

при сращивании решений внешней и внутренней задач для уравнений (12) при условиях равновесия. Она может быть вычислена также при известных из экспериментов значений T или E в какой-то точке внешней области. В этой области из (15) и (19) находим

$$E = \frac{I}{4\pi\sigma_0 r^2 \exp\left\{\frac{CU_i}{k(T_0 r + C)T_0}\right\}} \quad (20)$$

Формулу (20), содержащую только одну неопределенную константу, можно рекомендовать к использованию при обработке результатов измерений поля и температуры. Кроме того, ее можно применять и для продуктов горения в промышленных установках.

Автор благодарит Н. И. Кидина, Б. С. Фиалкова, Е. И. Янговского, а также участников IX Карагадинского семинара по электрофизике горения за полезное обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения.— М.: Энергия, 1976.
2. Апфельбаум М. С., Полянский В. А. Магнитная гидродинамика, 1982, 1, 71.
3. Янговский Е. И., Апфельбаум М. С. Электронная обработка материалов, 1984, 2, 58.
4. Plumley H. J. Phys. Rev., 1941, 50, 200.
5. Френкель Я. И. ЖЭТФ, 1938, 8, 12, 1292.
6. Onsager L. J. Chem. Phys., 1934, 2, 9, 599.
7. Мак-Даниэль И. Процессы столкновений в ионизованных газах.— М.: Мир, 1967.
8. Янговский Е. И., Апфельбаум М. С., Петриченко Н. А. Магнитная гидродинамика, 1984, 3, 128.
9. Апфельбаум М. С., Баранова Т. Н., Северов А. М. и др.— В кн.: Матер. V Всесоюз. конф. по тепломассообмену. Т. 1, ч. II.— Минск, 1976.
10. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1.— М.: Наука, 1973.

Поступила в редакцию 23/VII 1986,
после доработки — 6/XI 1986

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АВТОРЕГРЕССИОННОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕКРЕМЕНТА И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ГАЗА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

В. А. Кармалита, В. И. Фурлетов
(Москва)

Предложенный в [1] метод определения логарифмического декремента и частоты собственных колебаний газа по малым случайным колебаниям давления (естественным внутрикамерным шумам) относится к группе корреляционных методов. Он назван авторегрессионным, поскольку в его основу положена модель авторегрессии второго порядка, статистически эквивалентная изучаемым случайным колебаниям.

Задачи, решению которых посвящена статья, связаны со следующими вопросами практического применения авторегрессионного метода: соответствие определяемого по экспериментальным данным параметра d [1] физическому понятию логарифмический декремент; распознавание случайного и автоколебательного характера колебаний газа; влияние места регистрации колебаний газа в камере на достоверность оценок (логарифмического) декремента.

Определение декремента в модельной камере сгорания. Оценка устойчивости камеры сгорания как потенциальной автоколебательной системы посредством декремента подразумевает уподобление ее одиночному колебательному контуру с сосредоточенными параметрами, на ко-

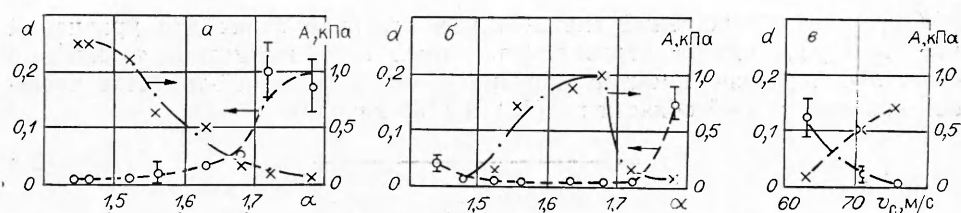


Рис. 1. Зависимость декремента и среднеквадратичных значений амплитуды колебаний давления от режимных параметров.

а) $v_c = 71,3$ м/с, $f_0 \approx 250$ Гц; б) $v_c = 71,3$ м/с, $f_0 \approx 560$ Гц; в) $\alpha = 1,62$, $f_0 \approx 250$ Гц.

торый действует широкополосный случайный шум. Приведение сложной системы гидродинамических уравнений и граничных условий, описывающих процесс горения в камере, к одному дифференциальному уравнению второго порядка для амплитуды колебаний давления в функции времени содержит много упрощающих предположений [1]. Кроме того, понятие декремента применимо не ко всем типам автоколебательных систем [2]. Поэтому в задачу работы входило изучение характера изменения декремента колебаний в модельной камере при постепенном изменении режимов и конструктивных параметров (скорости газа, коэффициента избытка воздуха, положения стабилизатора), переводящих систему из устойчивого состояния в неустойчивое. Только при достаточно плавном уменьшении декремента по мере приближения к границе устойчивости можно говорить о соответствии определяемого параметра физическому понятию «декремент» и о применимости его для оценки устойчивости.

