

# ИМПУЛЬСНОЕ ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ: НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Фролов С. М., Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН

Сегодня даже незначительное повышение эффективности современных энергетических установок, работающих на сжигании газообразных или жидких углеводородов, требует колоссальных капитальных вложений. Борьба идет за каждый процент повышения коэффициента полезного действия. Это означает, что в начале XXI века ресурс повышения эффективности существующих схем организации рабочего процесса в энергетических установках фактически исчерпан. Для кардинального изменения ситуации необходимы новые идеи и технологии.

В фундаментальной науке известно, что существуют более эффективные термодинамические циклы, например, цикл с управляемым детонационным сжиганием топлива. 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.

**Силовые установки летательных аппаратов.** Вопрос об использовании детонационного горения в реактивных двигателях впервые поставлен нашим соотечественником — основоположником современной физики детонации Яковом Борисовичем Зельдовичем еще в 1940 г. [1]. По его оценкам прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД), использующие детонационное сгорание топлива, должны иметь максимально возможную термодинамическую эффективность.

В количественном отношении преимущества детонационного горения особенно наглядны при рассмотрении диаграммы «Коэффициент полезного действия — число Маха полета летательного аппарата» (рис. 1, а [2]). По сравнению с ПВРД на обычном горении двигатель на детонации  $\approx 1074$  в идеале обеспечит топливную экономичность до 30% при числе Маха полета 2,5 и до 20% при числе Маха 3, что позволит значительно увеличить дальность полета аппарата с таким двигателем или заменить значительную часть топлива на полезную нагрузку. Другое принципиальное отличие детонационного ПВРД от ПВРД на обычном горении — его способность создавать реактивную тягу при низких скоростях полета вплоть до самостоятельного старта без разгонных устройств.

На рис. 1б показана одна из возможных схем организации детонационного цикла на примере сверхзвукового летательного аппарата с диффузором, механическим клапаном, связкой детонационных труб и общего сопла. Трубы периодически заполняются топливно-воздушной смесью. Смесью периодически сгорает в бегущих детонационных волнах, а горячие продукты детонации выбрасываются с высокой скоростью в окружающее пространство через сопло, создавая реактивную тягу.

Существуют аналогичные схемы организации детонационного цикла без механических клапанов, т. е. в конструкции двигателя вообще отсутствуют подвижные элементы. Конструктивно такой двигатель — импульсный детонационный двигатель (ИДД) — прост, а его тягу можно практически неограниченно увеличивать, повышая количество детонационных труб.

Кроме того, изменяя подачу топлива в трубы можно управлять вектором тяги без применения поворотных рулей.

Импульсные детонационные двигатели весьма привлекательны и по своим потенциальным тяговым характеристикам: они перекрывают широкий диапазон скоростей полета от 0 до числа Маха 4 — 5, обеспечивая почти постоянный удельный импульс по топливу на уровне 2000 — 2500 сек при работе на углеводородном горючем. При числе Маха полета выше 3 импульсный детонационный двигатель становится эффективнее не только ПВРД, но и турбореактивного двигателя.

Основные приложения таких двигателей — дешевые средства доставки боеприпасов, силовые установки для самолетов-мишеней и беспилотных летательных аппаратов, а также крылатых ракет. В перспективе они могут использоваться и для форсирования тяги пилотируемых летательных аппаратов.

Важно подчеркнуть, что для создания ИДД нет фундаментальных ограничений, однако есть эксплуатационные: чтобы успешно конкурировать с существующими аналогами такой двигатель должен работать на штатном авиационном керосине без активных добавок, использовать минимальную энергию зажигания детонации, быть компактным и легким. Именно эти эксплуатационные требования рассматриваются как основной барьер на пути создания практического двигателя.

Дело в том, что для инициирования детонации керосино-воздушной смеси в трубе с помощью известных классических способов требуются либо огромные энергии зажигания, либо очень длинные трубы, что неприемлемо для силовых установок летательных аппаратов. В связи с этим в Институте химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН) в 2002 г. была поставлена фундаментальная задача — найти новые способы инициирования детонации, которые позволят значительно уменьшить энергию инициирования детонации, значительно сократить длину и время перехода горения в детонацию.

