

основ, скорость горения которых лимитируется скоростью образования активных промежуточных продуктов, представляется также актуальным и перспективным.

Поступила в редакцию
17/III 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Ke hat. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1962, 7, 163.
2. Б. А. Иванов, Н. А. Щепотьев и др. Кислородная промышленность. М., 1973, 1, 3 и 1973, 3, 14.
3. Н. А. Щепотьев, Б. А. Иванов, В. П. Пустовалов.— В сб.: Труды 2-й конференции по процессам горения и проблемам тушения пожаров. М., Стройиздат, 1973, с. 174.
4. Н. А. Щепотьев, Б. А. Иванов.— В сб.: Машины и аппараты кислородных установок. М., «Машиностроение», 1971, вып 13.
5. Б. А. Иванов.— В сб.: Безопасность применения материалов в контакте с кислородом. М., «Химия», 1974, с. 172.
6. Н. Ф. Дубовкин. Справочник по углеродным топливам и их продуктам сгорания. М., ГЭИ, 1962.
7. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947.
8. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М., ИЛ, 1967.
9. Г. Максмен, К. Вулдридж, Р. Маззи.— В сб.: Гетерогенное горение. М., «Мир», 1967.
10. Б. Л. Вандер Варден. Математическая статистика. М., ИЛ, 1960.

УДК 621.43.019.3

О НЕКОТОРЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ АСПЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО РЕЖИМА СГОРАНИЯ

*Д. И. Бакланов, Д. Г. Жимерин, Ю. Н. Киселев,
Э. А. Миронов, В. А. Попов*

(Москва)

Специфические особенности детонационного режима, связанные с распределением параметров продуктов сгорания за детонационным фронтом, позволяют рассмотреть ряд технических аспектов использования этого режима. Представление о детонационном режиме, лежащее в основе созданной детонационной камеры сгорания (ДКС), базируется на теории Зельдовича, как наиболее цельной и приемлемо согласующейся с экспериментальными данными. Несмотря на значительную интенсификацию процесса горения, достигаемую при детонационном режиме, возникают трудности, обусловленные низкой скоростью заполнения камеры сгорания горючей смесью. В работах [1, 2] описаны способы преодоления этого недостатка ДКС, позволяющие перейти от импульсного режима камеры в непрерывный. Авторы не располагают информацией относительно практической реализации упомянутых предложений, вследствие чего затруднительно сделать какие-либо технические определенные суждения.

Сконструированная непрерывно функционирующая ДКС с максимальной частотой до 100 Гц имеет практически неограниченный ресурс работы, определяемый емкостью топливных баллонов. В настоящем сообщении кратко рассматриваются результаты, полученные главным образом при использовании ДКС в качестве устройства для связывания атмосферного азота и магнетогидродинамического генератора электрической энергии.

Детонационная камера сгорания

Основные задачи, связанные с разработкой ДКС:

- проверка принципиальных положений, носящих патентный характер, которые лежат в основе ее проекта;
- определение областей устойчивой работы и
- исследование тепловых характеристик.

ДКС выполнена в виде секционированной трубы с диаметром 16 мм и длиной 1,5 м, периодически заполняемой горючей смесью, которая поджигается у замкнутого конца камеры с помощью искры (рис. 1). Выходная часть камеры сообщается с атмосферой через глушитель, снижающий уровень шума со ~ 140 до 70 дБ. Топливо — метан (пропан) или бензин, окислитель — обогащенный кислородом воздух. Максимально достигнутое значение частоты работы камеры не является предельным. Скорость распространения детонационного фронта в стехиометрической смеси метана и кислорода, определенная с помощью ионизированных датчиков, была стабильной (~ 2340 м/с) в пределах $\pm 1\%$. Изменение скорости горючей смеси в диапазоне чисел Re от $15 \cdot 10^3$ до $91 \cdot 10^3$ не обнаружило какого-либо влияния на скорость распространения детонации; длина преддетонационного участка нестационарной дефлаграции также не зависит от Re.

