

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 3. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ  
В ОБРАБАТЫВАЮЩИХ И ОБСЛУЖИВАЮЩИХ ОТРАСЛЯХ ЭКОНОМИКИ**

*В третьем сообщении кратко описано применение детонационно-газовых технологий и устройств в химической и нефтехимической промышленности, машиностроении и металлообработке, строительстве и производстве строительных материалов, сельском и лесном хозяйстве, ЖКХ, для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в военном деле и др.*

***Ключевые слова:** безыгольные инъекции, детонационно-газовое напыление, детонационный синтез, импульсная обработка, метание тушащих веществ, обработка дисперсных частиц, объемная детонация, очистка, получение веществ, удаление заусенцев.*

**Химическая и нефтехимическая промышленность. Переработка углеводородов.** Газовая детонация перспективна для переработки, в том числе комплексной, углеводородов, особенно природного газа. Так, по а. с. СССР № 857228 возможно получение одновременно нескольких продуктов, например, азотной кислоты, ацетилена и электроэнергии. В этом случае реактор установки содержит детонационную камеру сгорания.

**Получение веществ в продуктах газовой детонации.** Наноструктурный поликристаллический диоксид титана получен в процессе газовой детонации и пирогидроллиза. В качестве сырья использовали тетрахлорид титана ( $TiCl_4$ ) в газовой фазе, а в качестве источника энергии — предварительно смешанные газы  $O_2$  и  $H_2$ . Продукты представляют собой смесь кристаллов  $TiO_2$ , находящегося в фазе рутила (80 %) и анатаза (20 %). Газофазный детонационный синтез имеет преимущества с точки зрения контроля размера частиц, их кристаллической структуры, чистоты и т. д. Процесс газофазной детонации смеси этанола,  $TiCl_4$  и кислорода использован для синтеза наноразмерного диоксида титана в

кристаллической модификации рутила со сферическими частицами малых размеров и малой дисперсии по размерам. Таким образом, представленный способ позволяет избежать загрязнения конечного продукта и других недостатков, которые возникают при синтезе наноразмерного диоксида титана (рутила) традиционными методами [1].

Детонационное сжигание углеводородов в проточном режиме является перспективным способом получения ультрадисперсного углерода, а соответствующие импульсные газодетонационные аппараты могут стать промышленным генератором этого продукта. Получаемый углеродный конденсат представляет собой кластеры с разветвленной структурой и практически весь состоит из наноглобулярного углерода и может являться прекурсором в получении фуллеренов, углеродных нанотрубок, графенов, карбинов и пр. Имеется много сообщений о дешевом способе получения графена при детонации смесей газообразных углеводородов с кислородом [2]. Таким образом, разработан новый высокопроизводительный и относительно безопасный метод получения наноразмер-

ного углерода путем детонационного сжигания ацетиленокислородных смесей в импульсном газодетонационном аппарате. В детонирующей смеси  $C_2H_2 + kO_2$  содержание кислорода варьировалось от  $k=0,4$  до  $0,8$ . По утверждению авторов, производительность способа при объеме реактора (цилиндрическая камера)  $16,6$  л достигает  $300$  г углерода в час. Удельная поверхность  $S$  получаемого порошка изменяется от  $187$  до  $23$  м<sup>2</sup>/г при изменении  $k$  от  $0,4$  до  $0,8$ . Углеродные частицы имеют округлую форму и размер  $35...55$  нм при  $k=0,4$  и  $0,5$ , растут с увеличением  $k$  и достигают  $d=250...350$  нм при  $k=0,8$ . При  $k=0,68$  они приобретают форму чешуек размером более  $100$  нм и толщиной порядка  $10$  нм. Таким образом, свойства наноглерода, получаемого различными способами и в различных технологических режимах, значительно различаются.