К настоящему времени впервые в мировой практике удалось получить периодическую детонацию керосино-воздушной смеси на

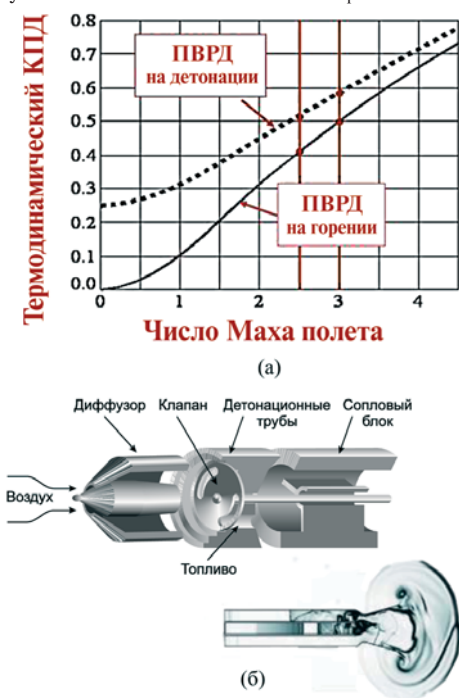


Рис. 1. Преимущества детонационного сжигания топлива (а) и схема импульсного детонационного двигателя для летательного аппарата (б)

длине 1,5 м при зажигании обычной автомобильной искрой. Энергию зажигания детонации понизили более чем в 10000 раз, одновременно уменьшив длину трубы более чем в 10 раз. Тем самым созданы предпосылки для начала практических работ по новой системе реактивного движения на импульсном детонационном сжигании керосина.

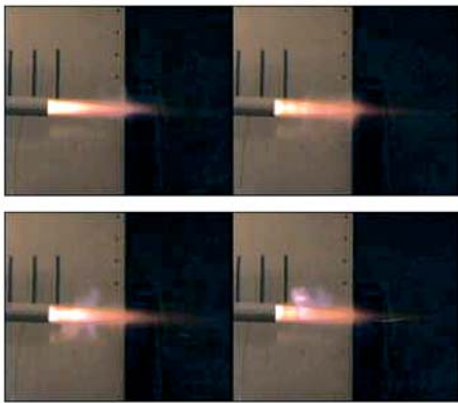


Рис. 2. Фотографии периодических сверхзвуковых струй продуктов детонации при работе демонстратора ИДД

На основе полученных результатов в ИХФ РАН создан и испытан макет демонстратора рабочего процесса в ИДД общей длиной менее 2 м. Демонстратор выполнен по двухконтурной схеме: первый контур обеспечивает надежное циклическое инициирование детонации и перепуск детонационной волны в трубу второго контура, а в прямой трубе  $\varnothing 1074$  второго контура диаметром 52 мм происходит детонационное сгорание основной массы топлива. На рис. 2 показаны фотографии периодических сверхзвуковых струй продуктов детонации при работе демонстратора. Измерена тяга демонстратора при относительно низких рабочих частотах (до 10 Гц) и показано, что тяга линейно зависит от частоты импульсов, как и предсказывает теория. Исходя из этого можно ожидать, что при частоте импульсов до 100 Гц подобная труба обеспечит тягу более чем в 75 кГ, а связка из 10 одинаковых труб обеспечит тягу более чем в 750 кГ. Для работы демонстратора с более высокими частотами создано специальное форкамерное зажигающее устройство, обеспечивающее надежное инициирование детонации с частотой до 60 Гц.

На сегодняшний день этот демонстратор превосходит все существующие аналоги именно тем, что работает на жидком керосине, обеспечивая надежное периодическое инициирование детонации на очень коротких расстояниях с помощью стандартной свечи зажигания. Однако дальнейшее развитие работ невозможно без существенного

расширения экспериментальной базы — в первую очередь создания испытательного стенда и разработки нового более совершенного макета-демонстратора [3].

