

УДК 546:621.9.048.4:662.61

## ПЕРВОЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ

**Харламов Ю.А.**, докт. техн. наук, проф.

*(Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля)*

**Полонский Л.Г.**, докт. техн. наук, проф.

*(Житомирский государственный технологический университет)*

*У статті розглянуті основні поняття, пов'язані з особливостями детонаційного горіння газів. Наведено перспективи та основні напрямки практичного використання газової детонації і етапи робіт, присвячених експериментальному і теоретичному вивченню газової детонації. Показано провідну роль вчених і інженерів України в розробці та впровадженні детонаційному-газового напилення покриттів.*

**Ключові слова:** детонація, детонаційне напилення, імпульс, горіння, газ

Цель статьи – освещение истории работ по изучению детонации (быстрого горения) газов и начальных этапов ее практического применения.

Детонация – самый эффективный из всех возможных способов прямого сжигания вещества. Именно поэтому в настоящее время во всем мире активно разворачиваются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию управляемой детонации в новых системах реактивного движения, энергетических установках и технологических горелках [1]. При этом в литературе достаточно подробно рассмотрены исторические аспекты развития теории газовой детонации, однако практическому применению уделяется мало внимания, особенно в отношении работ украинских инженеров и ученых.

Существуют два различных режима распространения горения в горючих газовых смесях. В режиме медленного горения газ сгорает во фронте пламени, скорость которого определяется процессами переноса: теплопроводностью и диффузией. В режиме детонационного горения сжатие и нагрев горючей смеси, приводящие к её воспламенению, осуществляются ударной волной достаточно большой интенсивности. В этом случае горение локали-

зуется в узкой зоне за ударной волной, так что скорость его распространения совпадает со скоростью ударной волны и может достигать нескольких километров в секунду.

Явление детонации в газах было открыто в 1881 г. во Франции при изучении причин взрывов в угольных шахтах. Физике газовой детонации посвящены работы таких известных ученых, как Семенов Н.Н., Зельдович Я.Б., Щелкин К.И., Михельсон В.А. и др.

Зона реакции при послышном (медленном) горении сосредоточена в тонком слое – фронте пламени. Скорость фронта пламени относительно исходного вещества всегда дозвуковая и не превышает нескольких десятков метров в секунду. Горение во фронт е ударной волны называется быстрым или детонационным. А сама такая волна – детонационной. Скорость фронта детонационной волны относительно компонентов топлива – сверхзвуковая. В детонационной волне процесс сгорания топлива осуществляется практически мгновенно (в 100...1000 раз быстрее, чем при дефлаграции), что обеспечивает возможность повышения давления в камере сгорания, имеющей форму полузаткнутого объема, на один-два порядка по сравнению с традиционными двигателями.

Идея энергетического использования детонационного горения топлива получила развитие в работе Я.Б. Зельдовича [2], в которой проведена оценка эффективности цикла с детонационным горением.

Экспериментальные исследования возможностей использования детонационных процессов для разработки двигателей были предприняты в работе Николлса [3] применительно к водородо-воздушной смеси. На основании выполненных теоретических расчетов и экспериментальных исследований выполнен сравнительный анализ возникновения и развития детонации в водородо-кислородных и ацетилен-кислородных смесях.

Исследования были продолжены в работе Хелмана [4] с использованием этилен-кислородных и этилен-воздушных смесей, в разнообразных по устройству и по принципу действия детонационных трубах.

Для повышения эффективности сжигания и обеспечения непрерывного режима детонации в работах Адамсона и Шена [5, 6] использовались ротационные детонационные волны (rotating detonation wave).

Возможности применения стоячих детонационных волн (standing detonation wave) в ПВРД и ракетных двигателях исследовались в работе Данлопа [7], а стационарной спиновой детонации (stationary spinning detonation) – в работе Б.В. Войцеховского [8].

Физическая природа процессов возникновения и развития детонации полностью не изучена. Большие градиенты газодинамических параметров и сложная картина течения за фронтом детонационной волны серьезно затрудняют как экспериментальное, так и теоретическое изучение детонации. Методы и результаты экспериментальных исследований детонационных волн в газах последовательно рассматриваются в работах Солоухина Р.И. в 1963–1969 гг. [9]. В частности, им обнаружена неустойчивость фронта де-

тонационной волны. Выяснилось, что детонационные волны представляют собой не плоскую поверхность, а совокупность непрерывно трансформирующихся и переходящих друг в друга тройных конфигураций ударных волн. В определенные моменты времени тройные конфигурации сливаются в особые точки, в которых волновая структура становится неустойчивой.

