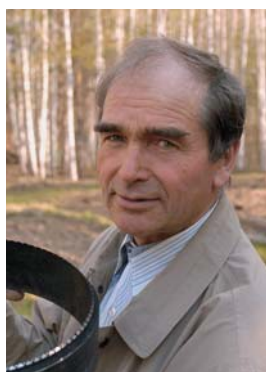


БЫКОВСКИЙ Ф. А., ЖДАН С. А., ВЕДЕРНИКОВ Е. Ф.

на пути к

# ДЕТОНАЦИОННОМУ ДВИГАТЕЛЮ



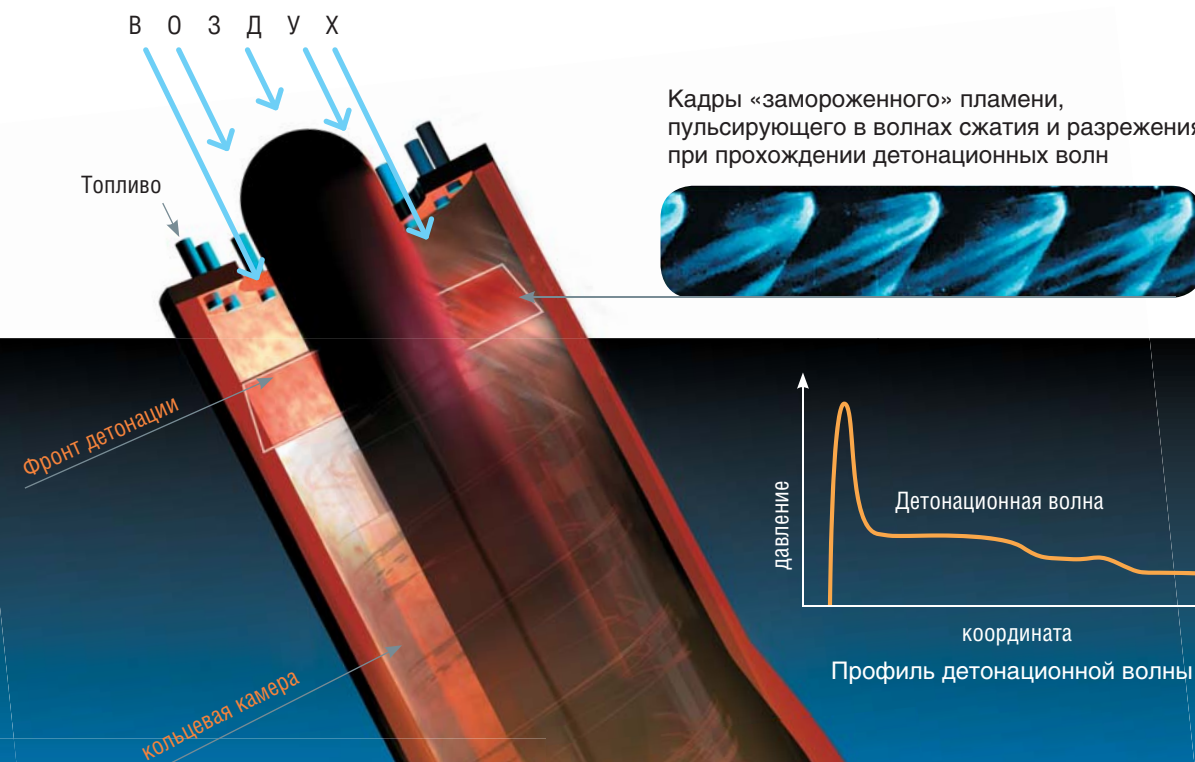
**БЫКОВСКИЙ Федор Афанасьевич** — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории динамики гетерогенных систем Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. Область научных интересов — экспериментальное исследование детонационного сжигания топлив, аэродинамика



**ЖДАН Сергей Андреевич** — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией динамики гетерогенных систем Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. Область научных интересов — исследование пульсирующих и непрерывных детонационных процессов в газовых и гетерогенных средах



**ВЕДЕРНИКОВ Евгений Федорович** — ведущий инженер лаборатории динамики гетерогенных систем Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. Область научных интересов — экспериментальное исследование детонационного сжигания топлив, техническое обеспечение экспериментов



Кадры «замороженного» пламени, пульсирующего в волнах сжатия и разрежения при прохождении детонационных волн