Производство катализаторов — важнейшая отрасль промышленности, влияющая на развитие других отраслей, в частности химической, нефтеперерабатывающей и т. д. В последнее время катализ все чаще используют для защиты окружающей среды. Отдельную отрасль составляет производство катализаторов на основе редких и благородных металлов, таких как платина, палладий, родий, рений и т. д. При этом для более эффективного использования самого металла его наносят на носители — материалы, обладающие высокими значениями удельной поверхности и механической прочности. Осуществлен синтез Au- и Pd-содержащих катализаторов методом термического разложения различных прекурсоров во фронте детонационной волны. При этом реализуется одновременный синтез частиц как активного компонента, так и носителя, состоящего из детонационных углеродных форм. Возможность варьирования весового содержания активного компонента и размеров его частиц позволяет использовать детонационный метод для синтеза углероднанесенных катализаторов различных процессов.

**Обработка дисперсных частиц газовой детонацией.** Уровень давлений, температур и скоростей, развиваемых за детонационными волнами в газах, определяет большие потенциальные возможности технологического использования течений за сильными разрывами и широкую область их применения. Поэтому детонационные волны применяют в качестве инструмента для обработки газозвесей. Здесь под обработкой понимается воздействие, приводящее к целенаправленному изменению частиц, в частности нагревание частиц, сопровождающееся фазовыми и химическими превращениями. При этом получают продукты с заданными свойствами (образование оксидов металлов из их солей, перестройка кристаллической структуры металла или выпаривание жидкости из растворов с целью получения твердых веществ или твердых растворов). Ранее уже рассматривались применения газовой детонации для получения аморфных и быстрозакаленных порошков, сфероидизации и восстановления порошков оксидов, получения окиси азота и ацетиленовой сажи [3]. Методом газовой детонации принципиально возможно получение нитридов, но они неизбежно будут загрязнены оксидами металлов (Ti, Na), титанатами, сажей, причем доля получаемых нежелательных продуктов будет весьма значительной в массе покрытия [4].

Детонационный синтез по а. с. СССР № 1649738 применяют 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.

С помощью детонации газовых смесей можно синтезировать частично стабилизированный диоксид циркония (ЧСДЦ), являющийся уникальным теплозащитным материалом конструкционной керамики. 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 [5].

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

**Получение неорганических материалов в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).** При получении неорганических материалов, преимущественно тугоплавких (например, карбидов, оксикарбидов, карбонитридов, боридов, нитридов, карбоборидов и др. различных металлов и твердых сплавов на их основе), в режиме СВС в качестве поджигающего состава используют горючую смесь газов, компоненты которой вводят в состав газовой среды, нагнетаемой в камеру (патент РФ № 2006510).

**Машиностроение и металлообработка.**  
**Импульсная высокоскоростная обработка металлов.** Импульсное деформирование металла обладает рядом уникальных особенностей и позволяет получить изделия сложной формы. Импульсная резка применяется для разделения холодного проката ударом коротких ножей с большим углом клиновидности для получения заготовок из пластичных сталей, а также относительно хрупких сталей с повышенным содержанием углерода, марганца и т. п. Её применяют

для получения заготовок для дальнейшей прокатки, облойной штамповки длинномерных изделий, а также для штамповки в торец [7]. На высокоскоростном оборудовании можно изготавливать детали высокой точности с минимальными штамповочными уклонами и входными радиусами в результате действия больших кратковременных деформирующих усилий. Весьма перспективным может оказаться использование высокоскоростных типов энергоприводов для выполнения операций свободнойковки или горячей штамповки деталей за один или даже несколько переходов, поскольку применение пневматической скоростной системы возврата бойка в исходное положение позволяет значительно сократить подготовительное время рабочего цикла. Импульсная высокоскоростная обработка перспективна для изготовления заготовок и деталей из труднодеформируемых материалов [7]. Большое развитие получила детонационно-газовая листовая штамповка [3]. Детонация газовых смесей используется также в машинах для импульсного брикетирования сыпучих материалов, например, стружки. При скоростях инструмента около 20 м/с из титановой стружки и стружки жаропрочных сплавов образуются брикеты, плотность которых достигает  $0,8 \div 0,9$  плотности сплошного металла [7]. Из стружки можно получать не только брикеты высокой прочности и плотности, пригодные для переплава, но и формировать целый ряд изделий, например, из стружки чёрных металлов — вкладыши-пробки для защиты дна глухондных изложниц при заливке в них стали, получать расходоуемые электроды из титановой губки, а также брикеты из стружки титановых сплавов [7].

