

# ДЕТОНАЦИЯ ВО БЛАГО!

Доктор физико-математических наук В.В. ГОЛУБ  
(ОИВТ РАН)

DOI: 10.7868/S0233361918060010

## Введение

**Детонация** – это самоподдерживающийся режим распространения горения, который характеризуется комплексом из ударной волны и следующей за ней зоны экзотермических химических реакций, инициированных ударным сжатием. Этот комплекс называется **детонационной волной**.

При прохождении фронта ударной волны вещество нагревается. Если ударная волна достаточно сильная, то температура за фронтом ударной волны может превысить температуру самовоспламенения вещества, и в нём начинаются экзотермические химические реакции, в ходе которых выделяется энергия, подпитывающая ударную волну. Механизм превращения энергии в детонационной волне отличается от механизма в волне медленного или дефлаграционного<sup>1</sup> горения, распространяющегося с дозвуковой скоростью, в которой передача энергии в исходную смесь осуществляется в основном теплопроводностью. Многие вещества способны как к дефлаграционному горению, так и к детонационному. В определённых условиях медленное горение может самопроизвольно переходить в детонацию.

Детонацию, как физико-химическое явление, не следует отождествлять со взрывом. Взрыв – это процесс, в котором за короткое время в ограниченном объёме выделяется большое количество

энергии и образуются газообразные продукты взрыва, способные совершить значительную механическую работу или вызвать разрушения в месте взрыва. Взрыв может иметь место и при воспламенении и быстром сгорании газовых смесей или взрывчатых веществ в ограниченном пространстве, хотя при этом детонационная волна не образуется. Так, быстрое (взрывное) сгорание пороха в стволе артиллерийского орудия в процессе выстрела не является детонацией.

**Термодинамически детонация – это самый эффективный способ прямого сжигания горючего**, на что впервые указал Я.Б. Зельдович<sup>2</sup>. По его оценкам при использовании детонационного сгорания топлива прямоточные воздушно-реактивные двигатели должны иметь максимально возможную термодинамическую эффективность.

Поэтому в последние годы и в нашей стране, и за рубежом ведутся исследования по созданию различных технических устройств с использованием управляемой газовой детонации. Это обосновано стремлением наиболее эффективно преобразовать химическую энергию топлива в кинетическую энергию продуктов сгорания. Преимущество детонационного режима горения по сравнению с дефлаграционным состоит в том, что в нём используется цикл, близкий к термодинамическому циклу при постоянном объёме и в более быстром выделении

<sup>1</sup> Дефлаграционное горение – такой режим горения, при котором пламя распространяется с дозвуковой скоростью, в отличие от детонационного режима горения, при котором пламя распространяется со сверхзвуковой скоростью.

<sup>2</sup> Зельдович Я.Б. Об энергетическом использовании детонационного сгорания // Журн. техн. физики. 1940. Т. 17. № 1. С. 1453–1461.

энергии. Это позволяет проектировать двигатели с высокой удельной мощностью. При детонационном сжигании кислородно-водородной газовой смеси удельная мощность энерговыделения может на порядок превосходить удельную мощность ракетных кислородно-водородных двигателей. Параметры газа при детонационном сжигании во много раз больше, чем при обычном сжигании.

Использование детонации в камере сгорания предполагает воздействие продуктов детонации на некоторую рабочую поверхность. При детонации резко возрастает давление продуктов сгорания, импульс давления воздействует на эту рабочую поверхность. Затем продукты сгорания расширяются, охлаждаются и выбрасываются в окружающее пространство, освобождая объём для новой порции газов. В пульсирующем детонационном устройстве цикл повторяется с определённой частотой.

Высокие температуры и давления, разбиваемые при газовой детонации, делают перспективным использование этого явления в технике. Например, известны оригинальные разработки Института гидродинамики СО РАН по напылению и по очистке изделий от заусенцев, внедрённые в практику. Мы приведём некоторые примеры перспектив применения детонации в технике, а именно: пульсирующий детонационный двигатель, сверление и дробление пород, освобождение резины от металлокорда в использованных автопокрышках, безыгольная инъекция.

### **Пульсирующий детонационный двигатель**

Совершенствование как прямооточных воздушно-реактивных, так и ракетных двигателей летательных аппаратов заключается главным образом в повышении эффективности использования запасённой энергии при минимальном изменении массогабаритных характеристик. Численный и аналитический ана-

