

ПРОЦЕССЫ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРЯМОТОЧНОГО ТИПА

Прудников А.Г., Колиев М.Р., Северинова В.В.
ФГУП «ЦИАМ им. П.И.Баранова», г. Москва

Первые классические лабораторные опыты по гомогенному горению (ГГ) и детонационному горению (ДГ) были проведены в пробирке, мыльном пузыре, бомбе (рис. 1.1;1.2). Идеи этих трех методов можно распространить на условия сверх- и гиперзвуковых потоков, сочетая их с современными методами неконтактных измерений; эта задача является одной из первых нерешенных проблем перехода к детонационному горению. Опыты показали, что нормальное (ламинарное) гомогенное горение переходит с ростом характерного размера (радиуса, толщина факела пламени) в турбулентное (или вибрационное) горение и далее в процессе увеличения скорости горения – в детонационное горение. Схема каждого опыта показана на рис. 1.2.1.-1.2.3. там же указаны фамилии французских и русских исследователей. Из классических теоретических работ по ДГ необходимо прежде всего отметить работы школы акад. Г.Г. Черного и школ СО РАН [1]. Заметим, что теорий переходов турбулентного ГГ в ДГ пока не существует.

С ростом технических запросов исследование классических видов гомогенного горения стало возможным с середины прошлого века не только в неподвижной среде, но и в потоке гомогенной смеси. На объединенном рис.1.2.2. показана наша схема и фото ДГ на стенде для исследований гомогенного: турбулентного, вибрационного и детонационного горения в НИИТП. Результаты по гомогенному горению, турбулентному и вибрационному, изложены в монографиях [2,3,4]. Переход на режим ДГ (рис. 1.2.2.) всегда приводил к разрушениям внутренней «начинки» камеры гомогенизации (включая топливный коллектор, расположенный на длине ~ 15 метров вверх по потоку от камеры горения), сопровождаемым «пушечными» ударами (в отличие от «пулеметных очередей» при вибрационном горении).

Схемы всех последующих основных лабораторных опытов в движущейся среде гомогенной смеси 70-80 гг. показаны на рис.1.3.1-1.3.5 (авторы, названия опытов и основные параметры показаны там же). В опытах по детонации от пули, летящей в неподвижной гомогенной смеси (воздуха и кислорода с водородом, ацетиленом и др. углеводородом), рис.1.2.3, замечаются прежде всего режимы пульсирующего (высокочастотного вибрационного) горения и низкочастотного («струхалевского») горения (без перехода в детонацию) со скачками на пилообразном вибра-

ционном фронте и без скачков перед сплюснутыми горящими струхалеваскими крупными вихрями. Только в опытах Лера (71 г.) отмечался, по-видимому, переход в детонационное горение. В других опытах по реальной детонации в струе гомогенной смеси, помимо широко известных опытов по «детонации» за первым диском Маха недорасширенной струи рис.1.3.2 (в действительности это трехмерное турбулентное дозвуковое горение с возможным догоранием в последующих дисках Маха при малых начальных нерасчетностях), следует обратить внимание на принудительную детонацию в дозвуковой открытой струе гомогенной смеси с измеренным и рассчитанным удельным импульсом силы на боковой поверхности (СО АН) (рис.1.3.4). Эти опыты могут со временем стать прототипом рабочего процесса управления и тяги открытым или внешним сверхзвуковым детонационным горением.

На рис.1.3.5 показана схема нашего эксперимента по внешней гомогенизации струи водорода в гиперзвуковом воздушном потоке при числе Маха $M=6,5$ с последующей попыткой несостоявшегося ДГ в открытом воздухозаборнике Трекслера. Последующая расшифровка особенностей процессов внешнего сверхзвукового макросмещения и турбулентного диффузионного псевдогомогенного горения показала основные преддетонационные проблемы процессов ДГ в скоростных топливовоздушных потоках, силу которых только в одном из девяти, показанных на рис.1.3 случаях, наблюдалось ДГ (На рис.1.3.4 он помечен знаком плюс (+). Все остальные случаи помечены знаком минус (-). На рис.1.2.3 также проставлены знаки плюс и минус соответственно в одном из четырех случаях).