Повышение эффективности уплотнения пористой массы в газовом баллоне достигается однократным воздействием на нее импульса повышенного давления детонационной волны газообразного ацетилена (патент РФ № 2079769). Импульс давления детонационной волны формируется в ус-

тановке, содержащей ударную трубу с инициирующим взрывной распад ацетилена устройством.

**Термическая обработка.** Известны попытки и исследования термической обработки металлов посредством газовой детонации в закрытых камерах, однако промышленного применения этот способ не получил. Более перспективной и достаточно разработанной является поверхностная термическая обработка с помощью импульсных плазменно-детонационных генераторов, разработанных в ИЭС НАНУ, воздействие которых аналогично лазерному лучу, но при более высокой площади пятна взаимодействия с твердым телом. Известно много примеров успешного упрочнения деталей и инструментов этим методом [3].

**Удаление заусенцев.** Термоэнергетический метод снятия заусенцев (ТЭМ) [8] позволяет обрабатывать полости, глухие и пересекающиеся отверстия одновременно с внешними поверхностями детали. Размеры детали не изменяются, нагрев не превышает 150 °С (за исключением слишком тонких элементов). Детали помещают в герметичную высокопрочную камеру, в которую под давлением нескольких десятков атмосфер вводят 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.). 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  $0,2 \div 0,4$  мм до температуры плавления скорость вынужденной конвекции достаточна для разрушения образовавшейся капли, то происходит удаление заусенца с образова-

нием скругления. Метод развивается в двух направлениях: термохимическом и термоимпульсном. При термохимической обработке удаление заусенцев на кромках происходит за счет инициации их сгорания в обедненной топливной смеси, т. е. за счет повышения содержания окислителя. Термохимический метод более распространен и реализован в установках таких фирм, как Bosch, Extrude Hone, 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. Обработка включает в себя удаление заусенцев, притупление произвольным радиусом, размерное скругление, очистку от технологических загрязнений. Термоимпульсная обработка деталей из пластмасс и композиционных материалов распространена в меньшей степени.

**Очистка поверхностей деталей.** Основными источниками загрязнений поверхности деталей авиационной и других видов техники, подлежащих удалению, 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. [9]. При обеспечении чистоты поверхностей деталей и рабочих полостей многих машин их ресурс может быть увеличен в два-три раза. Технология термоимпульсного удаления заусенцев и очистки поверхности в наибольшей степени удовлетворяет условиям промышленного производства.

**Детонационно-газовое напыление покрытий.** Процессы и оборудование для детонационно-газового напыления остаются наиболее широко применяемой областью практического использования газовой детонации [3, 10] и являются темой самостоятельного обзора. Однако появляются новые нетрадиционные области применения процессов напыления:

1. Упрочнение и балансировка абразивных кругов на керамической связке, работающих на повышенных скоростях вращения [11]. Осуществляется путем напыления корундового покрытия на боковые стороны круга с одновременным их упрочнением. Высокая скорость напыляемых частиц (600÷1000 м/с) и возможность высокоточного позиционирования деталей во время нанесения покрытия позволяют осуществить балансировку вращающихся абразивных инструментов с использованием в качестве балансирующего груза порций (навесок) порошкового материала, разогреваемого и разгоняемого энергией взрыва.

2. Изготовление кумулятивных зарядов для перфорации нефте- и газодобывающих скважин, обладающих повышенной пробивной способностью.

3. Изготовление инструмента для пластического сверления отверстий.

4. Изготовление сменных режущих пластин для токарной обработки.

**Осаждение покрытий из газовой фазы в потоке продуктов газовой детонации.** Процесс образования нитрида титана осуществляется в стволе детонационно-газовой установки [12]. 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.