Эволюция тройных конфигураций во фронте детонационной волны и неустойчивость её фронта к слабым возмущениям подробно освещена в фундаментальной статье Щелкина К.И. [10]. Войцеховским Б.В. и др. [11] при изучении распространения детонационной волны по круглой трубе обнаружено интересное явление, которое они назвали спиновой детонацией. При превышении противодавления в трубе выше некоторого критического значения тройные конфигурации фронта детонации перестраиваются таким образом, что фронт горения начинает двигаться в азимутальном направлении. В результате область горения описывает спиралевидную траекторию, причем скорость поступательного движения в точности равняется скорости плоской детонационной волны.

Открытие спиновой детонации натолкнуло Войцеховского на мысль организовать круговую (ротационную) детонацию в цилиндрическом коаксиальном канале [12] и высказать идею ротационного двигателя. Спиновая детонация и круговая детонация экспериментально систематически изучались Быковским и Жданом. Итоги их многолетних исследований обобщены в монографии [13]. Обзор технических решений в области проектирования и создания детонационных двигателей, а также научных проблем, возникающих при их реализации, дается в работах [14, 15].

Одним из вероятных сценариев развития транспорта и энергетики является использование водорода и сжиженного природного газа. В странах Европейского Союза и США развер-

тываются крупномасштабные исследовательские работы по применению водорода в качестве топлива и в области водородных технологий, создаются структуры управления и инфраструктура, а также выделяются необходимые средства для масштабных исследований. Разрабатываются технические регламенты по безопасности систем и устройств, предназначенных для производства, хранения, транспортировки и использования водорода. Привлекательной стороной использования водорода в детонационных двигателях является широкий диапазон детонационных режимов его горения.

По мере изменения представлений о природе детонации всё более усложнялись модели этого явления. Сначала использовалось простейшее представление о детонационной волне как о бесконечно тонкой поверхности разрыва параметров (модель Зельдовича-Неймана-Дёринга), затем двухстадийная модель Коробейникова-Левина, в которой уже учитывалось влияние химических превращений в зоне горения на параметры лидирующей ударной волны. Следующим шагом стали представления о сложном нестационарном трехмерном строении фронта детонации, асимптотических свойствах детонационных волн. Было показано, что пересжатая плоская волна асимптотически стремится к стационарной детонации Чепмена-Жуге, но никогда её не достигает. В случае же цилиндрической или сферической детонации её фронт переходит в режим Чепмена-Жуге за конечное время.

Детонация Чепмена-Жуге является самоподдерживающейся. Для возникновения детонационной волны к горючей смеси необходимо подвести энергию, превышающую некоторое критическое значение, называемое критической энергией инициирования. Если энергия ниже критического значения, то детонация переходит в обычное горение. Изучены различные способы инициирования детонации: искрой, электрическим разрядом, запаль-

ным устройством, точечным взрывом в замкнутом объеме, лазерным пучком. Показано, что с помощью лазерного луча можно инициировать пересжатую детонацию, в том числе, и с плоским фронтом, и со сходящимся. Рассмотрено распространение детонационных волн внутри каналов различной конфигурации. Большая скорость горения делают перспективным применение детонации в реактивных и ракетных двигателях. Термодинамическая эффективность цикла детонационного горения не менее, чем на 25 % превосходит цикл Брайтона горения при постоянном объеме даже в наименее выгодном режиме Чепмена-Жуге. Переход к пересжатой детонации повышает эффективность детонационного цикла в разы.

Быстрота сжигания топлива, сверхзвуковая скорость процесса, высокая температура и повышенное давление продуктов определяют области технического использования газовой детонации. Основные требования к детонационным установкам — это взрывобезопасность и экологичность, стабильность работы и высокая производительность. При технологическом применении газовой детонации приходится решать проблемы быстрого и качественного смешения компонентов смеси, надежного инициирования детонации, охлаждения установок, учитывать пределы детонации, прочность и вес аппаратов и т. д. [16].

Детонационно-газовые устройства могут быть импульсными или непрерывного действия. К ним тесно примыкают аппараты, использующие гетерогенные системы (например, газокпельные или газозвеси порошковых материалов). Газовую детонацию можно использовать для создания тяги в двигателях, силового или разрушающего воздействия на объекты, находящиеся как внутри, так и снаружи аппарата, для нагрева и метания конденсированных частиц, быстрого сжигания топлива и т. п.

Несмотря на остороженное отношение неспециалистов к взрывным

технологиям, газовая детонация находит все большее применение в технике. Наука накопила достаточно знаний об этом процессе и имеются средства его управляемого использования.