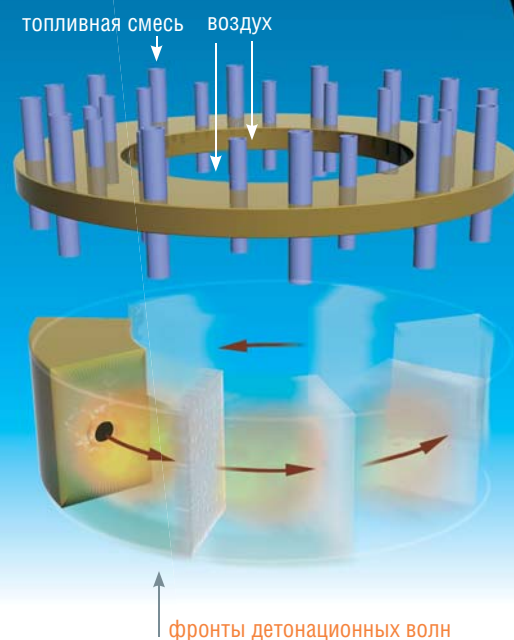


Схема распространения детонационных волн через топливную смесь, компоненты которой вдуваются перпендикулярно направлению движения первых

Модель камеры сгорания детонационного двигателя

*Неуправляемый детонационный срыв мягкого турбулентного режима горения — бич всех типов двигателей внутреннего сгорания. Использование контролируемого, непрерывного процесса генерации детонационных волн как основного элемента подобных двигателей приводит к качественно новому результату*

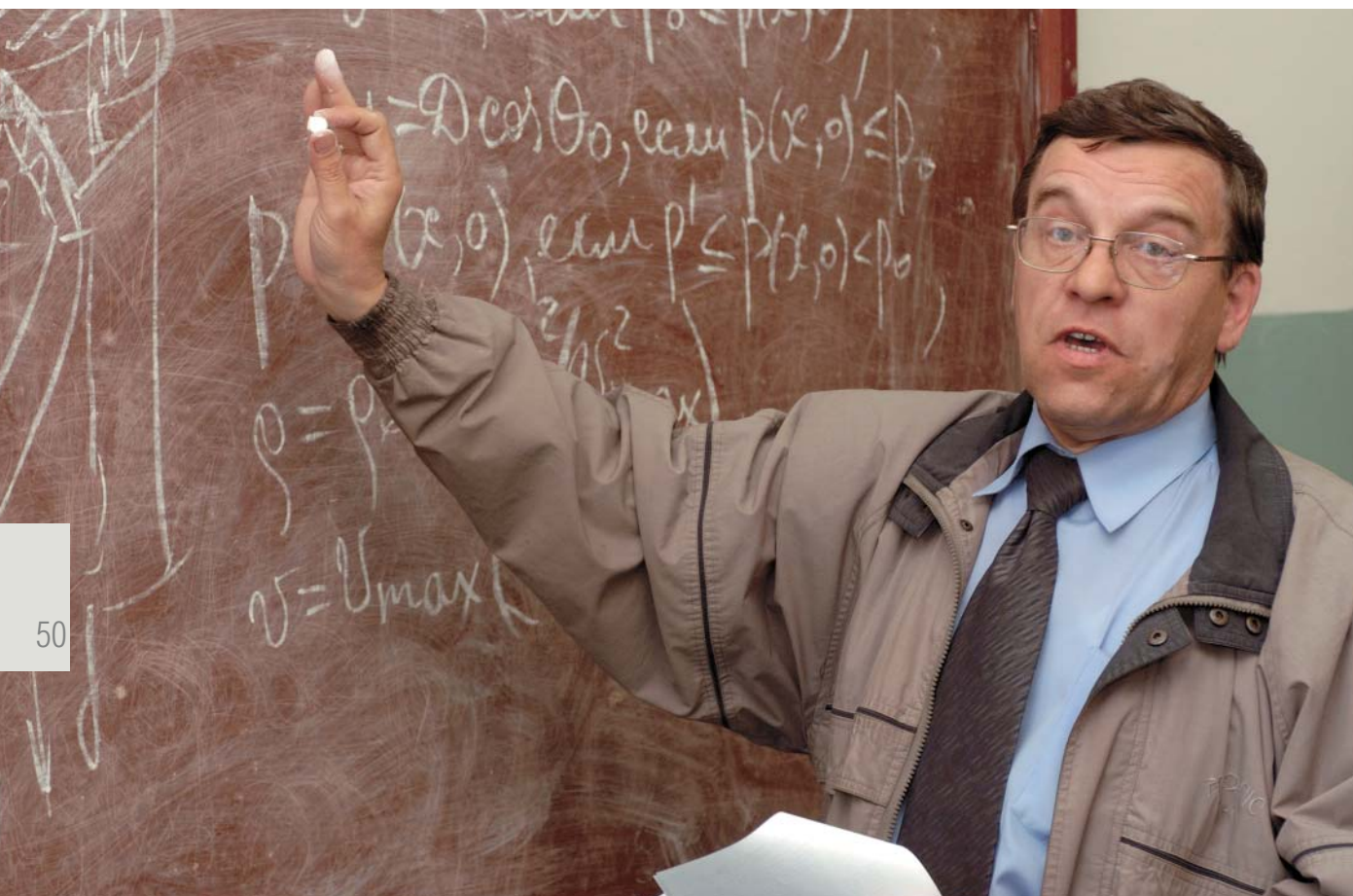
**Н**аверняка многие из нас испуганно вздрагивали от громкого «хлопка» в двигателе проезжающего мимо автомобиля. Это — детонация. Непредсказуемость ее появления (практически взрыва) в камерах сгорания всех типов двигателей и энергетических установок, с последующим прогоранием и разрушением элементов конструкций, наводит на мысль: вместо того чтобы гасить процесс детонацион-