**Строительство и производство строительных материалов. Обрушение сооружений.** Разрабатываются способы использования газовой детонации для обрушения подлежащих ликвидации зданий и сооружений (патенты РФ № 2107889 и № 2252393). Для этого в ограниченном объеме пространства размещают эластич-

ную оболочку, заполняют ее взрывчатой смесью горючих газов и окислителя и подбивают тротиловой шашкой. Эти способы обеспечивают повышение эффективности разрушения крупных фрагментов разрушаемых объектов, повышение безопасности работ за счет снижения дальности разбрасывания осколков и могут быть использованы, например, для сноса ветхих зданий, сооружений, расчистки завалов, применяются для дробления льда при устранении ледяных заторов на реках, для раскорчевки пней и пр.

**Разрушение грунтов.** Способы и устройства, использующие явление газовой детонации, применяют для разработки грунта, его перемещения, укладки и уплотнения [3].

**Уплотнение грунтов.** Разработан газодетонационный способ уплотнения просадочных грунтов [13]. Применение метода уплотнения грунтов газозрывным воздействием является весьма эффективным средством увеличения прочности оснований, а также уменьшения их деформируемости. Одним из способов увеличения несущей способности буронабивных свай является уплотнение грунта околоскважинного пространства с помощью газозрывного воздействия. Уплотнение грунта околоскважинного пространства в результате газозрывного воздействия повышает несущую способность буронабивных свай по сравнению с обычными более чем в два раза. Перспективные области применения буронабивных свай с уплотнением грунта газозрывным воздействием весьма обширны: новое строительство; строительство в непосредственной близости от существующих сооружений, фундаментов и внутри помещений; строительство в насыпных грунтах; для усиления фундаментов и при ликвидации аварий; строительство на намывных территориях и пр.

**Формование бетонных изделий.** Импульсные ударно-волновые газодинамические установки (УВГУ), реализующие процесс детонации газообразных компонентов

топлива, используются в строительной индустрии для уплотнения бетонов. Бетоны, полученные уплотнением на УВГУ, обладают улучшенными характеристиками, прирост их прочности достигает 20÷40 % [14].

**Очистка фильтров.** В производстве асбестоцементных изделий работа листоформовочных машин (ЛФМ) в значительной степени зависит от состояния сетчатых цилиндров. Срок службы сетки из медных сплавов составляет 7÷10 смен. Задача автоматизации процесса очистки фильтрующих устройств на базе газо-детонационного оборудования решена в диссертационной работе Семернина А. Н. [15], что позволило повысить эффективность очистки фильтрующих устройств и увеличить срок службы фильтрующей сетки. Расходы на восстановление фильтрующей сетки составляют 11,5 % от ее стоимости.

**Сельское и лесное хозяйство. Обработка почвы.** Разработаны устройства для рыхления почвы посредством импульсного воздействия на ее поверхность снаружи ударными волнами и потоками продуктов детонации горючей смеси (патент РФ № 2015628). Трубы — генераторы детонационных волн выполняют в виде спаренных труб, имеющих общие для каждой пары труб турбулизатор и камеру сгорания. Интенсификаторы газодинамического действия перспективны для глубокого рыхления почвогрунтов.

Разрушение почвогрунта рыхлителем с газодинамическим интенсификатором осуществляется в две фазы процесса. В первой фазе происходит механическое деформирование зубом почвогрунта, в котором образуется прорезь. Во второй фазе в момент детонации происходит интенсивное разрушение почвогрунта, при этом образованные в первой фазе трещины и разломы служат концентраторами напряжений при расширении газа в почве. Газ, внедряясь в трещину, действует как клин. Раскрытие трещин происходит в основном в сторону дневной поверхности массива почвогрунта. Поэтому разрушение почвогрунта осуществляет-

ся преимущественно за счет деформаций растяжения, т. е. наименее энергоемким образом. Отдачу можно исключить, располагая выхлопные отверстия в боковых стенках зуба, а цикличность работы можно компенсировать установкой на раме орудия нескольких рыхлительных зубьев.