Как отмечалось выше, первые проработки гомогенного, (турбулентного и детонационного) горения, применительно к СПВРД и ГПВРД, относятся к 50 годам прошлого века. Из отечественных работ следует отметить пионерские работы школы проф. Е.С. Щетинкова и академика Раушенбаха, опыты М.П. Самозванцева (ЦИАМ), из зарубежных авторов - А. Ферри, Гросса и Чанитца; Мансона. Схемы этих опытов показаны на рис. 1.3.1; 1.3.3. Необходимо сразу же отметить, что из во всех этих опытах было сверхзвуковое гомогенное горение и ни в одном опыте не было детонационного горения в классическом понимании, так как ударные волны хотя и были, в основном, мересчатые, т.е. число Маха за скачком было меньше единицы, но "подхвата" горения ударной волной не было, так что горение проходило в обычных дозвуковых турбулентных факелах пламени, далеко от ударной волны, со своими малыми скоростями горения. В опытах Гросса и Чанитца с горением за косым скачком возможно и было гомогенное, но не детонационное горение.

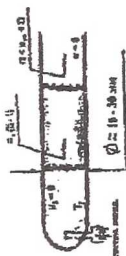
На рис.1.4 показаны первые схемы ГПВРД с детонационным горением (ДГ) по представлениям 60-х годов Джаминсона, Кюхемана и Прат-

та. Как видно из всех этих схем общей их особенностью является внешний процесс приготовления гомогенной смеси. Таким образом, первая преддетонационная проблема – это проблема гомогенизации во внешнем гиперзвуковом потоке, и все сопутствующие ей проблемы оптимальной интеграции различных физических процессов (ИФП). Для ГПВРД эта проблема является главной среди многих проблем камер сверхзвукового сгорания (КСС) второго и третьего поколения (соответственно с ГГ и ДГ)

Первые опыты в России и, по-видимому, в мире по внешней гомогенизации смеси водорода в гиперзвуковом потоке воздуха при $M_n = 6$ были проведены в ЦИАМ. Схема этих опытов показана на рис.1.3.5. Результат опытов был отрицательным, в том смысле, что, хотя на срезе щелевого ВЗУ (типа Трекслера) смесь была в среднем по времени стехиометрическая, никакого взрыва не произошло: смесь горела обычным диффузионным образом, причем хуже, чем при подаче водорода непосредственно со стенок щелевого канала, поскольку несмотря на сепарацию струек водорода на скачках на входе в щелевую камеру (канал) из-за сепаратного торможения наблюдалось переобогащение водорода (до 40% сечения канала было занято водородом). Эффект сепарации водорода на скачках детально исследовался в ИГПИМ (рис. 2.1.1) [5]. Отсутствие гомогенного (турбулентного и детонационного горения) за системой косых скачков явилось следствием, во-первых, неполного смешения в следе и, во-вторых, следствием расслоения («сепарации») при положительном градиенте давления плохо смешанных «тяжелых» объемов воздуха с легкими объемами водорода. Не гомогенность смешения, или внутренняя перемежаемость – «чересполосица» слоев воздуха и водорода в сдвиговых слоях смешения обусловлена крупномасштабным характером вихревого макросмешения. Физический смысл внутренней и внешней перемежаемости поясняется на рис.2.1.2. Мерой перемежаемости может служить известный коэффициент перемежаемости или другой малоизвестный коэффициент молекулярной неоднородности UM смешения субстанции, введенный и измеренный впервые Рошко [6]. На рис. 2.1.2 приведены экспериментальные профили UM поперек свободного погранслоя между двумя дозвуковыми потоками с отношением плотностей $\rho_2/\rho_1 \sim 1$; 7 и расчеты профилей UM для модели постоянной завихренности [7].

На рис. 2.1-2.2 представлены реальные схемы внешней и внутренней гомогенизации ЖТ в сверхзвуковых потоках ВЗ и КСС, опирающиеся на опытные данные по факелам распыла ЖТ в сверхзвуковых потоках [2,3]. В [8] показана принципиальная возможность одноактного ДГ в факеле распыла ЖТ при давлениях его подачи $P^*_T \geq 4$ кбар. в сверхзвуковой поток при $M_n < 8$ (типа ДГ в бомбе объемной детонации). Остановимся теперь на «собственных» аэродинамических проблемах ГГ и ДГ

1. Открытие ДГ (1891-1893 гг) Бертело Маллар и Виск Лешателье



2. Лабораторное изучение ДГ.

2.2 в пологой горизонтальной трубе



2.3 труба в изоподающей горизонтальной трубе



Zeitz 1971 ЕФИИ мес. МГУ

2.1 В мальном пузыре и в бомбе



Щелкина - Трошкин 50 гт
ЕФУХ Денкина 60 гт

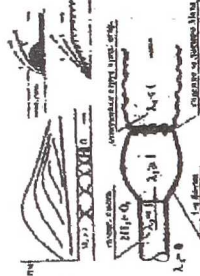
Б.В. Раушенбах, А.Г. Прудиных

лб.2. ИИИП 1932 г.

