

Рис. 4. Зависимость скорости волны от температуры на холодном конце для нестационарной и квазистационарной задач.

1, 2 — результаты численного анализа для нестационарной и квазистационарной ($h/qM_0=0,1$) задач соответственно.

ловых эффектов (в рассматриваемом диапазоне) и малых значений разогрева. Как правило, скорость распространения в нестационарном решении намного превышает скорость квазистационарного (рис. 4). Это соответствует результатам работы [15], где для случая подобия полей концентрации и температуры численно показывается, что наличие плато в зависимости скорости от обрезки и совпадение нестационарной и квазистационарной скоростей определяются параметром $\Gamma = \gamma - \beta$. При $\Gamma > 0,3$ имеет место явное вырождение, при $\Gamma < 0,1$ — указанные величины близки.

В рассматриваемом случае параметр Γ может принимать значение 0,1 для больших тепловых эффектов и малых значений разогрева и стремится к $+\infty$ с увеличением разогрева.

Все математические результаты работы имеют строгие доказательства, которые не приведены в силу ограниченности объема работы.

Поступила в редакцию 5/XII 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, Г. Н. Баренблатт, В. Я. Либрович и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
2. Я. Б. Зельдович, Д. А. Франк-Каменецкий. ЖФХ, 1938, 12, 1, 100.
3. Я. Б. Зельдович, Д. А. Франк-Каменецкий. Докл. АН СССР, 1938, 19, 693.
4. Б. В. Новожилов. Докл. АН СССР, 1961, 141, 151.
5. Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1966, 2, 3.
6. И. С. Любченко. ИФЖ, 1968, 14, 5.
7. Б. В. Ханукаев, М. А. Кожушнер, Н. С. Ениколопян и др. ФГВ, 1974, 10, 1.
8. Б. В. Ханукаев, М. А. Кожушнер, Н. С. Ениколопян. ФГВ, 1974, 10, 5.
9. В. С. Берман, Ю. С. Рязанцев. ФГВ, 1975, 11, 2.
10. А. П. Алдушин, Я. Б. Зельдович, С. И. Худяев. Распространение пламени по реагирующей газовой смеси. Препринт ОИХФ, Черноголовка, 1979.
11. А. Н. Колмогоров, И. Г. Петровский, Н. С. Пискунов. Бюл. МГУ, 1937, секц. А, 1, 6.
12. К. Uchiyama. J. Math. Kyoto University, 1978, 18, 3.
13. Д. А. Ваганов, С. И. Худяев. ФГВ, 1969, 5, 2.
14. К. Р. Haderer, F. Rothe. J. Math. Biol., 1975, 2.
15. А. П. Алдушин, В. Д. Луговой, А. Г. Мержанов и др. Докл. АН СССР, 1978, 243, 6.

НЕКОТОРЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ДИАГНОСТИКИ УЗКОПОЛОСНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОТОЧНЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ. II. ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ

В. В. Белый, Н. Ф. Котиков, А. П. Рябцев,
В. В. Соловьев, А. Ф. Хижун
(Москва)

Соответствующие теоретические вопросы обсуждены в сообщении [1]. Приводимые здесь экспериментальные материалы отображены по принципу наибольшей иллюстративности.

Пример реализации методики распознавания и подавления помех класса ГРЧ

Пример относится к экспериментальной энергетической установке, содержащей проточную камеру сгорания и лопастной агрегат питания. Цель исследования — охарактеризовать устойчивость горения на одной из собственных акустических частот камеры ~ 2100 Гц. Такая задача возникла потому, что на режиме подачи топлива, близком к номинальному для данной энергетической установки, в спектре внутрикамерного шума наблюдался четкий пик вблизи названной частоты (рис. 1, а). В то же время результаты корреляционного преобразования соответствующего узкополосного сигнала, выделенного посредством гауссового фильтра, имел вид незатухающих колебаний (рис. 1, з), характерный, в частности, для вибрационного горения.