При обработке газодетонационными агрегатами для возделывания хлопчатника газодинамический импульс воздействует на почву как резкий короткий удар, например, строго перпендикулярно к поверхности почвы без боковых (сдвиговых) составляющих силы, что исключает сдвиг элементов корки, «выворачивание» и повреждение семян, можно обрабатывать поля с уже проросшими семенами, так как при этом не повреждаются молодые растения [16].

**Борьба с вредителями и сорняками.** Созданы машины для хлопкоуборки, предпосевной обработки семян и умерщвления куколок тутового шелкопряда. Применение детонационно-газовых агрегатов ГДРП-3 позволяет уменьшить количество однолетних сорняков на 50 % [16]. Прямые затраты по борьбе с сорняками примерно такие же, но созревание хлопчатника быстрее, что увеличивает его сортность. В диапазоне частот генерации детонационных волн 1÷10 Гц достигается умерщвление куколок тутового шелкопряда.

**Сбор урожая.** Бесконтактный принцип передачи импульса силы к каким-либо объектам открывает возможность применения газовой детонации для создания устройства сбора хлопка. Получены положительные результаты по использованию газовой детонации волны в качестве источника силы для освобождения хлопкового волокна из коробочки с дальнейшей его транспортировкой в бункер [16]. Традиционный механический принцип зацепления и вытягивания волокна из коробочки влечет за собой разрыв волокна, повреждение семян, засорение шпинделей. Созданы машины для хлопкоуборки, предпосевной обработки семян и умерщвления куколок тутового шелкопряда.

**Отпугивание птиц и диких животных.** Детонационно-газовое оборудование используется для защиты урожая от диких животных, что увеличивает количество собранных плодов более чем на 40 %. Несколько взрывов могут отпугнуть прочь птиц, зайцев, диких кабанов, оленей, лис, и других животных, способных нанести урон будущему урожаю или насаждениям. Одна детонационно-газовая пушка может защищать около 3 гектар, в зависимости от рельефа и размеров поля и сельскохозяйственной культуры. Оборудование может использоваться для защиты виноградников, садов, рисовых и зерновых культур, а также в аэропортах (для предотвращения попадания птиц в двигатели самолетов) и рыбных питомниках (для отпугивания птиц от воды). Оборудование применяется в более чем 45 странах мира.

**Другие применения газо-детонационной обработки.** Показана возможность применения газодинамического принципа воздействия на обрабатываемый материал и на других сельскохозяйственных операциях [16]: хлопкоуборка, предпосевная обработка семян, дренажирование, умерщвление куколок тутового шелкопряда.

Детонационно-газовое воздействие на почву и растения позволяет обеспечить [16]: увеличение всхожести семян растений хлопчатника и кукурузы до 15 % и уменьшить сроки полной всхожести на 2÷3 дня; сокращение срока созревания хлопчатника на 10÷14 дней вследствие ускорения развития растения на всех фазах; повышение накопления питательных веществ в частях растения (корни, листья, стебли, волокна) и за счет этого увеличение урожайности хлопчатника в среднем на 10 %; возрастание общего уровня биологической активности почвы.

Освоение неплодородных солонцовых почв, в которых прочный слой не пропускает воду и возникает заболочивание, засоление, исключается развитие корневой системы вглубь. Применение агрегатов ГДРП-3 для бурения шпуров делает почву

плодородной [16]. Цилиндрический детонационный генератор используется в качестве бура для шпуров диаметром 50 мм при использовании детонационной трубы диаметром 25 мм. Для получения шпура глубиной до 3 м необходимо применять детонацию с частотой 10 Гц.

**ЖКХ. Восстановление производительности водозаборных скважин.** 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.

**Измельчение и плавление снежно-ледяной массы** может происходить благодаря периодическому воздействию ударных волн, а также высокоскоростных струй горячих продуктов импульсно-детонационного горения топливной смеси, т. е. может быть использовано для быстрой утилизации снежно-ледяной массы (международный патент WO 2015/099553).