3. ДГ в сверх- и гиперзвуковых потоках

3.2 М.П. Самолюцкий (67, ЦИАМ)

3.1 Гресс Чашниц (60 гт)



См. также: Д.В. Мухоморов

4. Проекты СВРД с ДГ (60-90 гт)

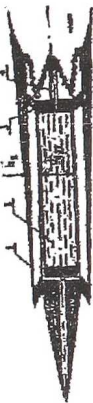
4.1 Jamison (60 гт)



4.2 Киселевич, Файд (64 гт)



4.3 А.Г. Прудиных (80 гт) ЦИАМ



3.3 М.А. Гресс В.К. Магдобицких
СОРАН 80 г

3.4 Блев В.К., Магдобицких

В.М. Булгаков (ЦИАМ 80 гт) М=6,5

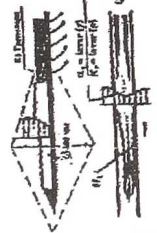
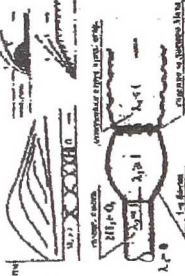
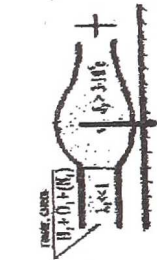
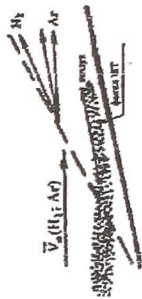
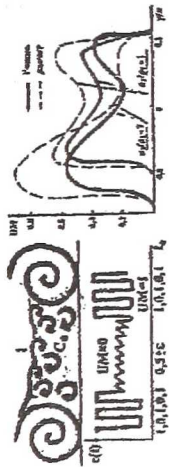


Рис.1. Проблемы ВРД детонационного горения. Факты ГГ, но не ДГ и факты ДГ

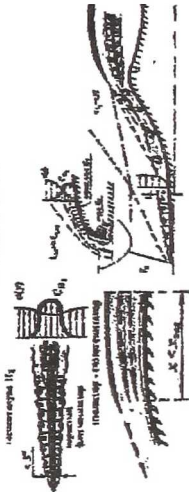
1.1 Проблема сепарации струй "легкого" топлива на скрутке.



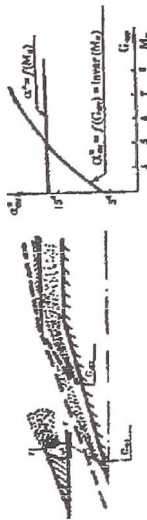
1.2 Проблема смешивания до молекулярной однородности (МО) без ДФГ.



1.3 Проблема сильного смещения без ДФГ и запусков ВЗУ.

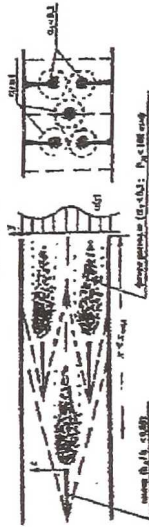


2.1 Проблема внешнего расплава ЖТ при $M_{\infty} > 1$ и фокусировке скачков ВЗУ.

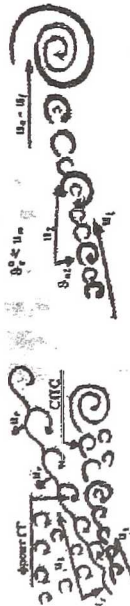


2. Проблема расплава ЖТ

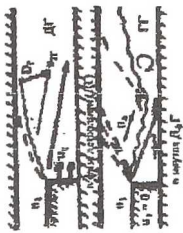
2.2 Проблема внутреннего расплава ЖТ при $M_{\infty} > 1$.



3. Проблема вылета ГТ за взрывной слой (проблема подхвата)



4.1 В камере расширяющегося уступа



4. Проблема вынужденной детонации ДТ

4.2 В камере постоянного сечения

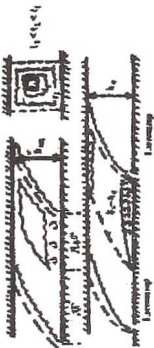


Рис.2. Проблемы ВРД детонационного горения. Проблемы процессов

рис.2.3; 2.4.