Синхронные магнитные записи внутрикамерного шума и сигнала датчика оборотов вала агрегата питания использованы для реализации процедуры распознавания и подавления помех класса ГРЧ в соответствии с методикой [1]. Отношение постоянной времени когерентной фильтрации к периоду вращения вала агрегата питания составляло около 200; отношение $N/n \sim 17$ (N — число интегрирующих ячеек; n — отношение частоты 2100 Гц к роторной частоте).

Оценка спектра сигнала на выходе когерентного фильтра показана на рис. 1, б. Спектр содержит два пика: на частотах мерцания лопаток турбины и компрессоров соответственно. Спектр внутрикамерного шума, очищенного от названных составляющих класса ГРЧ, приведен на рис. 1, в, а корреляционная функция шума, выделенного гауссовым фильтром из очищенного сигнала в окрестности расчетной акустической частоты камеры 2100 Гц (время осреднения $T = 10$ с), — на рис. 1, д. В области $\tau > \tau_{\Phi}$ последняя имеет форму, близкую к экспоненциально-гармонической. Распознавание по схеме ТФК [1] показало, что это сигнал класса ЛУШ. Логарифмический декремент затухания для него $\delta = \beta/f = 0,1 \pm 10\%$.

В рассмотренном примере ошибки когерентной фильтрации оказались несущественными благодаря рациональному выбору постоянной времени накопления и числа интегрирующих ячеек. В общем случае присутствие ошибок в составе сигнала на выходе гауссового фильтра после когерентной фильтрации проявляется в том, что в составе оценки

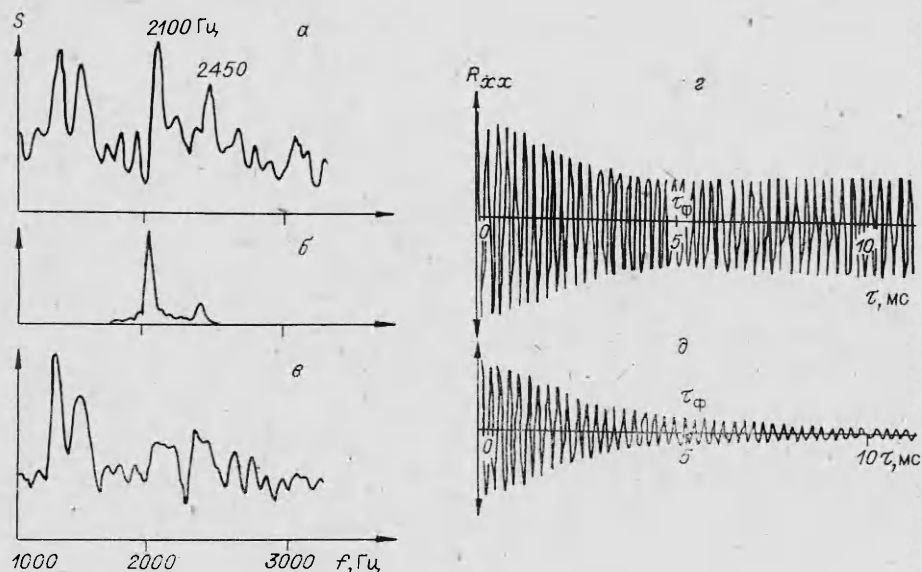


Рис. 1. Результаты спектрального и корреляционного анализа при распознавании и подавлении помех класса ГРЧ.

$R_{xx}(\tau)$ присутствует квазипериодическая компонента с относительно большим временем затухания — порядка постоянной времени когерентного накопления. В данном случае (см. рис. 1, *б*) этого нет.