При коэффициенте избытка окислителя $\alpha > 1$ длина участка нестационарной дефлаграции существенно зависит от характера турбулизатора, при $\alpha < 1$ зависимость от α исчезает.

Частотная характеристика камеры качественно удовлетворительно описывается в рамках развитых представлений. Тепловые потери камеры составляют при низких частотах $\sim 40\%$, при увеличении частоты потери уменьшаются до 28%. Концевая часть камеры сгорания находится в $\sim 1,5$ раза более напряженном в тепловом отношении условии, чем головная. Камера удовлетворительно работает на жидком (бензин) топливе. Измерены скорости детонации в бензино-воздушных смесях, слабо обогащенных кислородом при различных значениях α . При изменении α от 0,7 до 1,2 скорость детонации падает от 2250 до 1500 м/с.

Создание мощных детонационных камер связано с увеличением их геометрических размеров, что приводит к увеличению длины преддетонационного участка, определяющей в известной мере частотную характеристику камеры. Поэтому чрезвычайно эффективным средством является компоновка двух детонационных камер — малой (с небольшой длиной преддетонационного участка) и основной, инициирование детонационного процесса в которой осуществляется с помощью детонационной волны малой камеры. Состав горючей смеси в одной камере не зависит от состава во второй камере.

Реализация детонационного процесса в основной камере контролировалась ионизационными датчиками и датчиком светового излучения. Существенный результат связан с выявлением необходимости соблюдения определенных условий, обеспечивающих плавный переход детонационного процесса из трубы малого диаметра в трубу большого диаметра, наполненной иной горючей смесью.

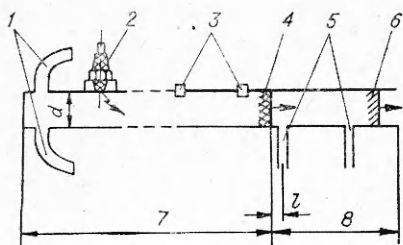


Рис. 1. Схема детонационной камеры сгорания.

1 — коллекторы горючего и окислителя; 2 — запальное устройство; 3 — ионизационные датчики для замера скорости детонации; 4 — фронт детонационной волны; 5 — газовые заборники; 6 — отсоединенная ударная волна; 7 — горючая смесь; 8 — продукты сгорания.

Связывание атмосферного азота

Анализ расчетных термодинамически равновесных значений концентрации окиси азота [NO] при детонации метано-кислородно-азотных смесей [3] показывает, что последние увеличиваются при росте α , причем при $\alpha \geq 1,6$ это возрастание прекращается. Влияние параметра $A = \frac{O_2 \cdot 100}{O_2 + N_2} \%$ чрезвычайно существенно, и максимальное значение [NO] соответствует $A \approx 60\%$. При фиксированном значении α рост A приводит, с одной стороны, к уменьшению [NO], а с другой, вследствие увеличения температуры во фронте детонационной волны, — к увеличению [NO]. В табл. 1, 2 приведены численные значения [NO] в наиболее интересном в практическом отношении интервале α и A . Конечная концентрация $(NO)_k$ определяется временем достижения равновесной концентрации и режимом охлаждения продуктов сгорания (закалкой).

Для горючих смесей, указанных в табл. 2, время, в течение которого температура в волне разрежения меняется незначительно, составляет $\sim 10^{-5} \div 10^{-4}$ с. Так, при длине детонационной камеры 2,5 м за время $2 \cdot 10^{-4}$ с температура изменяется от 3200 до 3000 К. За это время достигается $(NO)_k = (0,75 - 0,8)$ [NO], и закалке подвергается концентрация окиси азота, на 20 ÷ 25% ниже равновесной, соответствующей температуре во фронте детонационной волны [4].