**Утилизация отходов** может производиться в установках, использующих детонационное сжигание топлива. Детонационная установка может быть использована для отделения резины от металлокорда в изношенных металлокордовых автопокрышках и для дробления кусков резины [3]. Существующие установки для дробления автопокрышек требуют большого расхода электроэнергии и содержат режущие части, которые необходимо периодически заменять. Принципиально новым подходом к этой проблеме является применение газовой детонации. Методика состоит в резком повышении давления внутри автопокрышки, охлажденной до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Возрастание давления вызывается взрывом способной к детонации газовой смеси. Продукты взрыва не содержат экологически опасных веществ. В процессе разрушения резина отслаивается от металла и текстильного корда. Обеспечивается отделение не менее 80 % резины от корда. За время менее

1 секунды резина разлетается на куски размером менее 5 мм. Полученная резиновая крошка после дополнительного измельчения может быть использована для производства различных изделий, например, кровельного листового материала, резиновых плит и т. д.

Тепловой привод, аналогичный машинам для «горячей» резки, использован при создании оборудования для осуществления, например, процессов, сопутствующих утилизации отработанных тепловыделяющих элементов атомных электростанций [7].

**Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций. 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. Разработаны установки метания тушащих веществ в контейнерах на основе газовой детонации (Харьковский политехнический институт (ХПИ)), в которых 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. При метании с помощью газодетонационной установки контейнера диаметром 0,1 м, что в расчетном варианте соответствует массе 2 кг, и при начальной скорости 100 м/с максимальная дальность метания составит 1000 м (без учета сопротивления воздуха).

**Локализация лесных пожаров.** Показана возможность получения противопожарного разрыва с помощью ударного действия взрыва топливовоздушной смеси, формируемой в объемном шланговом заряде (Харьковский политехнический институт). В условиях проведенных исследований для зарядов диаметром от 0,95 м до 1,8 м ширина противопожарного разрыва составляла от 2,5 м до 7 м.

**Тушение пожаров в зданиях.** Для ликвидации развитых пожаров в зданиях разработана ранцевая установка периодически-импульсного действия газовой детонации. Ускорение и дробление воды производится продуктами газовой детонации пропано-воздушной смеси с получением мелкораспыленной водяной струи с оптимальным значением дисперсности капель воды ( $60 \div 100$  мкм).

**Системы принудительного спуска лавин.** В 1989 году после 15 лет испытаний и экспериментов в управлении сходом лавин французская фирма T.A.S. (Альпийские Технологии Безопасности) создала и запатентовала систему Gazex, которая инициирует принудительный сход лавин, используя механизм активного воздействия детонацией смеси на основе кислорода и пропана. Такие установки используются по всему миру как для защиты склонов горнолыжных курортов, так и для защиты дорог, туннелей и жилых комплексов.

**Здравоохранение. Безыгольные инъекции** применяются для того, чтобы уменьшить боль и снизить повреждение тканей. Использование газовой детонации позволяет заменить менее эффективные источники энергии для ускорения лекарственных препаратов в аппаратах, предназначенных для безыгольных инъекций, на газовые смеси, что позволяет упростить, удешевить устройства для безыгольных инъекций и избежать выбросов ядовитых продуктов сгорания твердых топлив [17].

**Военное дело. 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). 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  $30 \text{ кг/см}^2$ , а в зоне детонации за несколько десятков микросекунд развивается температура  $2500\div 3000 \text{ }^\circ\text{C}$ . По своим параметрам (длительность затухания внутри и вне облака) избыточное давление боеприпаса объемного взрыва превосходит давление во фронте ударной волны, создаваемой обычными взрывчатыми веществами (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.

Тунгусское событие по одной из научных гипотез также представляется как детонация природной объемно-детонирующей системы.

**Разминирование.** Для решения задачи разминирования минных полей объемным взрывом используют детонационно-способную смесь в струе отработанных газов силовой установки бронетанковой тех-

ники [18]. Данный способ разминирования по сравнению с наиболее дешёвым 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  $1 \text{ м}^2$  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 газоплазменного потока за фронтом волны [18].

**Газодетонационные огнемёты.** К тенденциям, присущим локальным войнам и другим вооруженным конфликтам, относится повышение роли огнемётных устройств. В газодетонационных огнемётах как метательный заряд целесообразно использовать смесь пропан-бутана технического с кислородом в стехиометрическом соотношении.