Пример распознавания по схеме ТКФ и оценки декрементов затухания для шумов класса ЛУШ

Пример относится к серии экспериментов, выполненных одним из авторов (Н. Ф. Котиковым) на турбулентной газовой горелке, помещенной в цилиндрическую трубу. Стабилизацию пламени осуществляли с помощью проволочной сетки. Эксперимент состоял в том, что задавали различные режимы подачи горючей смеси и регистрировали шум в трубе посредством конденсаторного микрофона. Длительность каждого эксперимента составляла одну-две минуты. Шумы регистрировали на магнитную ленту и позже анализировали по методике [1]. Спектрограммы шумов опытов 10, 17 из серии показаны на рис. 2, *а*, *б*. Приводимые далее результаты относятся к спектральному пику с центральной частотой в окрестности 150 Гц.

Условия опытов и основные результаты исследования представлены на трехмерном графике рис. 3. Здесь по осям координат отложены расход горючей смеси в условных единицах G , коэффициент избытка окислителя α и декремент затухания δ для тех опытов, в которых сигнал, как установлено, принадлежит классу ЛУШ. (Значения δ показаны в виде вертикальных отрезков, цифры — номер опыта.)

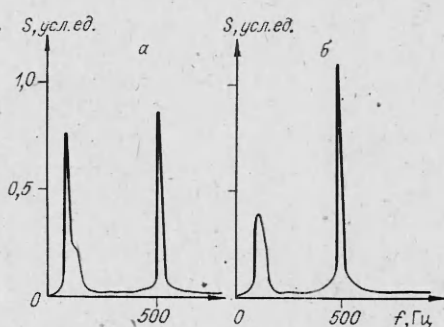


Рис. 2. Оценки спектров мощности шумов в турбулентной газовой горелке.

При исследовании по схеме ТКФ получены результаты, иллюстрируемые рис. 4. Пример совпадения (в пределах теоретической точности) эмпирических зависимостей $\rho_x(\tau)$, $\rho_\lambda(\tau)$ и $\rho_\varphi(\tau)$ показан на рис. 4, *а*. В соответствии с методикой [1] такое совпадение свидетельствует о принадлежности отфильтрованного шума классу ЛУШ. В подобных случаях оценивали значения декрементов затухания, о чем говорилось выше. Среднеквадратичная точность оценок лежала в пределах 10—20%.

В некоторых опытах (они отмечены на рис. 3 заштрихованными эллипсами) отфильтрованный сигнал имел шумоподобный вид, однако оценки $\rho_x(\tau)$, $\rho_\lambda(\tau)$, $\rho_\varphi(\tau)$ в пределах эмпирических среднеквадратичных отклонений не совпадали. В частности, при $\tau=0$ либо ρ_λ , либо ρ_λ и ρ_φ одновременно были существенно меньше единицы. Такие особенности свидетельствуют об автоколебаниях, предельный цикл которых возмущен параметрически и (или) динамически турбулентными пульсациями.

В одном случае (опыт 15) получен результат распознавания, отвечающий теоретически «чистой» модели стационарного автогенератора, динамически возмущенного широкополосным шумом (см. рис. 4, *б*) (соответствующий диагностический признак рассмотрен в [1]). В опыте 12 автоколебания имели форму, близкую к гармонической. Оценка ρ_λ дала практически пулевые результаты всюду на оси τ .

Применение метода для оценки статистической устойчивости горения в проточных камерах без стабилизаторов пламени

В этом разделе даны примеры реализации метода для исследований, связанных с одним из аспектов проблемы неустойчивого (вибрационного) горения в проточных камерах экстремальной теплонапряженности, не

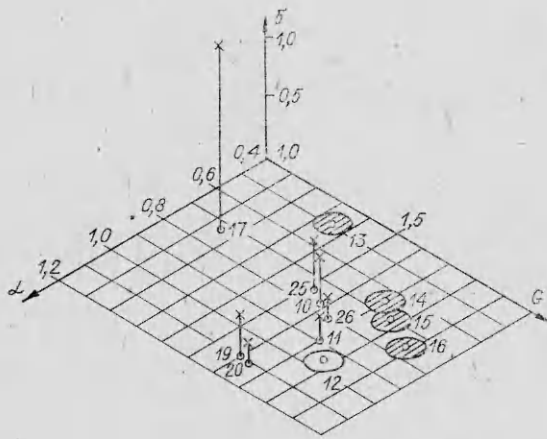


Рис. 3. Отображение результатов экспериментов в пространстве G, α, δ .