Степень закалки определяется в соответствии с [5]

$$\frac{d(NO)}{dt} = 1,5 \cdot 10^{13} \exp\left(-\frac{8600}{RT}\right) \frac{[NO]^2 - (NO)^2}{V[O_2]}$$

Задавая равномерное распределение потерь окиси по всему температурному диапазону $const = C$ и принимая во внимание, что действующая концентрация (O_2) соответствует равновесной (что не существенно отличается от реальных условий), скорость закалки определяется уравнением

$$\frac{dT}{dt} = 1,5 \cdot 10^{13} \exp\left(-\frac{8600}{RT}\right) \frac{[NO]^2 - (NO)^2}{V[O_2] \cdot C}$$

Принимая во внимание, что для указанных выше условий 10^6 град/С, можно видеть, что в детонационной волне закаливается окись азота до 6,5 $(NO)_k$ [6].

Таким образом, $(NO)_k = 0,65 \cdot 0,75$ [NO] = $= (1,2 \div 1,8) \%$. Эксперименты проводились в условиях, когда детонационная камера сгорания заполнялась горючей смесью только до определенного сечения (см. рис. 1). Продукты сгорания каждого предыдущего цикла подвергались действию отсоединенной ударной волны последующего цикла. Подобная схема эксперимента очень проста и удобна, но не позволяет сделать какие-либо выводы относительно кинетики образования NO за детонационной волной, так как в газовые заборники, отстоящие на различных расстояниях от сечения заполнения камеры горючей смесью, попадают продукты сгорания, которые практически невозможно сопоставить с координатой, отсчи-

Таблица 1
Т и [NO] при различных α для $A=60\%$

α	T, К	[NO], %
1,2	3500	3,16
1,4	3400	3,55
1,6	3300	3,70
1,8	3200	3,70

Таблица 2
Т и [NO] для различных A при $\alpha=1,5$

A, %	T, К	[NO], %
40	2964	2,55
50	3170	3,08
60	3360	3,62
70	3460	3,25
80	3580	2,88
98	3700	0,672

тываемой от детонационного фронта. По этим причинам приводимые результаты следует рассматривать под определенным углом зрения, связанным главным образом с техническими задачами. Степень окисления азота характеризовалась процентным содержанием нитрозных газов в продуктах сгорания, приведенных к окиси азота, и определялась в соответствии с методикой [7] с точностью 0,02%. Суммарный расход компонент горючей смеси составил 9 нм³/ч. Отбор продуктов сгорания проводился через стальные газозаборники Ø0,5 мм и длиной 0,5 м.

На рис. 2 представлены зависимости $(NO)_k$ от α для ряда смесей с различным значением A ; местоположение газового заборника не играет существенной роли, так как значение $(NO)_k$ вдоль камеры (10÷120 калибров) приблизительно постоянно и равно расчетному значению. На рис. 3 дана зависимость $(NO)_k$ от A . Максимальные значения $(NO)_k$ также приблизительно соответствуют расчетным.

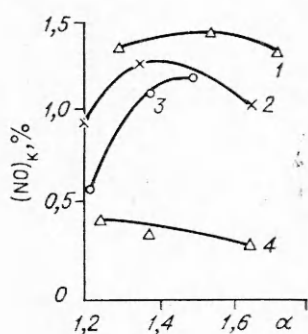


Рис. 2. Зависимость $(NO)_k$ от α ; $A=73\%$ (1), 82,5 (2), 56 (3) и 98% (4).

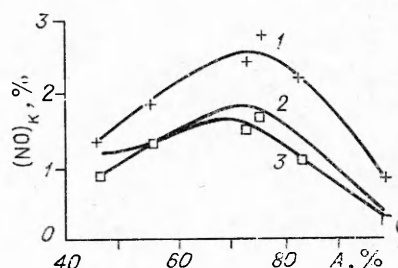


Рис. 3. Зависимость $(NO)_k$ от A , $\alpha=1,5$.