Модель камеры сгорания представляла собой канал прямоугольного сечения 200×75 мм и длиной 3135 мм. В канале располагался стабилизатор пламени, состоящий из трех одинаковых клинообразных элементов с высотой полки 30, шириной 75 мм и углом при вершине 30° . Расстояние от начала камеры до стабилизатора равнялось 2253 мм. Камера работала на однородной бензиновоздушной смеси. На входе в камеру стоял регулируемый дроссель с критическим перепадом давления. Другой конец камеры оставался открытым. Испытания проводили при значениях скорости у задних кромок стабилизатора $v_c = 63,0; 71,3$ и $75,9$ м/с при изменении коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,4 \div 1,85$.

Сигналы от датчика давления регистрировали на магнитофоне с равномерной частотной характеристикой до 2,5 кГц и затем обрабатывали на ЭВМ [1]. В спектре колебаний давления газа в камере имеются два пика на частотах 250 и 560 Гц, сопровождаемые широкополосным шумом. Декременты определены для обеих центральных частот f_0 (рис. 1). Реализации в ЭВМ вводили со следующими параметрами: частота дискретизации 6600 Гц, объем дискретной выборки 8192 отсчета (длительность реализации $\approx 1,24$ с), число уровней квантования ± 2048 на ± 1 В. Представленные на рис. 1 амплитуды колебаний получены с помощью анализатора спектра SBA-101 с полосой пропускания 8,5% относительно центральной частоты фильтра (для уровня затухания 3 дБ).

Для всех обработанных сигналов отношения сигнал/шум в выделенных цифровым фильтром [1] полосах частот с $f_0 = 250$ и 560 Гц превышало 16. Поэтому влияние шума на оценки декремента и частоты не учитывали. Погрешности оценок d для $f_0 = 250$ Гц, указанные на рис. 1, превышает погрешности для $f_0 = 560$ Гц из-за того, что при $f_0 = 250$ Гц длина реализации $N_T = 310$, а для 560 Гц $N_T = 695$. Однако достигнутая точность оценок декремента позволяет уверенно судить о характере его изменения. Уменьшение d находится в соответствии с увеличением среднеквадратичных значений амплитуды колебаний давления. Аналогичная зависимость наблюдается в области устойчивости перед границей вибрационного горения при непрерывном изменении стабилизатора пламени по длине камеры. Таким образом, полученные оценки декремента

соответствуют физической картине явления перехода к неустойчивому горению.

Оценки частот колебаний и декрементов, изменялись для первой компоненты в диапазоне 247—253 Гц с погрешностью менее 0,8%, а для второй компоненты при 557 ÷ 563 Гц с погрешностью менее 0,4%.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что декременты чувствительны к изменениям режимных и конструктивных параметров. Их значения характеризуют устойчивость процесса горения, а вид зависимости d от режимных параметров позволяет судить о запасе устойчивости. В то же время формальное определение декремента на режиме вибрационного горения, как видно из рис. 1, дает значения, отличные от нуля. Это связано с воздействием широкополосных шумов на автоколебательную систему, с превращением дискретного спектра автоколебаний под действием шумов в непрерывный [3]. В связи с этим определение декремента должно сопровождаться проверкой случайного характера исследуемого узкополосного колебания (особенно при малых d) и выявлением автоколебаний, для которых процедура оценивания теряет смысл.

Вместе с тем для оценки запаса устойчивости процесса горения по декременту представляется полезным для каждого типа камеры знать примерные абсолютные значения α , соответствующие границе устойчивости. В модельной камере сгорания такому минимальному значению соответствует величина, меньшая 0,05.

Идентификация нормального узкополосного шума. В качестве признаков, позволяющих отличить случайные узкополосные колебания газа от авто- и вынужденных периодических колебаний, используются плотность распределения амплитуды колебаний [3], плотность распределения колебаний в узкой полосе спектра [4], плотность распределения квадрата их амплитуды [5], огибающие корреляционных функций сигнала датчика давления газа, огибающей и фазы этого сигнала [2]. С помощью этих признаков вывод о характере колебаний делается по виду получаемых зависимостей или по совпадению нескольких зависимостей в пределах точности их оценок.

Отличить случайные узкополосные колебания газа от авто- и вынужденных периодических колебаний можно также на основе количественной оценки только одного параметра, который дается ниже. Принадлежность колебаний к вынужденным решается методами когерентной фильтрации [2] или с помощью анализа, учитывающего характер изменения амплитуды и частоты колебаний при изменении режима работы камеры.

Процедуру идентификации построим на различии законов распределения значений авто- и случайных колебаний. Для последних наиболее вероятные значения группируются в окрестности нуля, а для первых — в окрестности амплитудного значения, равного $1,4\sigma_x$, где σ_x — среднеквадратичное значение (амплитуды) колебаний. Случайные колебания отличаются от автоколебаний частотой появления в регистрируемом сигнале одних и тех же значений.