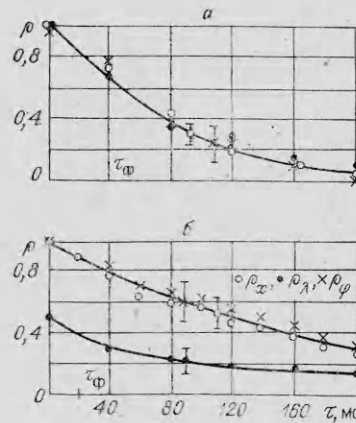


Рис. 4. Результаты распознавания по схеме ТКФ.
а) опыт 19, $T=60$ с; б) опыт 15, $T=120$ с.

содержащих стабилизаторов пламени¹. В литературе отмечены случаи невозпроизводимого (относительно контролируемых условий эксперимента — расхода и температуры компонентов топлива) возбуждения неустойчивости горения в таких камерах сгорания. В связи с подобными фактами некоторые авторы используют понятие «статистическая устойчивость горения» [2]. Соответствующая количественная характеристика есть вероятность устойчивого горения при данных контролируемых условиях эксперимента. Распространенный в литературе способ интерпретации такой невозпроизводимости основан на концепции жесткого возбуждения нелинейной системы под действием импульсных возмущений конечной амплитуды — спонтанно возникающих в камерах сгорания случайных выбросов давления [2].

Возможно, однако, и другое объяснение. Оно основано на учете того обстоятельства, что стабилизация пламен в названных камерах сгорания происходит сама собой за счет образования вихревого движения (противотоков) в зоне впрыска топлива. Вопрос об эффективности такого механизма стабилизации пламени, т. е. о наличии однозначного соответствия их структуры условиям на входе в камеру сгорания, далеко не тривиален [3, 4]. Высказана гипотеза о принципиальной возможности существенных случайных вариаций структуры пламен ЖРД с характерными временами, несоизмеримо большими по сравнению с временем сгорания и временным масштабом турбулентных пульсаций в камере сгорания [4]. Эта гипотеза нашла экспериментальное подтверждение при изучении структуры пламен в небольших физических моделях ЖРД [5]. Поскольку, согласно фундаментальным представлениям теории вибрационного горения, структура пламен является существенным фактором устойчивости, предпринята попытка подойти к объяснению отмеченной невозпроизводимости с позиций линейно-параметрической модели. Обсуждаемый здесь метод стал инструментом для экспериментальной проверки пригодности такой модели применительно к некоторым техническим объектам названного типа. Естественно, что в качестве параметра, нестационарность которого подлежит выявлению, выбран декремент затухания «опасной» (с точки зрения устойчивости) собственной акустической частоты камеры сгорания.

При постановке такого рода исследований необходимо считаться с инерционностью оценки декремента затухания статистическим методом,

¹ В настоящее время к числу соответствующих технических устройств относятся, как известно, основные камеры сгорания и газогенераторы ЖРД, а также камеры сгорания МГД-генераторов на жидких и газообразных топливах.