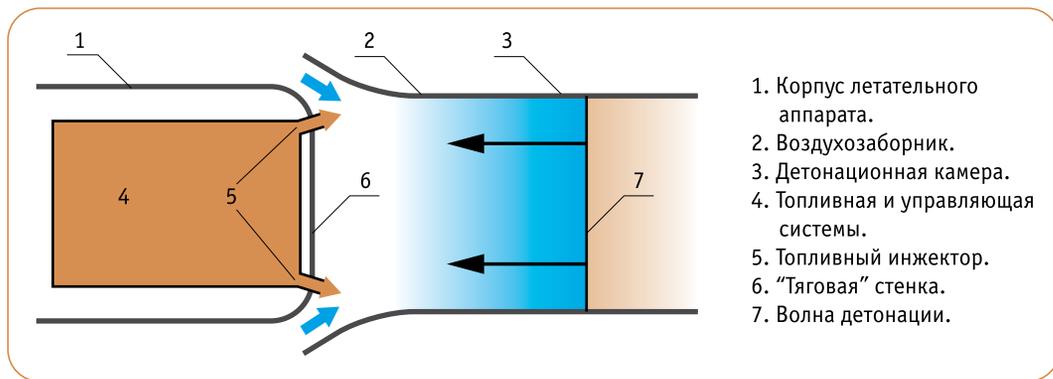
лиз модели "обобщённого" пульсирующего детонационного двигателя (ПДД) показал перспективность его использования в авиации и ракетной технике<sup>3</sup>. Массогабаритные характеристики детонационного двигателя соизмеримы с характеристиками турбореактивного двигателя. Преимущество детонационного двигателя с автоматическим подсосом воздуха в полёте состоит также в том, что в нём отсутствуют движущиеся части.

Принцип работы пульсирующего детонационного двигателя следующий. Ударная волна, являющаяся частью детонационной, служит поршнем между продуктами детонации и свежей смесью. Скорость детонационного поршня на два порядка выше скорости нормального горения. Частота циклов может варьироваться независимым инициированием детонации с помощью контролируемой системы поджига.

На рис. 1 показана принципиальная схема пульсирующего детонационного двигателя. Существует два варианта работы предполагаемого двигателя в режиме частотной детонации. Прямая схема осуществляется при инициировании детонации у закрытого конца камеры. Давление в камере возрастает до значения давления в продуктах реакции за детонационной волной. При расширении продуктов реакции производится полезная работа.

Инвертированная схема осуществляется при инициировании детонации у открытого конца камеры (рис. 1). Импульс давления на рабочую поверхность в этом случае максимален, так как после отражения от неё ударная волна будет останавливать движущиеся за ней продукты реакции, при этом почти вся кинетическая энергия продуктов передаётся на корпус летательного аппарата. После выхода отражённой волны за пределы детонационной камеры происходит адиабатическое расширение продуктов в сопле.

<sup>3</sup>Импульсные детонационные двигатели. Под редакцией С.М. Фролова. Торус Пресс, Москва, 2006. 592 стр.



**Рис. 1.**  
**Принципиальная схема пульсирующего детонационного двигателя.**  
 1 – корпус летательного аппарата,  
 2 – воздухозаборник, 3 – детонационная камера, 4 – топливная и управляющая системы, 5 – топливный инжектор, 6 – "тяговая" стенка, 7 – волна детонации.

Сравнение прямого и инвертированно-го циклов показывает, что запас механической энергии, которым обладают продукты реакции и который расходуется при перемещении границ области заполнения в процессе их расширения в инвертированной схеме выше, чем в прямой.

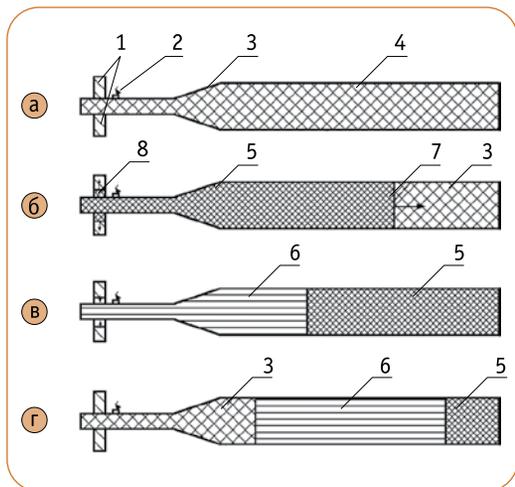
### Работа детонационной камеры сгорания в частотном режиме

Для создания периодического детонационного режима в большинстве известных устройств обычно использовались механические клапаны для периодической подачи горючей смеси. Эти устройства успешно работали с частотой следования детонационных волн в газовых смесях до нескольких десятков герц. Однако при работе на частотах 100 Гц и более клапанная система создаёт большие трудности. Рассмотрим устройство, созданное для исследований детонационных процессов, позволяющее генерировать детонационные волны с частотой до 100 Гц<sup>4</sup>. Детонационная камера

сгорания (ДКС) состоит из форкамеры – трубки малого сечения (для формирования в ней детонации) и основной камеры, соединённой расширяющимся конусом с форкамерой (рис. 2). Газообразное горючее и окислитель поступают в ДКС из баллонов по трубопроводам. Для задания требуемых расходов газов использовалась регулирующая аппаратура, состоящая из кранов и редукторов.