ного (взрывного) характера горения, не попробовать ли организовать его должным образом и использовать во благо?

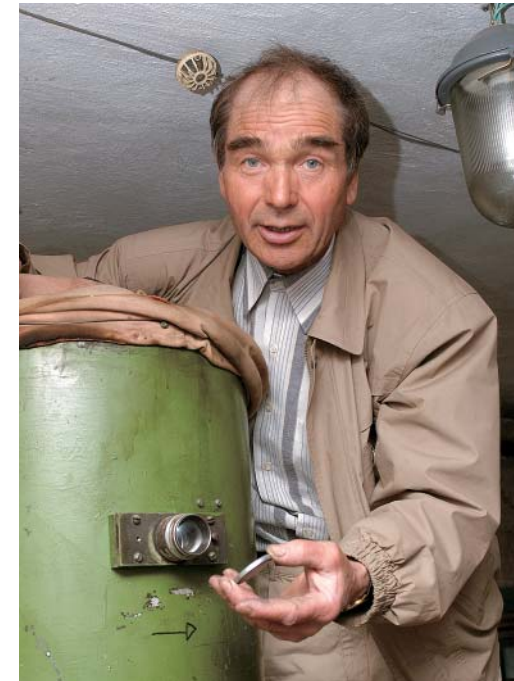
Не секрет, что при достижении сверхзвуковых скоростей, например в воздушно-реактивных двигателях летательных аппаратов, а также в любых промышленных двигателях внутреннего сгорания, использующих турбулентное сжигание (а других практически и нет), существенная часть несгоревшего топлива выбрасывается в атмосферу, со всеми вытекающими отсюда последствиями для экологии. Сильно ядовитые присадки-антидетонаты, используемые для гашения детонации, усугубляют картину загрязнения.

В связи с этим внимание ученых всего мира привлечено к теме стабилизации детонационного горения.

Что касается реализации сжигания топливной смеси в поперечной детонационной волне (ПДВ), т. н. волне «спиновой» детонации, то приоритет в решении этой



Так можно описать схему распространения непрерывной спиновой детонации в кольцевой камере сгорания



Чем меньше размер камеры сгорания, оптимальный для эффективного детонационного сжигания топливно-воздушной смеси, тем компактней и энергетически выгодней двигатель

Фоторегистратор в течение секунды фиксирует «замороженные» на снимке промежутки времени в одну миллионную долю секунды





Черно-белые снимки «замороженного» пламени удобно рассматривать и через солнце

проблемы по праву принадлежит России, в частности Институту гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. Впервые в непрерывном детонационном управляемом режиме Б. В. Войцеховскому удалось осуществить сжигание ацетиленокислородных смесей в поперечной детонационной волне [1]. После проведения этих опытов за рубежом было оформлено несколько патентов на использование режима непрерывного детонационного сжигания в ракетных двигателях.