**Утилизация боеприпасов.** Заряд твердого взрывчатого вещества дробят воздействием ударной волны, которую получают детонацией горючей газовой смеси, окружающей боеприпас (патент РФ № 2137089).

**Прочие применения. Инициирование горения и взрыва ВВ.** В научных исследованиях и технике широко применяется инициирование взрыва труднодетонирующих газовых, гетерогенных и конденсированных ВВ посредством детонационной волны (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 сфери-

ческой и цилиндрической детонации. Газовой детонацией можно возбудить ударную волну (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 [19].

Пережатая ДВ обеспечивает надежное инициирование промышленного детонатора, употребляемого в горном деле. 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.

**Ускорение компактных тел.** При движении «снаряда» в заполненной взрывчатой газовой смесью трубе со скоростью, превышающей скорость детонационной

волны Чепмена — Жуге  $D_{CJ}$ , 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 разгоняться (концепция прямоточного ускорителя — Ram Accelerator). 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 [3] получена скорость снаряда 2,1 км/с, ненамного превышающая скорость детонации.

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

**Моделирование поршня.** Использование газовой детонации при моделировании получения смеси диспергированной жидкости с газом при помощи поршневой машины.

**Детонационно-газовые насосы,** например, насос-двигатель по а. с. СССР 383898.

**Ударное воздействие,** например, в импульсных горелках, совмещающих ударное воздействие с воздействием высокоскоростной струи горячих продуктов детонации. Импульсное ударное и конвективно-тепловое воздействие детонационно-газовой струи в перспективе может использоваться для дробления и газификации тяжелых фракций нефти и угля, бытовых и промышленных отходов, для дробления горных пород, льда и т. д.

#### **Выводы:**

1. Практическое применение газовой детонации охватывает почти все отрасли экономики, и детонационно-газовые тех-

нологии могут быть отнесены к имеющим межотраслевое значение.

2. Следует ожидать разработки и создания новых способов и устройств, основанных на использовании детонационного режима горения газов, в т. ч. для получения и обработки материалов, выполнения разнообразных технологических операций,

в транспортных и энергетических машинах и пр.

3. Необходим детальный анализ разработок и исследований детонационно-газовых технологий и устройств в различных сферах применения с целью обмена достижениями для более их широкого использования и внедрения.

### Библиографический список

1. Янь, Х.-Х. Использование этанола для получения наноразмерного диоксида титана в процессе газовой детонации [Текст] / Х.-Х. Янь, С.-Ч. Хуан, Ш.-С. Си // *Физика горения и взрыва*. — 2014. — Т. 50. — № 2. — С. 77–80.
2. Получение наноразмерного детонационного углерода на импульсном газодетонационном аппарате [Текст] / А. А. Штерцер, В. Ю. Ульяницкий, И. С. Батраев, Д. К. Рыбин // *Письма в ЖТФ*. — 2018. — Т. 44. — Вып. 9. — С. 65–72.
3. Харламов, Ю. А. Детонационно-газовые процессы в промышленности [Текст] / Ю. А. Харламов, Н. А. Будагьянц. — Луганск : Изд-во ВУГУ, 1998. — 223 с.
4. Синтез твердосплавных материалов в технологическом процессе детонационного напыления [Текст] / С. Ю. Ганигин, И. Д. Ибатуллин, М. В. Ненашев, К. П. Якунин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. — 2013. — Т. 15. — № 4 (2). — С. 451–454.
5. Букаемский, А. А. Нанопорошок диоксида циркония. Взрывной метод получения и свойства [Текст] / А. А. Букаемский // *Физика горения и взрыва*. — 2001. — Т. 37. — № 4. — С. 129–134.
6. Borisov, E. V. Dehydration of clay in detonating gas mixtures [Text] / E. V. Borisov, O. G. Martynov, V. N. Mironov // *Heat and mass transfer-97*. — Minsk : ИТМО, 1997. — P. 69–73.
7. Импульсная резка горячего металла [Текст] / В. С. Кривцов, С. А. Мазниченко, А. Н. Застела, Т. Е. Обрываева // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2007. — № 11 (47). — С. 26–34.
8. Трифонов, О. В. Современное состояние технологии и оборудования для очистки от заусенцев детонирующими газовыми смесями и направления их совершенствования [Текст] / О. В. Трифонов // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. — 2013. — Вып. 1. — С. 115–121.
9. Планковский, С. И. Проблемы развития методов финишной отделки и очистки интенсивными тепловыми потоками [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль // *Проблемы машиностроения*. — 2011. — Т. 14. — № 2. — С. 72–82.
10. Шоршоров, М. Х. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий [Текст] / М. Х. Шоршоров, Ю. А. Харламов. — М. : Наука, 1978. — 224 с.
11. Воронин, В. Н. Технология балансировки абразивных кругов, используемых для шлифования пар трения методами детонационного напыления [Текст] / В. Н. Воронин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. — 2016. — Т. 18. — № 4 (2). — С. 237–241.
12. Система нанесения покрытий осаждением из газовой фазы в потоке продуктов газовой детонации [Текст] / 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*. — 2014. — Т. 16. — № 1 (2). — С. 385–389.
13. Какенов, К. С. Современные методы уплотнения грунтов взрывными воздействиями. Анализ последствий аварийных взрывов [Текст] : монография / К. С. Какенов. — Караганда : КЭУ, 2012. — 361 с.
14. Зеленов, К. И. Мелкозернистые цементные бетоны ударно-волнового уплотнения [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Зеленов Константин Иванович ; Моск. гос. открытый ун-т. — М., 2006. — 195 с.