Отличительной чертой ДКС являлось отсутствие механических клапанов в системе подачи горючего и окислителя. Работа ДКС в импульсном режиме достигалась за счёт газодинамических процессов в магистралях подачи горючего и окислителя, так называемых "газодинамических клапанов": происходило прерывание с необходимой частотой подачи горючего и окислителя в ДКС и предотвращение неконтролируемого поджига новой порции горючей смеси продуктами сгорания предыдущего цикла. "Газодинамические клапаны" работали следующим образом. В камере формировалась горючая смесь (рис. 2, а). Поджиг смеси приводил к возникновению детонационной волны и, следовательно, к повышению давления в ДКС. В тот момент, когда давление в ДКС начинало превышать давление в подводящих магистралях, происходило затекание продуктов сгорания в соответствующие магистрали, тем самым прерывалось поступление горючего и окислителя в ДКС (газодинамические клапаны закрыты, рис. 2, б). При движении в длинных и узких

<sup>4</sup>Бакланов Д.И., Жимерин Д.Г., Киселёв Ю.Н. и др. О некоторых технических аспектах использования детонационного режима сгорания // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12. № 1. С. 47–52.



**Рис. 2.**  
**Схема рабочего цикла детонационной камеры сгорания:**  
 1 – каналы подачи горючего и окислителя с клапанами, 2 – искра, 3 – горючая смесь, 4 – камера сгорания, 5 – горячие продукты сгорания, 6 – охлаждённые продукты сгорания, 7 – фронт детонационной волны, 8 – фронты горячих продуктов сгорания, истекающих в каналы подачи горючего и окислителя.

магистралях продукты детонации охлаждались. После выхода детонационной волны из камеры сгорания внутри последней навстречу потоку продуктов детонации начинала распространяться волна разрежения. Достигнув магистралей подачи горючего и окислителя, она распространялась по каналам, и через некоторое время давление в продуктах сгорания уменьшалось, что вызывало обратное движение газов в магистралях (газодинамические клапаны открыты, рис. 2, в). Начиналось обратное истечение охлаждённых продуктов сгорания в камеру, а затем заполнение ДКС новой горючей смесью, при этом между горючей смесью и горячими продуктами сгорания, температура которых превышала температуру самовоспламенения горючей смеси, располагались охлаждённые продукты сгорания, что предотвращало поджиг горючей смеси (рис. 2, г). После заполнения ДКС

(рис. 2, а) проводился поджиг горючей смеси, и цикл повторялся. Период времени  $t$ , в течение которого после поджига горючей смеси ДКС вновь заполнялась свежей смесью, включал в себя: 1) время перехода дефлаграции в детонацию; 2) время распространения детонационной волны в ДКС; 3) время истечения продуктов сгорания из ДКС в окружающее пространство; 4) время истечения охлаждённых продуктов сгорания из магистралей горючего и окислителя в ДКС; 5) время заполнения ДКС горючей смесью.

В общем случае частота зависела от длины камеры сгорания, её диаметра, длины магистралей подачи горючего и окислителя, их диаметра, давления в них, вида горючего и окислителя, и коэффициента избытка окислителя. Зная все эти параметры, можно оценить предельную частоту работы ДКС.

Эксперименты проводились со стехиометрической смесью водорода с воздухом, пропана с кислородом, а также со смесями метана с кислородом ( $\text{CH}_4 + 2\alpha\text{O}_2$ ) при изменении коэффициента избытка окислителя  $\alpha$  от 0.5 до 2.0. Начальное давление смесей 100 кПа. Давление в подводящей системе 300 кПа.

Камера работала в пульсирующем детонационном режиме. Датчики давления и фотодиоды, располагавшиеся вдоль камеры, показали, что в каждом импульсе осуществлялась детонация. В пульсирующем детонационном режиме камера сгорания могла работать практически неограниченное время. Время работы лимитировалось лишь запасом топлива и окислителя. Наибольшая частота работы 92 Гц была достигнута в пропанокислородной смеси.

При работе пульсирующего детонационного двигателя периодическое воздействие детонационной волны на тяговую стенку приводит к значительным вибрационным нагрузкам. В отделе физической газодинамики ОИВТ РАН была разработана камера пульсирующего двигателя детонационного горения, в которой тяговая стенка выполнена подвижной в виде

## Пульсирующий детонационный двигатель с резонатором

Разработки МГУ и Военно-воздушной академии им. Н.Е. Жуковского были одними из первых в России на пути создания ПДД<sup>7</sup>. Было предложено устройство, в котором отсутствуют механические клапаны и управляемая импульсная система зажигания. В газодинамическом резонаторе, периодически заполняющемся топливовоздушной смесью, пульсирующий процесс возникает за счёт возбуждения резонансных автоколебаний. Амплитуда колебаний усиливается за счёт выделения тепла при детонационном сгорании смеси в ударно-волновых структурах.