Иными словами, то, что считали вредоносным явлением и от чего пытались избавиться много лет, стало неотъемлемым элементом, входящим в основу проектирования нового типа двигателей внутреннего сгорания. Теоретический приоритет принадлежит Я. Б. Зельдовичу, впервые исследовавшему возможности использования детонационного сжигания топлива в энергетике [2].

Он показал, что детонационное сжигание топлива происходит при меньшем возрастании энтропии

продуктов горения, а значит, с большей кинетической энергией, меньшей теплонапряженностью. Снимается и проблема борьбы с «хлопками», так как шумовые эффекты и вибрации в камере детонационного сгорания специальной конструкции не выше, чем для режима работы обычного двигателя внутреннего сгорания.

Преимущество детонационного горения в конкретных устройствах характеризуется меньшими габаритами камеры, определяемыми размером детонационной волны. Это приводит к более интенсивному и полному сжиганию широкого класса топлив с увлеченными продуктами детонации и обеспечивает повышенную тягу двигателя.

Авторами продемонстрировано применение оригинального фоторегистратора, позволяющего «заморозить» процессы микросекундного масштаба времени, протекающие в области ПДВ на протяжении длительного периода времени (до 1 секунды). Получен российский патент на способ сжигания топлив [3].

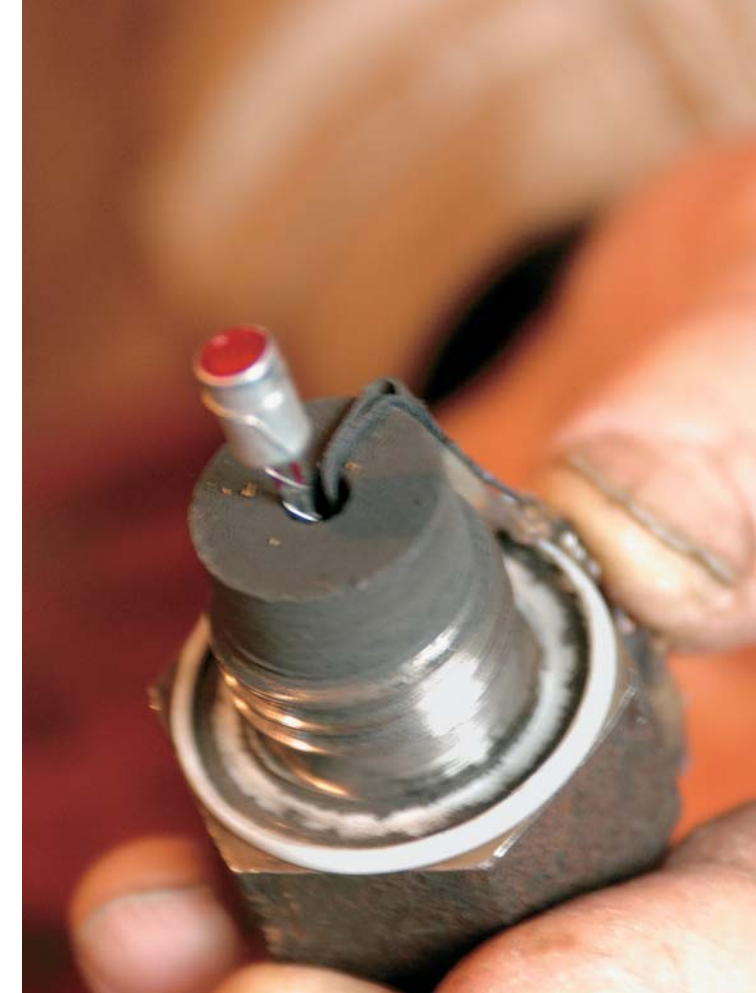
## Как выглядит замороженное пламя

Что может гореть в спиновых волнах, почему и как? Возникает уместный с экономической и практической точки зрения вопрос: будут ли смеси традиционных видов топлив и окислителей вообще гореть в столь необычных условиях, «иссеченные» жесткими фронтами непрерывной спиновой детонации? А если даже и будут, то насколько устойчиво, непрерывно и эффективно? Для ответа на этот непростой вопрос было проведено более сотен (если не тысяч!) экспериментов и расчетов, сделано столько же чертежей различных конструкторских решений, из громоздкого «железа» изготовлено множество модификаций камер сгорания различного типа ЖРД (жидкостный реактивный двигатель) и ВРД (воздушный реактивный двигатель).