15. Семернин, А. Н. Автоматизация процесса очистки фильтрующих устройств на базе газо-детонационного оборудования [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Семернин Андрей Николаевич ; БелГТАСМ. — Белгород, 2000. — 220 с.

16. Тожиев, Р. Ж. Механико-технологические решения бесконтактного воздействия на почву и растения с разработкой газодетонационных агрегатов для высокоэффективного возделывания хлопчатника [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р. Ж. Тожиев. — М., 1993. — 38 с.

17. Применение детонации водородовоздушной смеси в устройствах для безыгольной инъекции [Текст] / В. В. Голуб, Т. В. Баженова, Д. И. Бакланов, К. В. Иванов, М. С. Кривокорытов // Теплофизика высоких температур. — 2013. — Т. 51. — Вып. 1. — С. 147–150.

18. Сиротенко, А. Н. Создание детонационно-способной смеси в газовой струе с применением для разминирования минных полей [Текст] / А. Н. Сиротенко, А. Н. Довбня, О. В. Стаховский, К. В. Корытченко / Механіка та машинобудування. — 2006. — № 1. — С. 166–177.

19. Лукьянчиков, Л. А. Системы иницирования на вторичных взрывчатых веществах [Текст] / Л. А. Лукьянчиков // Прикладная механика и техническая физика. — 2000. — Т. 41. — № 5. — С. 48–61.

© Харламов Ю. А.

© Петров П. А.

© Козачишен В. А.

© Изыумов Ю. В.

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

*Статья поступила в редакцию 31.03.2022.*

**Doctor of Technical Sciences Kharlamov Yu. A., PhD in Engineering Petrov P. A., PhD in Engineering Kozachishen V. A., PhD in Engineering Izyumov Yu. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)**  
**DETONATION-GAS TECHNOLOGIES AND DEVICES: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT. REPORT 3. APPLICATION OF GAS DETONATION IN PROCESSING AND MAINTAINING ECONOMIC BRANCHES**

*The third report briefly describes the use of detonation-gas technologies and devices in chemical, petrochemical industry, mechanical engineering and metal working, building and construction materials production, agriculture and forestry, house and communal services, for the purpose of prevention and relief of emergency situations, in military affair and etc.*

**Key words:** *needleless injections, detonation-gas technologies, detonation synthesis, pulse processing, throwing of extinguishing substances, processing of dispersed particles, large detonation, cleaning-out, resulting substances, deburring.*