Первая проблема – это проблема выхода фронта горения из горящего слоя поджигающей высокотемпературной струи в сверхзвуковой поток гомогенной смеси, для краткости названной проблемой «подхвата». На рис. 2.3 можно было бы указать ряд исследователей, не получивших ожидаемого «сверхзвукового подхвата» без использования гистерезиса процесса. Достаточным условием, «подхвата» является условие, что скорость фронтального ГГ должна быть больше окружной скорости крупного вихря.

Проблему подхвата ДГ может обеспечить вынужденная детонация.

На рис. 2.4 изображены возможные схемы "двухтактной" вынужденной детонации в камере за уступом и камере дожигания постоянного сечения. Теоретические оценки длин камер дожигания или догомогенизации без учета дополнительных активизирующих факторов (акустических пульсаций, автотурбуликации встречными струями ГГ и др. показывают, что эта длина может быть значительной.

При плохой гомогенизации возникают три новых технических проблемы: источники вынужденной детонации в виде промышленных пульсирующих детонаторов, их синхронизация с частотой внутренней перемежаемости и полнота дожигания. Поэтому проблему гомогенизации для ДГ ГПВРД следует отнести к проблемам КСС четвертого поколения.

Таковы в общих чертах основные проблемы преддетонационных процессов детонационного горения в скоростных потоках СПВРД и ГПВРД, проявившиеся в прошлом веке при неудачных попытках реализовать ДГ в их камерах сгорания.

Список литературы

1. Chernyi G.G., Gilinskii S.M., High Velasity Motion of Sjlid Bodies in Combustible Gas Mixtures. Astz. Acta vol 15, 1970.
2. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. М., Физматгиз, 1961
3. Раушенбах Б.В., Беспалов И.В., Прудников А.Г. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей.- М., «Машиностроение», 527с., 1964.
4. Прудников А.Г., Волынский М.С., Сагалович В.Н. Процессы смесеобразования и горения в воздушно-реактивных двигателях.- М. «Машиностроение»; 355с., 1971.
5. Гаранин А.Ф., Крайнев В.Л., Прудников А.Г., Третьяков П.К. Режимы взаимодействия ударных волн со струйным следом разнородных газов// Тез. докл. X школы-семинара 5-15 сентября, 2002 г. Сочи, изд-во МГУ.
6. Rochko A. Structure turbulent shear flows of neu look AIAAI., 1976 Vol.14, №10.

7. Прудников А.Г. Вихревая модель пограничного слоя с тепловыделением. //Тр. ЦИАМ №1061, 1983.
8. Колиев М.Р., Прудников А.Г. Новая область применения углеводородных топлив в сверхзвуковых летательных аппаратах (ЛА)// Первая научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов «Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности», ОАО «ОКБ Сухого», М., 2002.

К ВОПРОСУ ОБ УНИФИКАЦИИ ТУРБОНАСОСНЫХ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ГТД

Иванов А. И., Игначков С. М., Горшкова С. В.,
ОАО "СНТК им. Н. Д. Кузнецова", г. Самара
Козин Д. М., ООО «Экосервис»,
Графкин В. В., СГАУ им. С. П. Королева

Идея использования авиационных топлив, альтернативных керосину, начала пробивать дорогу достаточно давно. Многочисленные исследования, проведенные в течение последних 30...40 лет, показали целый ряд экономических и экологических преимуществ при использовании в авиации в качестве топлив жидкого водорода (ЖВ) и сжиженного природного газа (СПГ) [1-4]. Ещё в конце 50-х годов в США была развернута широкая программа исследований по применению водородного горючего. В 1956-57гг. NASA успешно продемонстрировала полёт двухдвигательного самолета В-57, один двигатель J-65 которого работал на водородном топливе. После окончания этих испытаний в Центре им. Льюиса (США) испытали газотурбинный двигатель (ГТД) J-85 на наземном стенде с насосной системой подачи ЖВ.

Другая ранняя программа по применению ЖВ содержалась в проекте создания высотного сверхзвукового разведывательного самолета CL-400 фирмы Lockheed. Несмотря на то, что большинство технических проблем, связанных с самолетом, использующим ЖВ, было преодолено, проект CL-400 не получил завершения из-за невыполнения некоторых полётных требований и проблем, связанных с отсутствием больших количеств ЖВ в других странах для технического обслуживания этого самолета. В 70-х годах интерес к применению ЖВ за рубежом значительно возрос, что, с одной стороны, обуславливалось энергетическим кризисом 1973г., затронувшего национальные интересы стран Запада, а с другой – появлением в эксплуатации больших широкофюзеляжных самолетов (В-747, L-1011, MD-11), имеющих большие внутренние объемы. Конкретным проявлением та-