Результаты превзошли все ожидания, правда, не обошлось без трудоемких, кропотливых и большей частью рутинных исследований. Оказалось возможным, при надлежащей организации процесса горения (ноу-хау!) в этих непростых условиях эффективно сжигать практически любые традиционные газообразные или жидкие углеводородные виды топлив в смеси с газообразным кислородом, воздухом и жидким кислородом в качестве окислителя.

Удалось предсказать и наблюдать (что происходит не так уж часто) не совсем обычный эффект трансзвукового перехода в потоке, при неизменной площади поперечного сечения (чего не бывает в обычной камере, которая не профилирована под сверхзвук). При этом, давление в камере, в зоне поперечных детонационных волн, пульсирует с частотой вращения ПДВ, достигая максимальных значений во фронте, в 3–5 раз превышающих среднее давление в обычных условиях.

Когда человек быстро поднимается в гору, он чувствует, как учащенно начинает биться сердце. Точно так же, чтобы сверхзвуковой лайнер не «схватил инфаркт», не сгорел в течение нескольких секунд от перегрева или не развалился от «фибрилляций», поднимаясь к разным слоям атмосферы, нужно провести очень ответственную работу по определению области существования устойчивой ритмической и непрерывной спиновой ПДВ — сердца двигателя. Вот почему с целью определения области штатных безопасных режимов варьировалась разница давлений в камере сгорания и в окружающей среде. Очень интересным оказалось то,



Несмотря на скромные размеры детонатора его энергии достаточно для того, чтобы поджечь пламя

что в камере с расширением канала процесс непрерывной спиновой детонации может протекать устойчиво даже при давлении в камере, меньшем, чем давление окружающей среды. Выявлено было и существенное влияние качества процесса смесеобразования на стабильность скорости ПДВ и устойчивость ее структуры (не считая моментов смены количества детонационных волн) в широком диапазоне соотношений топливных компонентов и разности давлений в камере и во внешней среде [3–5].

Изменение соотношений концентраций компонентов горючей смеси, конфигурации элементов подачи топлива и давлений снаружи и внутри камеры сгорания аппарата приводит к смене скорости ПДВ, образованию сложных режимов суперпозиции 1-2-3 и более волновых структур, а также к их затуханию, усилению и изменению частоты вращения спина.

Все полученные знания совершенно необходимы, прежде всего, для разработки новых типов двигателей летательных аппаратов.



Шумопоглотитель

## Эпилог, оптимистический и всегда грустный

Все догадываются, что если бы архитектор строил дом по принципу «нарисовал да и живи», то последний непременно рано или поздно рухнул бы, несмотря на то что имеет теоретическое обоснование стоять вечно. При всем том, далеко не каждый знает, что после проведения расчетов обязательно строится макет из различных материалов, втыкается фундаментом в различные грунты и подвергается всевозможным жестоким испытаниям, чтобы оттянуть как можно на более длительное время печальный исход. Неизмеримо более сильные и разнообразные типы нагрузок, не

сравнимые даже с земными стихиями, испытывают летательные и космические аппараты.

Несопоставимая стоимость этих двух, надежно защищенных от внешних и внутренних «стихий», проектов и их изделий, соизмеримых разве только по габаритам («земной дом» и «космическая ракета»), отражает несоизмеримость их сложности. Если первый проект может быть профинансирован небольшой группой даже не очень богатых частных лиц, то второй — только в масштабах целого государства. Наличие выделенных крупных инвестиций на аналогичный последний проект в конкурирующих зарубежных государствах требует своевременного выделения не меньших средств и в России.



Макет «мини-камеры» детонационного сжигания топливной смеси

### Литература

1. Войцеховский Б.В. Стационарная детонация // ДАН СССР. — 1959. — Т. 129. — № 6. — С. 1254–1256.
2. Зельдович Я.Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ. — 1940. — Т. 10. — Вып. 17. — С. 1453–1461.
3. 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.

4. Быковский Ф.А. Высокоскоростной ждущий фоторегистратор // Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. — 1981. — № 2. — С. 85–89.
5. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Спиновая детонация топливно-воздушной смеси в цилиндрической камере // ДАН. — 2005. — Т. 400. — № 3. — С. 338–340.