Одним из первых важнейших и хорошо развитых в настоящее время приложений газовой детонации является нанесение износостойких, теплозащитных, электроизоляционных и других видов порошковых покрытий на наружные поверхности деталей различного назначения. Суть метода, впервые предложенного в середине XX века [17], состоит в нагреве и метании порошковых частиц на обрабатываемую поверхность с помощью газовой детонации. Создание этого пионерского изобретения связано с исследованиями детонации ацетилена для поиска безопасных методов его хранения и транспортировки, проводимыми в конце 1940-х годов Linde Company [18].

Результаты исследований впервые показали, что разрушительная сила газовой детонации может быть использована для выполнения полезной работы. Усилия исследователей были направлены на разработку улучшенного процесса осаждения твердых покрытий с улучшенными свойствами по сравнению с покрытиями, получаемым газопламенным напылением ацетилено-кислородным пламенем. Эта технология, известная как Detonation Gun process, стала основой торгово-промышленной деятельности Linde Division в 1953 г. По частной информации, полученной одним из авторов от сотрудников Union Carbide, разработка способа и первого устройства детонационно-газового напыления были выполнены по собственной инициативе энтузиастами-сотрудниками фирмы. В 70–80-е годы прошлого века детонационно-газовое напыление обеспечивало получение наиболее качественных покрытий и фирма не продавала лицензий на процесс и оборудование. Было создано 14 заводов по нанесению и обработке покрытий в наиболее развитых промышленных городах мира, которые выполня-

ли услуги по нанесению и обработке высококачественных покрытий на деталях.

Отсутствие технологий получения твердых износостойких покрытий в СССР стимулировало разработку и развитие детонационно-газового напыления в 1960-е годы. Особую потребность в нем испытывала авиационная промышленность. В западных странах практически не выпускались газотурбинные двигатели без детонационных покрытий. Во время вьетнамской войны стали доступны образцы деталей американских самолетов с покрытиями, предположительно, полученных детонационно-газовым напылением.

Это стимулировало проведение исследований по детонационно-газовому напылению в Институте проблем материаловедения АН УССР (ИПМ АН УССР) под руководством член-кор. АН УССР Самсонова Г.В. [19, 20]. Исследования начинал Шестерненко В.И., затем подключились Краснов А.Н., Астахов Е.А., Шаривкер С.Ю. и др. С этого времени в Украине начались систематические исследования и разработки по технологии детонационно-газового напыления (ДГНП) и создание научных и технологических основ процесса.

На этот момент времени практически отсутствовали сведения о физических основах процесса, многочисленные публикации в западной печати носили в основном рекламный характер. Исследования также начали проводиться в Днепропетровских химико-технологическом (Корнев А.Д., Шинкаренко В.И. и др.) и металлургическом (Шмырева Т.П., Воробьев Г.М.) институтах, Ворошиловградском машиностроительном институте (Харламов Ю.А., Рябошапка Б.Л. и др.), ПО «Киеварматура» (Зверев А.И., Шестерненко В.И.), ЦКБ «Ленинская кузница» (г. Киев), Институте электросварки им. Е.О. Патона АН УССР (г. Киев), ОАО «Мотор-Сич» (г. Запорожье) и в других организациях. Позднее к исследованиям подключились Харьковский авиационный институт,

Научно-исследовательский институт технологии машиностроения (г. Харьков).

Первые диссертации по ДГНП также были защищены украинскими учеными (кандидатские – Шестерников В.И., Астахов Е.А., Харламов Ю.А., Зверев А.И., Шмырева Т.П. и др.; докторские – Шмырева Т.П., Харламов Ю.А. и др.). Именно по результатам украинских ученых были опубликованы первые монографии и брошюры по ДГНП, в которых достаточно подробно изложены результаты этого начального этапа изучения метода и разработки устройств для его реализации [21–34]. Этот начальный этап изучения метода и разработки устройств для его реализации подробно изложен в [31, 34].

Важным результатом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по детонационно-газовому напылению в Украине явилась продажа лицензий на детонационно-газовые установки ЦКБ «Ленинская кузница», ИПМ АН УССР в США и другие западные страны. Украинские разработки по оборудованию, технологии и материалам для детонационно-газового напыления интенсивно внедрялись на заводах авиационной, оборонной, судостроительной и других отраслей промышленности СССР.