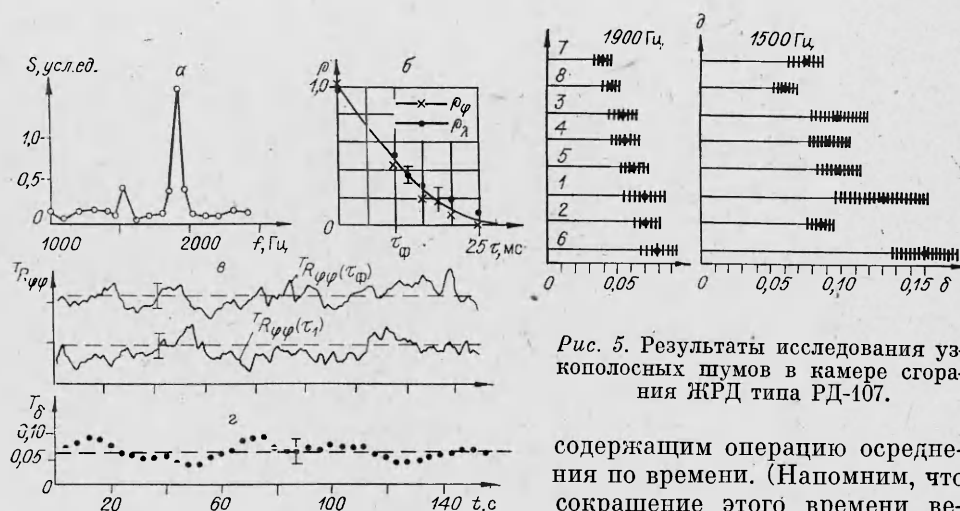


Рис. 5. Результаты исследования узкополосных шумов в камере сгорания ЖРД типа РД-107.

содержащим операцию осреднения по времени. (Напомним, что сокращение этого времени ведет к возрастанию статистической ошибки оценки декремента затухания [1].) Очевидны также трудности вычислительного характера, возникающие при многократной на протяжении одного эксперимента оценке декремента затухания с привлечением метода наименьших квадратов. Такую обработку можно в принципе выполнить, например, с помощью универсальной ЭВМ, соединив ее с коррелятором, способным работать в натуральном масштабе времени эксперимента в режиме «скользящего» по времени интегрирования. При выполнении исследований исполнители не располагали такой возможностью, и пришлось прибегнуть к упрощенным методикам, которые при том же времени осреднения приводят к повышенным статистическим ошибкам.

Сначала изучены магнитные записи шумов давления в нескольких камерах сгорания ЖРД типа РД-107 [6], отличающихся абсолютной устойчивостью горения в рабочем диапазоне режимных параметров. Магнитные записи выполнены при стендовых испытаниях двух связок ЖРД этого типа по четыре камеры в каждой. Условия испытаний приведены ниже.

Номер магнитной записи	Горючее	Вариант конструкции	Номер магнитной записи	Горючее	Вариант конструкции
1	K1	ПД1	5	K2	ПД1
2	K1	ПД1	6	K2	ПД1
3	K1	ПД2	7	K2	ПД2
4	K1	ПД2	8	K2	ПД2

Эксперименты выполнены с использованием в качестве горючего керосинов двух марок (условно K1 и K2). В каждой связке две камеры изготовлены по основной техдокументации, а две другие с уменьшенным полем допусков на гидравлические характеристики форсунок (обозначения ПД1 и ПД2 соответственно). Эксперименты выполнены по программе: после запуска — номинальный режим на протяжении 30 с, затем несколько переключений режима в пределах до 10%.

Все 8 магнитограмм подвергнуты спектральному анализу при времени осреднения 10 с. Полученные оценки спектров (рис. 5, а) качественно подобны; абсолютные мощности и их отношение для спектральных пиков на частоте первой продольной акустической моды камеры сгорания (1500 Гц) и первой тангенциальной моды (1900 Гц) изменяются в несколько раз от записи к записи.

По всем магнитограммам выполнено также сопоставление эмпирических зависимостей $\rho_\chi(\tau)$ и $\rho_\phi(\tau)$ для обоих спектральных пиков при времени осреднения $T = 10$ с. Получено совпадение пар названных зависимостей в пределах теоретической точности оценок. Один из примеров

показан на рис. 5, б для частоты первой тангенциальной акустической моды камеры сгорания. Таким образом, показана принадлежность во всех экспериментах названных спектральных пиков классу ЛУШ.