На рис. 3 приведена схема тягового устройства пульсирующего детонационного двигателя с резонатором. Резонатор представляет собой полузамкнутую сферическую полость, около среза которой (на экваторе) установлено кольцевое сопло. Топливоздушная смесь нужного состава образуется в резонаторе путём подмешивания сжатого воздуха к продуктам неполного сгорания. Подготовленная в реакторе смесь подаётся через сопло в резонатор. Подготовка смеси осуществляется путём предварительного нагрева и последующего разложения горючих компонентов на высокоактивные составляющие. Реакция горения в такой смеси не успевает начаться за малое время пребывания смеси в реакторе, а после выхода из сопла происходит "замораживание" состава в волне разрежения. Полузамкнутая полость периодически отделяется от внешнего пространства газодинамическим затвором, способным удерживать внутри полости газ под давлением, превышающим атмосферное, и предотвращающим проникновение в полость внешних возмущений. Затвор, заменяющий клапан,

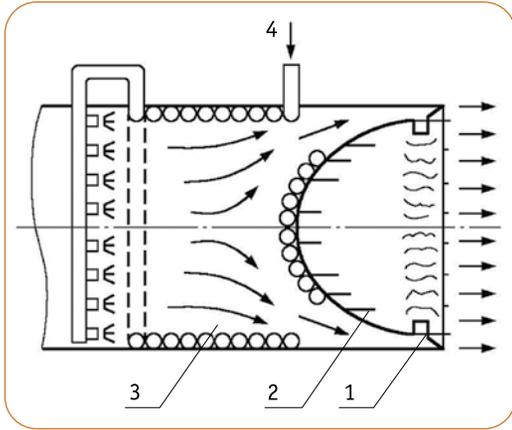


Рис. 3.

Схема тягового устройства пульсирующего детонационного двигателя с резонатором: 1 – кольцевое сопло, 2 – резонатор, 3 – реактор для подготовки топливовоздушной смеси, 4 – подача топлива.

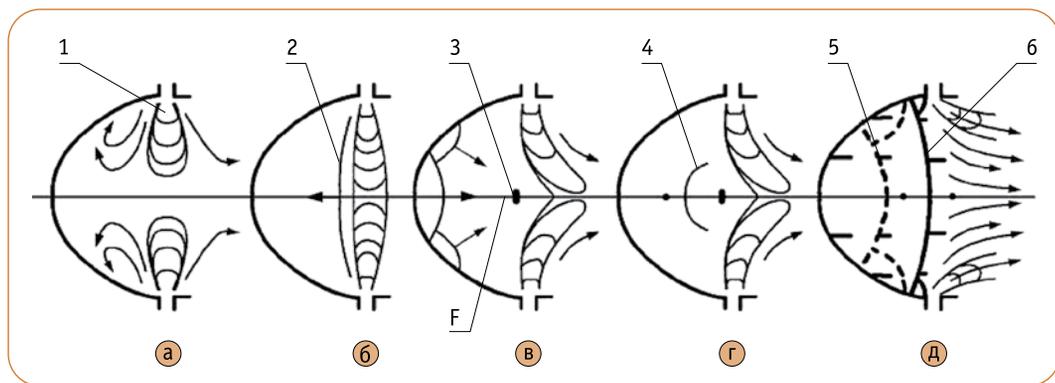
поршня предварительного сжатия окружающего воздуха<sup>5</sup>. Предложенная конструкция не только на порядок снижает вибрационные нагрузки, но и обеспечивает использование пульсирующих двигателей детонационного горения в режимах с низкими скоростями полёта летательных аппаратов.

Летательный аппарат с силовой установкой, использующей подобные пульсирующие детонационные двигатели, также был разработан в отделе физической газодинамики ОИВТ РАН совместно с фирмой FIAT<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Володин В.В., Лисин Д.Г., Головастов С.В., Бакланов Д.И., Чепрунов А.А., Голуб В.В. Камера пульсирующего двигателя детонационного сгорания. Патент РФ на изобретение РФ № 2293866 БИ № 5 от 20.02.2007; Semin N.V., Golub V.V. Two stroke pulse detonation engine: concept and numerical model // *Deflagrative and detonation combustion* / G. Roy, S. Frolov (Ed.). Moscow: Torus Press, 2010. P. 381–392.

<sup>6</sup> Golub V., Perlo P., Kotelnikov A. Aircraft, particularly small aircraft, having a propulsion system including a plurality of pulse detonation engines // *European patent EP 1557356*; Голуб В.В., Володин В.В., Подобедов В.А., Котельников А.Л., Перло Пьеро. Летательный аппарат с силовой установкой, использующей пульсирующие детонационные двигатели. Патент на изобретение РФ № 2 226 549 БИ № 26. 22.09.2005.

