используется турбина. Введение в конструкцию детонационного газотурбогенератора эжектора позволяет уменьшить вредное воздействие пульсирующего потока продуктов детонации на элементы турбины и ослабить параметры детонационной волны. В интегрированном сопле газовые потоки из отдельных детонационных камер смешиваются с эжектируемым воздухом. 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. По патенту РФ 2418968 предложен принцип создания подводного детонационного генератора со сдвоенной турбиной, работающей как от выхлопных газов детонации, так и в качестве гидротурбины от восходящего водного потока.

**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 магнетогидродинамические генераторы (МГД-генераторы). Для ионизации продуктов сгорания необходимо поддерживать температуру на уровне 10000 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 4000 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 General Electric, Boeing, в исследовательских центрах NASA, BBC США, в компаниях Aerojet Rocketdyne, Pratt & Whitney и др. В ближайшие годы на крейсерах ВМС США планируется замена газотурбинных электрогенераторов на детонационные установки. По патенту РФ 2418968 предложен способ прямого преобразования энергии импульсного детонационного сгорания топлива в электрическую энергию и генератор переменного тока для его реализации.

Роль компактных источников электроэнергии повышается в связи с потребностью автономного питания как космических аппаратов, так и техники, работающей в сложных климатических условиях. Разрабатываются принципы генерации электроэнергии на основе непрерывной спиновой детонации, совмещающей положительные качества стационарных (непрерывность работы) и импульсных (повышенная электропроводимость во фронте детонационной волны) МГД-систем [8].

**Импульсная очистка поверхностей нагрева.** Повышение эффективности работы паровых и водогрейных котлов, технологических агрегатов, сжигающих различные виды жидкого и твердого топлива, может быть достигнуто предотвращением загрязнения их поверхностей нагрева золовыми отложениями. Традиционные средства очистки поверхностей нагрева недостаточно эффективны и трудозатратны. Разработаны и внедрены системы газоимпульсной очистки (ГИО) с импульсными камерами, которые предназначены для очистки от отложений конвективных поверхностей нагрева промышленных котлоагрегатов, а также котлов коммунальной энергетики малой мощности [9]. Принцип работы таких систем заключается в воздействии на отложения, образующиеся на поверхностях нагрева направленных ударных и акустических волн, генерируемых за счет детонационного горения газозвушной сме-

си в импульсной камере, размещаемой вне газохода котла. Истекающие из импульсной камеры со сверхзвуковой скоростью продукты сгорания производят комплексное волновое и термогазодинамическое воздействие на наружные отложения, теплообменные и ограждающие поверхности. Системы ГИО обеспечивают равномерную очистку поверхностей нагрева, работающих в среде как нейтральных, так и агрессивных газов. Затраты на внедрение систем ГИО только за счет экономии топлива окупаются в срок от полугода до года.

#### Выводы:

1. Детонационный режим горения газов отличается от обычного (дефлаграционного) более быстрым выделением энергии, более высокими температурами и давлением продуктов сгорания. Термодинамически детонация является наиболее эффективным способом прямого сжигания горючего. Широкое практическое применение технологий и устройств, основанных на использовании явления газовой детонации, затруднено поиском способов инициирова-

ния детонации, которые позволят значительно уменьшить энергию инициирования детонации, значительно сократить длину и время перехода горения в детонацию.

2. Наряду с продолжением интенсивных фундаментальных исследований явления газовой детонации развиваются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию управляемой детонации в двигателях, энергетических установках, технологических горелках, других устройствах и технологиях различных отраслей промышленности.

3. Многочисленные исследования и разработки показывают перспективность использования явления газовой детонации для создания детонационных двигателей в авиации, космической и других отраслях.

4. В энергетике явление газовой детонации представляет существенный практический интерес для создания более эффективных горелочных устройств, компактных устройств получения электроэнергии, очистки поверхностей нагрева.

#### Библиографический список

1. Зельдович, Я. Б. *Теория детонации [Текст] : учеб. пособ. / Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеец. — М. : Гостехиздат, 1955. — 268 с.*
2. Баженова, Т. В. *Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме [Текст] / Т. В. Баженова, В. В. Голуб // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39. — № 4. — С. 3–21.*
3. *Evaluation of a hybrid-piston pulsed detonation engine / B. Frankey, F. Schauer, R. Bradley, J. Hoke // AIAA 2002-0474 : 40th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. — 2002. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA454348.pdf>.*
4. Булат, П. В. *Обзор проектов детонационных двигателей. Импульсные двигатели [Текст] / П. В. Булат, Н. В. Продан // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 10–8. — С. 1667–1671; То же [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32641>.*
5. *Водомётный движитель с импульсно-детонационным горением жидкого топлива [Текст] / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, И. А. Садыков и др. // Доклады Академии наук. — 2017. — Т. 475. — № 3. — С. 281–285.*
6. *Подзирей, Ю. С. Одно из возможных направлений применения пульсирующего детонационного двигателя [Текст] / Ю. С. Подзирей // Двигатель. — 2010. — № 3 (69). — С. 22–24.*
7. *Импульсно-детонационное горелочное устройство на природном газе [Текст] / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, В. С. Иванов и др. // Химическая физика. — 2011. — Т. 30. — № 7. — С. 77–80.*
8. *МГД-эффекты при непрерывной спиновой детонации [Текст] / Е. Л. Попов, А. Н. Самсонов, Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников // Доклады Академии наук. — 2019. — Т. 484. — № 5. — С. 550–553.*

9. О внедрении систем импульсной очистки поверхностей нагрева. Опыт сотрудничества с предприятиями котлостроения [Текст] / А. П. Погребняк, В. Л. Кокорев, А. Л. Кокорев, И. О. Моисеенко и др. // *Новости теплоснабжения*. — 2014. — № 1. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=2819](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2819) (дата обращения: 27.11.2021).

© Харламов Ю. А.  
© Петров П. А.  
© Козачишен В. А.  
© Изиумов Ю. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневским Д. А.,  
д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.*

*Статья поступила в редакцию 29.11.2021.*

**Doctor of Technical Sciences Kharlamov Yu. A., PhD in Engineering Petrov P. A., PhD in Engineering Kozachishen V. A., PhD in Engineering Iziumov Yu. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)**  
**DETONATION-GAS TECHNOLOGIES AND DEVICES: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT. REPORT 1. GAS DETONATION AND ITS APPLICATION IN ENGINES AND POWER ENGINEERING**

*The essence, advantages and disadvantages of detonation combustion of gases, its energy efficiency and promising areas of use are briefly considered. Report 1 systematizes data on the practical use of the phenomenon of gas detonation for the improvement and development of new types of internal combustion engines, as well as in the energy sector when creating energy-saving burners, generating electricity and cleaning the heating surfaces of units burning various types of liquid and solid fuels.*

**Key words:** *explosive technologies, detonation-gas devices, power equipment, burner devices, deflagration, detonation wave, stationary detonation, rotational, non-stationary, pulsating.*