На Западе научно-исследовательские работы по импульсным детонационным двигателям особенно активно ведутся в США под эгидой ВВС, ВМФ и НАСА. До последнего времени там в качестве топлив использовались газообразные горючие: водород, этилен и пропан, а детонацию инициировали, используя добавки кислорода. Известны и попытки работы с керосином при полном его предварительном испарении и плазменном зажигании. При этом затраты энергии на инициирование детонации оказались в 50 раз больше, чем на нашем демонстраторе.

Судя по публикациям в западной прессе, в США работы по созданию ИДД перешли на стадию НИОКР. Например, известны масштабные работы в компаниях Pratt & Whitney и General Electric.

**Энергетические установки на детонации природного газа.** Отмеченные выше эксплуатационные требования по весу, геометрическим размерам и рабочей частоте ИДД относятся, главным образом, к силовым установкам ЛА. Для стационарных же энергетических установок эти требования не являются определяющими и, следовательно, технологический прорыв в этом направлении следует ожидать в ближайшее время. Наиболее привлекательное направление работ — организация циклической детонации смесей природного газа с воздухом. В настоящее время в ИХФ РАН и МИФИ (ГУ) активно ведутся работы по организации импульсного детонационного сжигания природного газа с использованием новых комбинированных средств инициирования детонации. Успех на этом пути сулит существенную экономию природного газа и позволит значительно повысить эффективность работы энергетического оборудования, в частности, силовых установок газоперекачивающих агрегатов (ГПА) для магистральных газопроводов. Последнее приложение особенно важно ввиду острой необходимости снижения собственного потребления природного газа газотранспортными компаниями. Разумеется, замена жаровых труб в газотурбинных установках ГПА на детонационные потребует дополнительных вложений (разработка устройств, сглаживающих импульсные ударные нагрузки на элементы турбин, и др.), однако экономический эффект, ожидаемый от новой технологии, несомненно, перекроет все сопутствующие затраты.

Особенности импульсного детонационного горения можно использовать для многих других приложений. Например, в импульсных горелках, совмещающих ударное воздействие с воздействием высокоскоростной струей горячих продуктов  $\varnothing 1076$  детонации. Указанные выше факторы (импульсное ударное и конвективно-тепловое воздействие) будут в перспективе использоваться для дробления и газификации тяжелых фракций нефти и угля, а также бытовых и промышленных отходов, для дробления горных пород и льда и т. д.

Понимая, что без углубления и интенсификации работ по импульсной детонации невозможно совершить прорыв на качественно новый технологический уровень, ведущие ученые Российской Федерации в области горения и детонации в 2007 г. объединились в Некоммерческое партнерство по научной, образовательной и инновационной деятельности «Центр импульсно-детонационного горения». В настоящее время Партнерство включает ИХФ РАН, МИФИ (ГУ), ОИВТ РАН, ИГиЛ СО РАН и Институт катализа им. Г.К. Брескова СО РАН. Цель Партнерства — сосредоточить усилия ведущих научных групп на совместном решении проблем создания прорывных энергосберегающих технологий импульсно-детонационного горения и привлечь партнеров от промышленности для проведения опытно-конструкторских работ, направленных на выпуск новой продукции для авиационно-космических и энергетических приложений.

К первоочередным программам Партнерства относятся: применение импульсной детонации природного газа для сжигания промышленных и бытовых отходов, создание импульсных детонационных горелок на природном газе для водонагревательных котлов тепловых электростанций, разработка детонационных жаровых труб для ГПА, а также развитие работ по импульсно-детонационному сжиганию авиационного керосина для создания силовых установок летательных аппаратов разного назначения.

#### Литература

1. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // Журнал технической физики. — 1940. — Т. 10. — Вып. 17. — С. 1453.
2. Фролов С. М. Перспективы использования детонационного сжигания топлива в энергетике и на транспорте // Тяжелое машиностроение. — 2003. — № 9. — С. 18.
3. Фролов С. М. Импульсные детонационные двигатели. М.: Торус пресс. — 2006. — 592 С.