<sup>7</sup> Патент РФ 2034996. Способ получения тяги и устройство для его осуществления / Антоненко В.Ф., Пушкин Р.М., Тарасов А.И. и др. Бюллетень изобретений. 1995. № 3. С. 208; Левин В.А., Нечаев Ю.И., Тарасов А.И. Новый подход к организации рабочего процесса пульсирующих детонационных двигателей // *Хим. физика*. 2001. Т. 20. № 6. С. 90–98.



**Рис. 4.**  
**Цикл работы тягового устройства**  
**пульсирующего детонационного**  
**двигателя с резонатором:**  
**1 – сверхзвуковая струя,**  
**2 – ударная волна, 3 – область**  
**фокусировки, 4 – детонационная волна,**  
**5 – волна разрежения,**  
**6 – отражённая ударная волна.**

представляет собой струйную завесу, образованную направленным истечением сверхзвуковых струй, периодически перекрывающих выходное сечение полости. Полость, замкнутая газодинамической завесой, представляет собой резонатор, частота автоколебаний в котором повышается с уменьшением размеров полости и с увеличением температуры газа.

Цикл работы устройства иллюстрирует рис. 4. При заполнении резонатора через сопло в камере образуется осесимметричная сверхзвуковая струя, направленная к его центру (рис. 4, а). При смыкании струи в центре возникает система скачков уплотнения, которая формирует ударную волну (рис. 4, б). Горючая смесь дважды сжимается: в ударной волне и в отражённой волне, фокусирующейся в точке F (рис. 4, в). Повышение давления и температуры в фокусе способствует воспламенению горючей смеси. Возникает взрывная волна, распространяющаяся в сторону днища (рис. 4, г), а отразившись от него, значительно повышает давление в резонаторе. При взаимодействии взрывной волны с донной поверхностью резонатора последнему передаётся импульс

от сил избыточного давления, и в камере развивается тяговое усилие. При истечении продуктов сгорания в камере появляется волна разрежения (рис. 4, д), которая обеспечивает всасывание новой порции горючей смеси через кольцевое сопло.

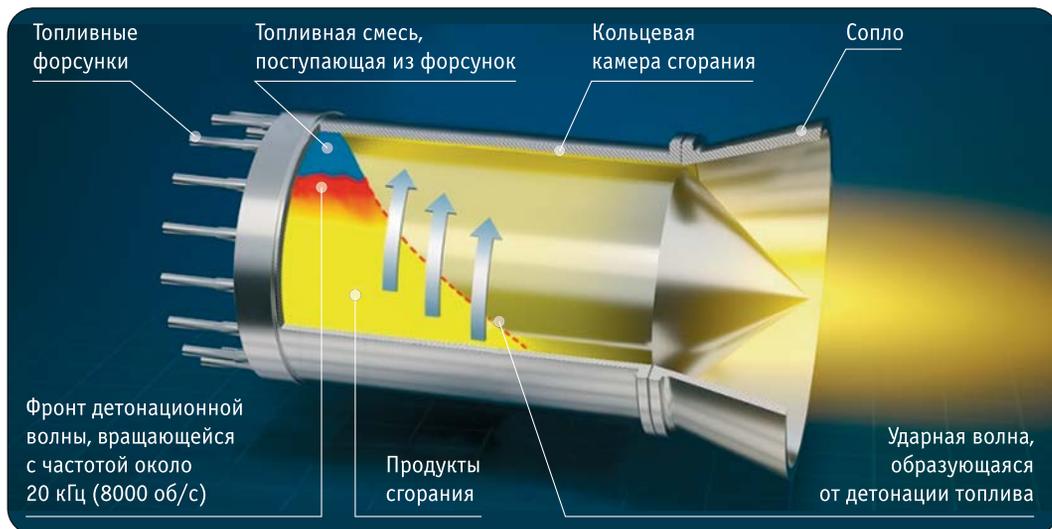
Оптимизация геометрических размеров и параметров тягового устройства была выполнена при испытаниях устройства в Институте механики МГУ. Отработанный базовый единичный модуль тягового устройства, использующий в качестве топлива ацетилен, создаёт тягу до 2000 Н. Опыты проводились в диапазоне давлений  $0.5 \div 0.8$  МПа. Удельный расход топлива оказался на  $15 \div 20\%$  ниже, чем предполагается для стехиометрического турбореактивного двигателя с тем же топливом.

### **Ротационный, или спиновый, детонационный двигатель**

В институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН Б.В. Войцеховским было открыто явление спиновой детонации<sup>8</sup> и предложен способ сжигания топлива в режиме непрерывной детонации<sup>9</sup>. Сегодня работы по исследованию ротационных детонационных двигателей проводятся как

<sup>8</sup>Войцеховский Б.В. Спиновая стационарная детонация // ЖПМТФ. 1960. № 3. С. 157–164.