Непрерывные оценки декрементов затухания в экспериментах выполняли упрощенным способом. Сигнал с выхода магнитного регистратора подавали на соответствующим образом настроенный гауссов фильтр и затем на детектор косинуса случайной компоненты фазы узкополосного шума. К выходу детектора подключали коррелометр, которым непрерывно оценивали $\tilde{R}_{\varphi\varphi}(\tau)$ для двух фиксированных значений аргумента τ в режиме скользящего интегрирования с постоянной времени 4 с. Одно из значений $\tau = \tau_{\phi}$, другое подбирали примерно из соотношения $R_{\varphi\varphi}(\tau)/R_{\varphi\varphi}(\tau_2) \sim 1/3$. Для регистрации результатов корреляционного анализа использовали двухканальный самописец. Пример двойной записи описанным способом показан на рис. 5, в, где указаны также теоретические среднеквадратичные ошибки.

Для множества дискретных значений текущего времени каждого эксперимента с интервалами между ними 4 с оценивали величину

$$T_{\delta} = \frac{1}{f(\tau_{\phi} - \tau_2)} \ln \frac{T R_{\varphi\varphi}(\tau_{\phi})}{T R_{\varphi\varphi}(\tau_2)},$$

при этом дополнительно осредняли три соседних значения дискретного времени t_i . Один из окончательных результатов такой обработки приведен на рис. 5, г. Там же показана теоретическая среднеквадратичная ошибка оценки δ при соответствующих значениях β и ρ_{ϕ} .

Общий итог этой части исследования состоит в следующем. Ввиду использования упрощенного приема непрерывной оценки декремента затухания среднеквадратичные статистические ошибки оказались примерно в 3 раза выше того уровня, который мог бы быть обеспечен при оптимальном способе обработки. Ошибки лежали в пределах $\sim 20-40\%$ в зависимости от соответствующих значений параметров β и ρ_{ϕ} [1]. Во всех случаях не обнаружено колебаний оценки декремента затухания, которые выходили бы за пределы точности обработки.

Таким образом, при функционировании ЖРД типа РД-107 случайные колебания декремента затухания, если они и имеют место, по своему относительному среднеквадратичному уровню менее 20%. Если принять естественную гипотезу о нормальном законе распределения случайных колебаний декремента затухания, то для вероятности неравенства $\delta < 0$ (условие возбуждения неустойчивости горения) получается оценка $P\{\delta < 0\} < 10^{-7}$. Это, в сущности, и означает, что данный объект характеризуется абсолютной устойчивостью с позиций линейно-параметрической модели возбуждения.

На рис. 5, д сопоставлены декременты затухания для двух акустических частот камеры сгорания, оцененные оптимальным способом (методом наименьших квадратов) для выборок длительностью по 10 с. Диаграммы расположены (сверху вниз) в порядке возрастания декремента затухания для частоты первой тангенциальной акустической моды камеры сгорания (цифры — номер магнитной записи). Среднеквадратичная точность показана штриховкой.

Обращает на себя внимание тот факт, что сверху вниз на рис. 5, д сначала идут эксперименты с шифром ПД2, затем — с шифром ПД1. Случайным такое распределение может быть только с вероятностью около 3%. Отсюда можно сделать вывод, что сокращение поля допусков на гидравлические параметры форсунок привело в данном случае к ощутимому снижению декремента затухания для частоты первой тангенциальной акустической моды. Впрочем, это относится также и к частоте первой продольной акустической моды: оценка коэффициента корреляции между декрементами затухания для той и другой частот дает значимую величину 0,85.