На начальном этапе работы по ДГНП начали проводиться также в Калининском политехническом институте (Гордеева Л.Т., Федько Ю.П. и др.), Научно-исследовательском институте автомобильной промышленности (г. Москва), Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе АН СССР (г. Ленинград) и других организациях России. Позднее фундаментальные и прикладные исследования ДГНП начали проводиться в Институте гидродинамики СО АН СССР (г. Новосибирск), имеющем существенные достижения в исследовании природы газовой детонации на мировом уровне.

На начальном этапе украинскими учеными были разработаны основные

положения последовательной концепции формирования детонационно-газовых покрытий. Впервые появились теоретические и экспериментальные оценки состояния напыляемых частиц в момент удара о поверхность детали – температуры и скорости. Были изучены явления, сопровождающие соударение напыляемых частиц, особенности образования прочного сцепления частиц с поверхностью детали, разработаны технологические операционные процессы напыления покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома, оксидов алюминия и др.

По результатам всех этих работ были разработаны и внедрены руководящие технические материалы по детонационному напылению [35].

Необходимо отметить, что детонационно-газовое напыление явилось первым методом высокоскоростного газотермического нанесения покрытий и стимулировало мировую тенденцию разработки других высокоскоростных способов напыления – высокоскоростного газопламенного, плазменного, газодинамического и др.

### Выводы.

1. Газовая детонация, являющаяся комплексом сложных физико-химических процессов, изучается с конца XIX в.
2. В настоящее время в результате большого комплекса проведенных фундаментальных и прикладных исследований в ведущих индустриальных державах мира установлена перспективность использования детонационного режима горения газов в разнообразных технических приложениях.
3. Первым практическим применением газовой детонации явилось детонационно-газовое напыление, разработанное в середине XX в.
4. В СССР разработка и внедрение оборудования и технологии детонационно-газового напыления реализованы впервые инженерами и учеными Украины.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective / G. D. Roy, S. M. Frolov, A. A. Borisov, D. W. Netzer // *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004), 545–672.
2. Зельдович Я. Б. Об энергетическом использовании детонационного сгорания // *Журнал технической физики*. – 1940. – № 1(17). – С. 1453–1461.
3. Nicholls J. A., Wilkmon H. R., Morrison R. B. Intermittent detonation as a thrustproducing mechanism // *Jet Propulsion*. 1957. Vol. 21. P. 534–541.
4. Helman D., Shreeve R. P., Eidelman S. Detonation pulse engine // *AIAA Paper*. 1986. No. 86. 1683.
5. Adamson T. C., Olsson G. R. Performance analysis of a rotating detonation wave rocket engine // *Astronautica Acta*. 1967. Vol. 13. No. 4. P. 405–415.
6. Shen P. I.-W., Adamson T. C. Theoretical analysis of a rotating two-phase detonation in liquid rocket motors // *Astronautica Acta*. 1972. Vol. 17. P. 715–728.
7. Dunlap R., Brehm R. L., Nicholls J. A. A preliminary study of the application of steady-state detonative combustion to a reaction engine // *Jet Propulsion*. 1958. Vol. 28. P. 451–456.
8. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // *Доклады АН СССР*. – 1959. – Т. 129. – № 6. – С. 1251–1256.
9. Солоухин Р. И. Методы измерения и основные результаты в экспериментах на ударных трубах. – Новосибирск: Наука, 1969.
10. Щелкин К. И. Неустойчивость горения и детонации газов // *Успехи физических наук*. – Том 87 (выпуск 2). – 1967. – С.273–302.
11. Wojcechowski B. V., Mitrofanov V. V., Topchijan M. E. Struktura fronta detonacii v gazah. Novosibirsk, Izd-vo SO AN SSSR, 1963.
12. Войцеховский Б. В. Спиновая стационарная детонация // *ПМТФ*. – 1960. – №3. – С. 157–164.
13. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация / *Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. – 423 с.
14. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. Vol. 30. No. 6. P. 545–672.
15. Wolanski P. Detonative propulsion // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2013. Vol. 34. No. 1. P. 125–158.
16. Николаев Ю. А., Васильев А. А., Ульяницкий В. Ю. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // *Физика горения и взрыва*. – 2003. – Т. 39. – № 4. – С. 22–54.
17. Method and apparatus utilizing detonation waves for spraying and other purposes: US Patent 2,714,553. August 2, 1955 / Poorman R. M., Sargent H. B., Lamprey H.
18. Problem Solving Technology. Bulletin F-4009B. – Union Carbide. Coatings Service, 1978. – 24 p.
19. Шестерненко В. И. Детонационное нанесение покрытий // *Порошковая металлургия*. – 1968. – № 1. – С. 37–46.
20. Самсонов Г. В., Шаривкер С. Ю. Детонационные покрытия // *Энциклопедия неорганических материалов*. Т. 1. – К.: Главная редакция УСЭ, 1977. – С. 327–329.
21. Банатов П. С., Харламов Ю. А., Рябошапко Б. Л. Теоретические предпосылки прогнозирования толщины покрытия при детонационном напылении // *Автоматизация производственных процессов в машиностроении: Ворошиловгр. машиностр. ин-т. Сборник трудов ин-та*, № 16. – Львов, 1972. – С. 40–45.
22. Банатов П. С., Харламов Ю. А. Детонационный метод напыления и перспективы его применения для упрочнения технологической оснастки // *Плазменная обработка в инструментальном производстве*. – Рига: ЛатИНТИ, 1973. – С. 45–52.
23. Применение детонации в газах для нанесения покрытий / Ю. А. Харламов, М. Х. Шоршоров, В. В. Кудинов, О. В. Гусев, Б. Л. Рябошапко // *Физика горения и взрыва*. – 1975. – Т. 11, № 1. – С. 88–95.