<sup>9</sup>Быковский Ф.А., Войцеховский Б.В., Митрофанов В.В. Способ сжигания топлива. Патент № 2003923. Заявка № 4857837/06 от 06.08.1990 // Бюллетень изобретений. 1993. № 43–44.



**Рис. 5.**  
**Ротационный, или спиновый, детонационный двигатель**  
 (источник: <https://cosmos.mirtesen.ru/blog/43870557496/Detonatsionnyiy-dvigatel-%E2%80%94buduschee-rossiyskogo-dvigatelsestroen>)

в институте гидродинамики СО РАН<sup>10</sup>, так и в крупных исследовательских центрах мира<sup>11</sup>. В ротационном детонационном двигателе, в отличие от пульсирующего, образуется детонационная волна, вращающаяся по кольцеобразной камере сгорания. (рис. 5). Затем продукты сгорания расширяются в сопле с образованием реактивной струи. Это позволяет значительно снизить как вибрационные, так и акустические нагрузки. В СМИ сообщалось об успешных испытаниях детонационного жидкостного ракетного двигателя, созданного в НПО «Энергомаш». В новом двигателе тяга создаётся за счёт контролируемых

взрывов при взаимодействии топливной пары кислород-керосин.

Однако все существующие проекты детонационных двигателей, как пульсирующих, так и ротационных имеют общий недостаток – в детонационном режиме сгорает менее 50% топлива, что делает их эффективность ниже двигателей с дефлаграционным горением. Одной из главнейших проблем создания детонационных двигателей является увеличение доли детонационного режима сгорания топлива.

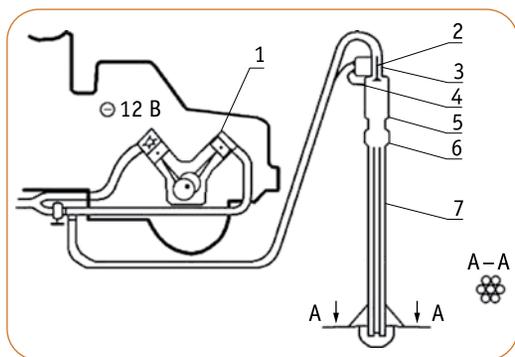
### Использование пульсирующей детонации для сверления и дробления пород

Схема установки для сверления пород, созданная в Московском государственном университете<sup>12</sup>, представлена на рис. 6. В установку поступает бензовоздушная смесь из V-образного автомобильного двигателя. Такой способ подачи смеси оказался пригодным для задач сверления. Камера сгорания диаметром 100 мм наполняется горючей смесью

<sup>10</sup>Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация / 4 Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.

<sup>11</sup>Wolanski P. Development of continuous rotating-detonation engines // Deflagrative and detonation combustion / G. Roy, S. Frolov (Ed.). Moscow: Torus Press, 2010. P. 395–406; Булат П.В., Продан Н.В. Обзор проектов детонационных двигателей. Ротационные детонационные двигатели // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-8. С. 1672–1675.

<sup>12</sup>Smirnov N.N., Nikitin V.F., Boichenko A.P., et al. Control of deflagration to detonation transition in gases and its application to pulsed detonation devices // Gaseous and Heterogeneous Detonations / G. Roy (Ed.). Moscow: ENAS Publishers, 1999. P. 65–94.



**Рис. 6.**  
**Схема установки с пульсирующей детонацией, питающейся бензовоздушной смесью от автомобильного двигателя:**  
 1 – автомобильный двигатель,  
 2 – автомобильная свеча, 3 – обратный клапан, 4 – источник питания,  
 5 – камера сгорания, 6 – форкамера,  
 7 – детонационные трубки. Сечение А-А показывает связь детонационных трубок.

через обратный клапан. Зажигание смеси производится автомобильной свечой. Горение вызывает повышение давления, которое запирает обратный клапан и допускает поступление смеси в форкамеру, являющуюся дополнительным турбулизатором потока. В связке детонационных трубок (диаметром 25 мм каждая), соединённой с форкамерой, происходят ускорение пламени и переход в детонацию. Пересжатая детонация формировалась на расстоянии  $2 \div 3$  м в зависимости от состава смеси и начальных условий. Затем устанавливался режим детонации Чепмена-Жуге (в этом режиме фронт детонационной волны движется относительно сгоревшего газа со звуковой скоростью. Режим Чепмена-Жуге является выделенным из всех возможных режимов детонации, поскольку только в этом режиме детонация может неограниченно распространяться самопроизвольно, без внешних воздействий).