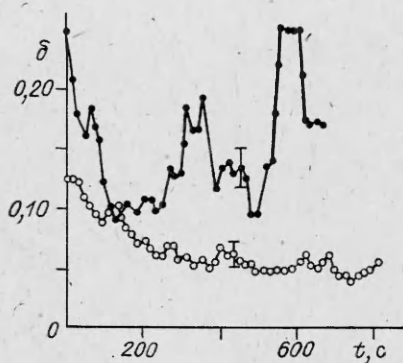


Рис. 6. Результаты измерений декремента затухания частоты первой тангенциальной акустической моды камеры сгорания экспериментального ЖРД, характеризующегося низкой статистической устойчивостью горения.

Другое аналогичное исследование выполнено применительно к одному из вариантов конструкции экспериментального ЖРД, который обнаружил на стадии испытаний низкую статистическую устойчивость: наблюдались отдельные случаи (с относительной частотой по-

рядка 0,1) возбуждения на частоте первой тангенциальной моды камеры сгорания. Изучены две магнитограммы внутрикамерных шумов при испытаниях, в которых неустойчивости не было. Из каждой магнитограммы выбрали несколько участков длительностью по 10 с и выполнили распознавание по схеме ТКФ. Во всех случаях узкополосный шум вблизи расчетной частоты первой тангенциальной моды оказался класса ЛУШ. Декремент затухания этой частоты во время испытаний непрерывно оценивали по методике, обеспечивающей примерно в 2 раза более высокую статистическую точность, чем в предыдущем примере. Результаты исследования показаны на рис. 6. Нужно отметить, что режим подачи топлива в этих экспериментах многократно варьировали по ступенчатому закону в пределах до единиц процентов. Однако наблюдаемые изменения декремента затухания некоррелированы с вариациями режима подачи топлива. В силу сказанного экспериментальные кривые рис. 6 можно формально рассматривать как две реализации процесса $\delta(t)$, случайного относительно контролируемых условий эксперимента. Видно, что среднеквадратичное отклонение этого процесса от его математического ожидания соизмеримо с последним, и вероятность неравенства $\delta < 0$ здесь должна иметь существенную величину.

Ограниченный объем журнальной статьи не позволяет привести здесь другие примеры подобного рода. Отметим лишь, что статистическим изменениям декремента, затухания, соизмеримым с их средними значениями, непременно сопутствует неудовлетворительная статистическая устойчивость горения. Иными словами, воспроизводимость декрементов затухания — необходимое условие высокой статистической устойчивости.

В заключение отметим, что разработанный метод с успехом использован также для интерпретации спектров мощности механических вибраций, возникающих при горении, и для решения некоторых других диагностических задач применительно к объектам, генерирующим узкополосные колебания на фоне широкополосного шума, в частности, в биофизике.

Таким образом, в этой части сообщения даны примеры реализации в экспериментах с различными проточными камерами сгорания всех диагностических алгоритмов, описанных в [1]. Показано, что одна из причин низкой статистической устойчивости горения в проточных камерах без стабилизаторов пламени — это случайные (относительно контролируемых условий эксперимента) колебания декрементов затухания для собственных форм колебаний.

Поступила в редакцию 30/VI 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Белый, А. П. Рябцев, В. В. Соловьев и др. ФГВ, 1985, 21, 1.
2. Неустойчивость горения в ЖРД/Под ред. Д. Т. Харрье, Ф. Г. Вирдона. М.: Мир, 1975.
3. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: ИЛ, 1968.

4. В. В. Белый. Докл. АН СССР, 1971, 201, 6.
 5. А. Р. Абульханов, В. В. Белый, В. Б. Либрович. Докл. АН СССР, 1974, 215, 6.
 6. Космонавтика/Под ред. В. П. Глушко. М.: Советская энциклопедия, 1970.

ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНЫХ РАЗБАВИТЕЛЕЙ И НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА НОРМАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ПЛАМЕНИ СМЕСЕЙ ХЛОРА С УГЛЕВОДОРОДАМИ

А. В. Стеблев
(Москва)

До настоящего времени влияние инертных разбавителей и начальной температуры на нормальную скорость пламени смесей хлора с углеводородами не изучено. Этот вопрос существен для ряда задач, например при расчете критических параметров различных систем взрывозащиты технологического оборудования, в котором обращаются взрывоопасные парогазовые смеси и др.