1 — $(NO)_k$ сухих продуктов сгорания; 2 — $(NO)_k$ полного состава продуктов сгорания; 3 — максимальные значения $(NO)_k$, зафиксированные при оптимальных α .

С целью исключения воздействия отсоединенной ударной волны на продукты сгорания в конце камеры сгорания устанавливался отсекаТЕЛЬ, выполненный в виде перфорированной секции детонационной камеры. Отсекатель позволял снижать давление во фронте волны до 20 раз. Экспериментальные результаты (точность $\pm 10\%$) показывают, что отсоединенная ударная волна не оказывает влияния на $(NO)_k$.

В ряде работ при связывании азота плазмохимическим методом отмечалось увеличение $(NO)_k$ при добавлении к исходным газам легкоионизируемых веществ [8, 9]. Введение в детонационную камеру сгорания водного раствора K_2CO_3 (до 0,5% веса продуктов сгорания) не приводило к какому-либо увеличению $(NO)_k$. Дальнейшие исследования в области использования детонационного процесса для связывания азота будем проводить, имея в виду:

- увеличение температуры во фронте детонационной волны (джоулев нагрев, организация встречных детонационных волн) и
- увеличение скорости закалки до 10^7 — 10^8 град/с.

Детонационный магнетогидродинамический генератор электрической энергии

При создании промышленного МГД-генератора возникли трудности, связанные прежде всего с необходимостью поддержания достаточной электропроводности продуктов сгорания (~ 20 Ом/м) при

температурах, допускающих долговременное использование существующих конструкционных материалов канала генератора (~ 2000 К). Попытки получения указанного значения электропроводности оказались безуспешными, поэтому основные усилия концентрируются в настоящее время на создании материалов, способных эксплуатироваться при температуре ~ 2700 К, обеспечивающих требуемую электропроводность.

Использование ДКС для этой цели обещает определенные преимущества, так как материал стенки камеры, которая одновременно совмещает функцию канала преобразования энергии, находится под переменным действием высокой температуры продуктов детонационного сгорания и низкой температуры исходной смеси. Средняя температура стенки канала может поддерживаться при ~ 1500 К, тогда как температура продуктов сгорания соответствует детонационным условиям (~ 3000 К). Другое преимущество связано с тем обстоятельством, что энергия, расходуемая на сжатие исходной горючей смеси, черпается не из внешнего источника, каковым является компрессор, а непосредственно из химической энергии топлива. Нагнетание компонент горючей смеси производится при чрезвычайно низком перепаде давлений, который не связан с давлением в камере сгорания в течение процесса детонационного горения.

В настоящее время проведено экспериментальное исследование преобразования в электрическую энергию только той части химической энергии топлива, которая в детонационной волне преобразуется в кинетическую энергию потока продуктов сгорания. Преобразование в электрическую энергию части химической энергии, заключенной в покоящихся продуктах сгорания за волной разрежения, не осуществлялось. Предварительные эксперименты, проведенные с помощью детонационной трубы, снабженной различной диагностической аппаратурой (микроволновое зондирование на $\lambda=4; 8$ и 16 мм, ионизационные датчики, измерительная МГД-секция, зондовая методика и пр.) позволили с большой точностью ($\pm 0,25\%$) определить скорость распространения детонационных волн, скорость и электропроводность продуктов сгорания за ними в достаточно широком диапазоне начальных давлений и концентраций метана в кислороде. Эти эксперименты привели, в частности, к выводу о соответствии расчетных равновесных и опытных значений электропроводности продуктов сгорания ($\sim 10^{-2}$ Ом/м), устанавливающихся через 150 мкс после скачка давления. Скорость продуктов сгорания u вблизи детонационного фронта близка к расчетной скорости в точке Чепмена — Жуге, однако в области установления ионизационного равновесия она падает до 75% ее максимальной величины. Эти данные однозначно показали, что для прямого преобразования энергии электрические и газодинамические характеристики, а также распределение их не являются удовлетворительными, так как не могут обусловить достаточного параметра взаимодействия с магнитным полем. В ДКС, позволяющей вводить добавку с низким потенциалом ионизации (водный раствор K_2CO_3), электропроводность продуктов сгорания поднимается более чем в 10^2 раз.