В устройстве для сверления требуется максимальное давление за отражённой детонационной волной. Как было показано в опытах по отражению детонационных волн на различных стадиях

перехода, наибольшие нагрузки на поверхность даёт отражение пересжатой детонационной волны. При этом длина устройства не должна превышать 3 м. Частота генерации детонационных волн достигала  $5 \div 10$  Гц в зависимости от длины устройства и расхода смеси. Самая медленная стадия цикла – наполнение системы свежей смесью, что является причиной ограничения достигаемой частоты. Во всех семи детонационных трубках детонация возникала практически на одном и том же расстоянии от форкамеры.

### Утилизация изношенных автопокрышек

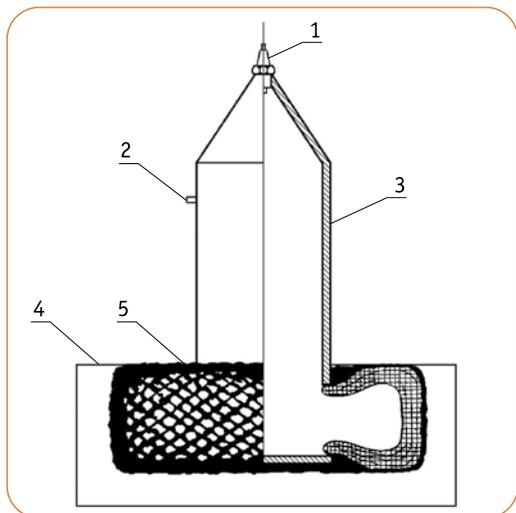
Детонационная установка может быть использована для отделения резины от металлокорда в изношенных металлокордовых автопокрышках и для дробления кусков резины. Существующие установки для дробления автопокрышек требуют большого расхода электроэнергии и содержат режущие части, которые необходимо периодически заменять. Принципиально новым подходом к этой проблеме является применение газовой детонации<sup>13</sup>. Методика состоит в резком повышении давления внутри автопокрышки, охлаждённой до  $-100^\circ\text{C}$ . Возрастание давления вызывается взрывом детонационно способной газовой смеси. Продукты взрыва не содержат экологически опасных веществ. Схема устройства для газозрывного дробления автопокрышек приведена на рис. 7.

Детонационная установка, созданная в ОИВТ РАН, состоит из детонационной камеры с системой наполнения газами и рабочей камеры, связанной с открытым концом трубы. Автопокрышки охлаждаются в криогенной системе до температуры, при которой резина становится хрупкой, после чего подаются в дробильную установку. Система

<sup>13</sup> Голуб В.В., Харитонов А.И., Бакланов Д.И., Фокеев В.П., Шаров Ю.Л., Давыдов А.Н. Устройство для переработки изношенных автопокрышек. Патент на изобретение № 2080261, 27.05.1997.

## Безыгольный инъектор

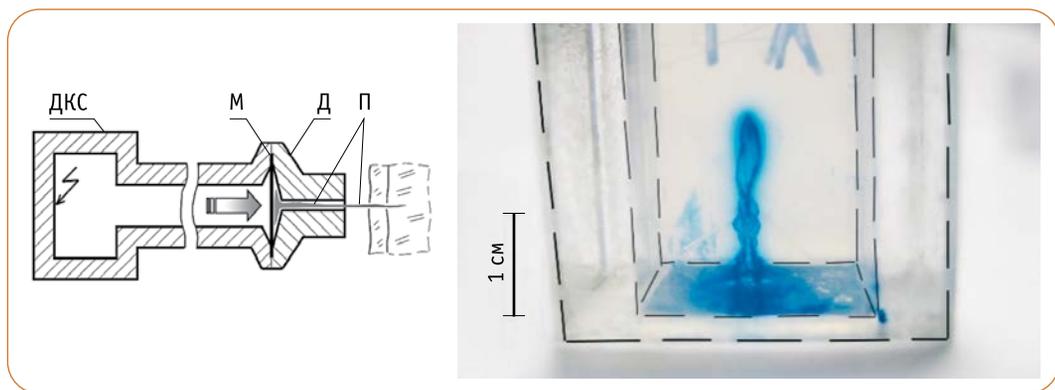
Одним из направлений разработок и исследования детонационного горения газов является использование кинетической энергии продуктов сгорания для создания кратковременного ударного воздействия. Развивающейся областью с использованием миниатюрных детонационных устройств на данный момент оказывается медицина, а именно – безыгольная инъекция лекарственных препаратов в микрообъёмах подкожно и внутримышечно. Безыгольные инъекции применяются для того, чтобы уменьшить боль и снизить повреждение тканей. Вытеснение дозы лекарства происходит под действием поршня, толкаемого газом под давлением или пружиной. Эффективность метода тем выше, чем больше скорость нарастания давления на поршень. В связи с этим возникли предложения использовать для безыгольных инъекций энергию микровзрыва твёрдого взрывчатого вещества (ВВ)<sup>14</sup> для ускорения микрокапсул лекарственных препаратов при введении их в эпидермис. Заряд ВВ заключается в трубке, на конце которой помещается контейнер с лекарством, отделенный от трубки металлической мембраной. При взрыве ВВ мембрана прогибается, лекарство выбрасывается через отверстие в торце трубки и образует тонкую струйку. Измеренная скорость струйки составляет 100 м/с, что достаточно для осуществления безболезненной безыгольной инъекции. Недостатком подобного метода является необходимость использования твёрдого взрывчатого вещества, продукты сгорания которого токсичны. В ОИВТ РАН исследована возможность замены твёрдого ВВ в аппаратах, предназначенных для