Настоящая работа посвящена изучению влияния инертных разбавителей (CO_2 , N_2 , He) и начальной температуры на нормальную скорость u_n пламени смесей хлора с метаном, пропаном и этиленом. Нормальную скорость пламени измеряли по методу полной поверхности внутреннего светящегося конуса пламени прямым фотографированием. Опыты проводили при начальном давлении $1 \cdot 10^5$ Па на бунзеновских горелках диаметром от 4 до 12 мм, помещенных в бокс с окнами для фотографирования. Исходные реагенты дозировали реометрами, погрешность дозировки составляла до 5%. Расход смесей варьировали в диапазоне 10—45 cm^3/c . С целью устранения влияния атмосферного воздуха горелку экранировали дозированным потоком азота (до 5-кратного по отношению

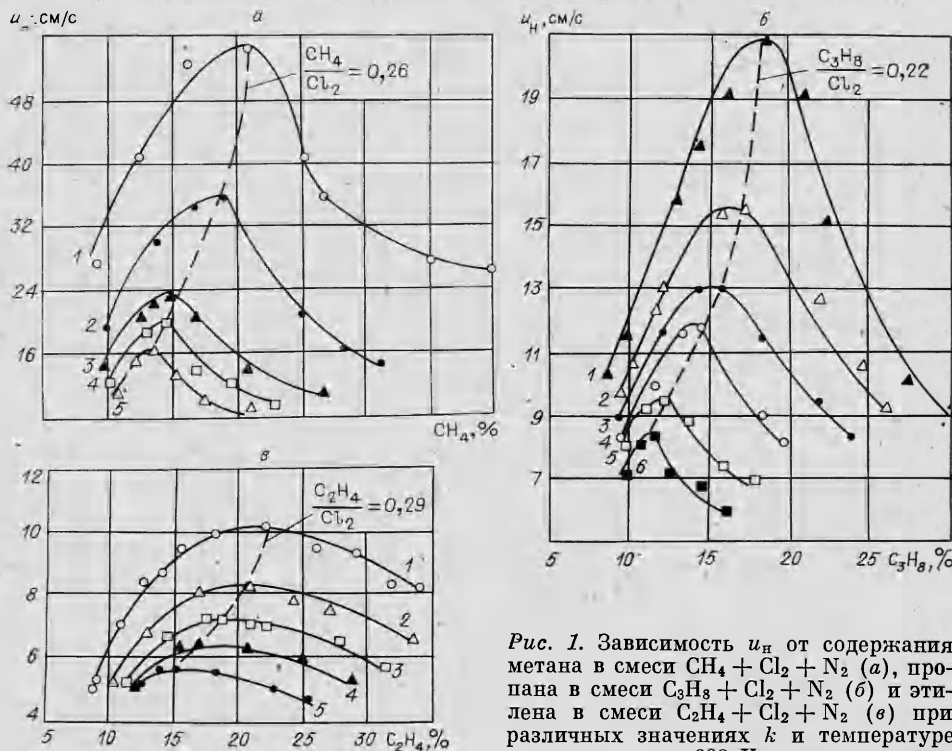


Рис. 1. Зависимость u_n от содержания метана в смеси $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2 + \text{N}_2$ (а), пропана в смеси $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{Cl}_2 + \text{N}_2$ (б) и этилена в смеси $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{Cl}_2 + \text{N}_2$ (в) при различных значениях k и температуре 293 К.

$\frac{\text{Cl}_2}{\text{Cl}_2 + \text{N}_2}$: а) 1—1,0, 2—0,88, 3—0,68, 4—0,63, 5—0,58; б) 1—1,0, 2—0,95, 3—0,88, 4—0,79, 5—0,66, 6—0,59; в) 1—1,0, 2—0,93, 3—0,74, 4—0,64, 5—0,54.