Измеренные напряжения холостого хода и токи короткого замыкания ($B=0,23$ Т, расстояние между электродами $d=1,55 \cdot 10^{-2}$ м) представлены на рис. 4. Совпадение с расчетными значениями (udB) имеет место лишь через

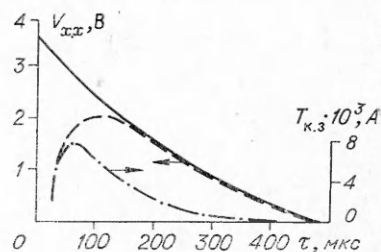


Рис. 4. Распределение напряжения холостого хода $V_{x,x}$ и тока короткого замыкания $T_{к.з} \cdot 10^3$ за детонационной волной.

— теория; - - - - эксперимент.

определенное время τ , зависящее от сопротивления нагрузки генератора (100 мкс для холостого хода и 50 мкс для короткого замыкания). Хотя ионизационное равновесие наступало через ~ 80 мкс, т. е. через интервал времени в ~ 2 раза меньшей, чем в отсутствие щелочной добавки, величина электропроводности не достигла расчетного значения и составляла только 1/10 его часть. Эти результаты связаны с несовершенством системы ввода добавки, ибо, согласно [10], запаздывание установления ионизационного равновесия может быть сокращено до 10 мкс.

Экспериментальный детонационный МГД-генератор, обнаружив все характерные особенности генераторов электрической энергии, в настоящем варианте оказался малоэффективным вследствие указанных обстоятельств. Авторы надеются, что улучшенная конструкция системы ввода присадки, а также увеличенные мощности установки позволят получить расчетные значения мощности электрической энергии.

*Поступила в редакцию
20/IX 1975*

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Войцеховский. Докл. АН СССР, 1959, 129, 6.
2. R. V. Morrison, F. O. Hays. Rotary Detonation Power Plant, United States Patent Office, 3, 240, 010; Patented Mar. 15, 1966.
3. И. В. Карп, Б. С. Сорока и др. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах. Киев, «Техника», 1967.
4. Л. С. Полак, В. С. Щипачев.— В сб.: Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме. М., «Наука», 1965.
5. Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. Окисление азота при горении. М., Изд-во АН СССР, 1947.
6. Г. В. Гуляев, Г. Н. Козлов и др.— В сб.: Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме. М., «Наука», 1965.
7. А. Н. Блаженова, А. А. Ильинская, Ф. М. Рапопорт. Анализ газов в химической промышленности. М., ГНТИ химической литературы, 1954.
8. Исследование процесса фиксации атмосферного азота на плазмотроне с ионизирующими добавками. Отчет ЭНИН, № 27. М., 1969.
9. Исследование процесса фиксации атмосферного азота на плазмотроне с добавкой в плазменную струю щелочных металлов. Отчет ЭНИН, № 60. М., 1970.
10. S. Vasu. Phys. Fluids, 1960, 3, 2.

УДК 541.124

О КИНЕТИКЕ ОКИСЛЕНИЯ БОРА

А. И. Григорьев, И. Д. Григорьева, В. И. Сигимов

(Комсомольск-на-Амуре)

В связи с возросшим в последнее время интересом к бору как возможному компоненту смесового топлива представляется целесообразным изучение кинетики окисления бора. В работах [1, 2] на основании экспериментальных данных по окислению бора при температурах до 1000 К получен параболический закон окисления. Однако, учитывая летучесть основного продукта реакции бора с кислородом — борного ангидрида, следует ожидать, что при более высоких температурах, когда станет заметным испарение борного ангидрида, фактически наблюдаемый закон окисления изменится.