**Рис. 7.** Устройство для газозрывного дробления автопокрышек: 1 – блок поджига газовой смеси, 2 – система наполнения газами (горючий газ, окислитель), 3 – детонационная труба, 4 – рабочая камера, 5 – автопокрышка, охлаждённая до хрупкого состояния.

синхронизации открывает клапан, соединяющий камеру с детонационной трубкой, наполненной горючей газовой смесью, и включает поджигающую искру. Детонационная волна проникает в автопокрышку и разрушает её. 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. Время разрушения автопокрышки складывается из времени загрузки её в рабочую камеру, времени заполнения детонационной трубы детонационноспособной смесью и времени разгрузки рабочей камеры. В экспериментах ОИВТ РАН оно составляло 3 мин и его можно значительно снизить за счёт автоматизации. Полученная резиновая крошка после дополнительного измельчения может быть использована для производства различных изделий, например, кровельного листового материала, резиновых плит и т.д.

<sup>14</sup>Jagadees G. From Micro Explosions to Drug Delivery: Emerging Paradigms of Shock Wave Research // Book of Proc. 27th Int. Symp. on Shock Waves. Sanct Peterburg, Russia. July 19–24. 2009. Paper 3026. P. 417; Indian Patent Application № 260/CHE/2009; US Patent Application № 12480514.



**Рис. 8.** Макет-демонстратор безыгольного иньектора и результат испытаний по проникновению подкрашенной воды в агарозный гель, моделирующий подкожную клетчатку.

безыгольных иньекций, на водородо-воздушные смеси, продуктами сгорания которых является вода<sup>15</sup>. Это позволило создать устройство, передающее энергию продуктов газовой детонации лекарственному веществу с таким же крутым фронтом давления, как при взрыве твердого ВВ<sup>16</sup>.

Принципиальная схема макета-демонстратора детонационного безыгольного иньектора, генерирующего под действием детонационной волны тонкую струю жидкости, представлена на рис. 8. Макет состоит из детонационной камеры сгорания (ДКС), мембраны (М) или поршня для передачи импульса детонационной волны, дозатора лекарственного препарата (Д) с насадком и иньектируемым препаратом (П). Определены условия формирования и распространения детонационного горения внутри детонационной трубки,

имеющей субкритические размеры<sup>17</sup>. Определены геометрические параметры в зависимости от типа топлива, обеспечивающие стабильную работу устройства. Протестированы мембраны, изготовленные из нескольких типов металлов<sup>18</sup>. Создан критерий, позволяющий оценить эффективность миниатюрного детонационного устройства. Критерий связывает геометрические параметры форкамеры, кинетические характеристики топлива и критическую длину детонационной трубки.

Проведенное исследование показало, что энергия детонационной волны в водородовоздушной смеси может передаваться жидкости и разгонять её до скоростей порядка 70 м/с, при этом наблюдается проникновение струйки жидкости в модельную среду на глубину 15 мм. Использование газовой детонации позволит заменить менее эффективные источники энергии для ускорения лекарственных препаратов в аппаратах, предназначенных для безыгольных иньекций, на газовые смеси, что позволит упростить и удешевить устройства для таких иньекций.

<sup>15</sup>Бакланов Д.И., Голуб В.В., Иванов К.В., Кривокорытов М.С. Переход горения в детонацию в канале диаметром меньше критического диаметра существования стационарной детонации // ТВТ. 2012. Т. 50. № 2. С. 258.

<sup>16</sup>Голуб В.В., Бакланов Д.И., Володин В.В., Головастов С.В., Иванов К.В. Устройство для безыгольных иньекций. Патент РФ № 103476 от 20.04.2011.

<sup>17</sup>Голуб В.В., Баженова Т.В., Бакланов Д.И., Иванов К.В., Кривокорытов М.С. Применение детонации водородо-воздушной смеси в устройстве для безыгольной иньекции // ТВТ. 2013. Т. 51. № 1. С. 147–150.

<sup>18</sup>Баженова Т.В., Бакланов Д.И., Голуб В.В., Иванов К.В., Кривокорытов М.С. Метание капли жидкости через мембрану продуктами газовой детонации // ПЖТФ. 2013. Т. 39. В. 3. С. 49–56.