24. Использование детонации в газах для напыления защитных покрытий / Ю. А. Харламов, М. Х. Шоршоров, Б. Л. Рябошапка, О. В. Гусев // Процессы горения в химической технологии и металлургии. – Черноголовка Московской области: Отделение Ин-та хим. физики АН СССР, 1975. – С. 156–162.
25. Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А. Напыление защитных покрытий с помощью детонации в газах. – М.: Ин-т металлургии им. А. А. Байкова АН СССР, 1973. – 43 с.
26. Харламов Ю. А. Получение и применение детонационных покрытий в машиностроении. – М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1975. – 36 с.
27. Kharlamov Y. A. Bonding of Detonation-Sprayed Coatings // Thin Solid Films, 1978, vol. 54, No. 3, pp. 271–278.
28. Kinetic microhardness of coatings produced by D-Gun spraying / Y. A. Kharlamov, B. L. Ryaboshapko, I. V. Schetinin, et al. // Advances in thermal spraying. ITSC'86. Proceedings of the Eleventh Intern. Thermal Spraying Conf., Motreal, Canada, September 8–12, 1986. Welding Institute of Canada. – NY: Pergamon Press, 1986, pp. 621–630.
29. Kharlamov Y. A. Detonation Spraying of Protective Coatings // Materials Science and Engineering, vol. 93(1987), pp. 1–37.
30. Kharlamov Y. A., Gorb L. L. Small-sized detonation gas installation for applying powder coatings // Heat Treatment and Surface Coating Technology. New Technology and Application Practice: Materials of the 7th International Congress for the Heat Treatment of Materials. Vol. VI. – Moscow, 1990. – Pp. 89–95.
31. Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
32. Детонационно-газовая аппаратура для напыления покрытий / Ю. А. Харламов, М. Х. Шоршоров, Ю. И. Писклов, Б. Л. Рябошапка. – М.: Ин-т металлургии им. А. А. Байкова АН СССР, 1980. – 65 с.
33. Харламов Ю. А., Шоршоров М. Х. Методические рекомендации по проектированию производства газотермических покрытий. – М.: Ин-т металлургии им. А. А. Байкова АН СССР, 1981. – 68 с.
34. Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А. Детонационное напыление покрытий. – Л.: Судостроение, 1979. – 278 с.
35. Руководящие технические материалы: Нанесение покрытий из порошков методом детонационного напыления. Типовой технологический процесс. – К.: ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР. – 1990. – 96 с.

**Харламов Ю.А., Полонский Л.Г. Первое практическое применение импульсного детонационного горения газов.** В статье рассмотрены основные понятия, связанные с особенностями детонационного горения газов. Приведены перспективы и основные направления практического использования газовой детонации и этапы работ, посвященных экспериментальному и теоретическому изучению газовой детонации. Показана ведущая роль ученых и инженеров Украины в разработке и внедрении детонационно-газового напыления покрытий.

**Ключевые слова:** детонация, детонационное напыление, импульс, горение, газ

**Kharlamov Yu.A., Polonsky L.G. The first practical application of pulsed detonation combustion of gases.** The article deals with the basic concepts associated with the peculiarities of detonation combustion of gases. Prospects and main directions of the practical use of gas detonation and the stages of work devoted to experimental and theoretical studies of gas detonation are presented. The leading role of scientists and engineers of Ukraine in the development and implementation of detonation-gas spraying of coatings is shown.

**Key words:** detonation, detonation spraying, pulse, combustion, gas