Исходя из этого, в качестве критерия распознавания примем вероятность превышения значения сигнала некоторого порога X_s . Выберем X_s так, чтобы вероятности указанных событий для случайных колебаний P_1 и автоколебаний P_2 отличались наиболее сильно. В случае, когда автоколебания носят гармонический характер, а случайные узкополосные колебания подчиняются нормальному закону распределения, разность $|P_1 - P_2|$, согласно выполненным расчетам, достигает максимального значения, равного 0,195 при $X_s = 0,85\sigma_x$. При этом $P_1 = 0,395$, $P_2 = 0,59$, т. е. для автоколебаний вероятности появления значений, больших $0,85\sigma_x$, в 1,5 раза выше, чем для случайных.

В качестве эмпирической оценки вероятности рассматриваемого события обычно используется частота $\nu = n/N$, где N — объем исследуемой выборки; n — число отсчетов, при которых имело место данное событие.

Обозначим частоту появления события $A (|X_i| \leq 0,85\sigma_x)$ через $\nu_A = n_A/N$, а события $B (|X_i| > 0,85\sigma_x)$ через $\nu_B = n_B/N$; $n_A + n_B = N$.

Эмпирическая оценка ν — случайная величина, поэтому для принятия решения о характере колебаний следует методами теории статистических выводов проверить гипотезу о соответствии значения ν вероятности P_1 и P_2 . В силу статистической изменчивости оценок ν возможны ошибки двух родов. Если гипотеза отвергается, а в действительности она верна, делается ошибка первого рода; если принимается, когда она неверна, — второго рода. Чтобы определить вероятности указанных ошибок, необходимо иметь количественные характеристики распределения ν_1 и ν_2 . Вероятность появления в выборке объемом N события B n_B раз может быть описана биномиальным распределением, которое характеризуется математическим ожиданием $P(B) \cdot N$ и дисперсией $P(A) \cdot P(B) \cdot N$. Переход от n_B к ν_B осуществляется делением на N , поэтому ν_B имеет среднее значение $\mu_\nu = P(B)$ и дисперсию измерений $\sigma_\nu^2 = \frac{P(A) \cdot P(B)}{N}$.

Следовательно, распределения оценок ν для случайных колебаний характеризуются числовыми показателями $\mu_{\nu_1} = P_1 = 0,395$, $\sigma_{\nu_1} = 0,489/\sqrt{N}$, а для автоколебаний $\mu_{\nu_2} = P_2 = 0,59$, $\sigma_{\nu_2} = 0,492/\sqrt{N}$. При вероятности появления некоторого события $P > 0,3$ уже для $N > 30$ в качестве аппроксимации биномиального распределения можно использовать гауссово, поэтому односторонние доверительные интервалы при $P = 0,999$ для оценок ν (верхней границы для ν_1 и нижней — для ν_2) находятся из выражений

$$\nu_{1u} = 0,395 + \frac{1,467}{\sqrt{N}}, \quad \nu_{2l} = 0,590 - \frac{1,476}{\sqrt{N}}.$$

При $N > 228$ границы ν_{1u} и ν_{2l} не пересекаются. Это позволяет статистически различить значения ν_1 и ν_2 , а следовательно, идентифицировать колебания.

Природа статистических выводов такова, что при отклонении гипотезы можно заранее оценить вероятность возможной ошибки первого рода P_α . Так, при $\nu > \nu_{1u}$ вероятность не признать случайный характер колебаний $P_\alpha = 0,001$. Если же $\nu < \nu_{1u}$, то гипотеза о случайном характере колебаний не отвергается. Однако это не означает, что она подтверждена с заданной вероятностью. Можно лишь говорить о конкретном значении вероятности P_β ошибки второго рода для альтернативной гипотезы. Вероятность $1 - P_\beta$ носит название мощности критерия. Поскольку при $N > 228$ границы альтернативных гипотез ν_{1u} и ν_{2l} не пересекаются, то это означает, что при прохождении каждой из гипотез $P_\beta < 0,001$.

Полученные результаты относятся к случайным или гармоническим колебаниям. На практике автоколебания испытывают медленные флуктуации амплитуды и фазы и сопровождаются аддитивным широкополосным шумом, наличие которого трансформирует закон распределения значений сигнала. В этом случае исходные посылки рассмотренного подхода не будут адекватны реальному сигналу.

С целью уточнения области применимости предложенного критерия было проведено численное моделирование смеси гармонического сигнала и гауссова шума при различных отношениях сигнал/шум. Установлено, что критерий позволяет распознать гармонический сигнал при $\sigma_x/\sigma_\epsilon \geq 2$, где σ_ϵ — среднеквадратичное значение амплитуды шума в полосе пропускания применяемого узкополосного фильтра. Кроме того, данный критерий опробован при исследовании характера колебаний в камере натурной энергетической установки. Спектр колебаний в этой камере на одном из режимов имеет вид, показанный на рис. 2. На другом режиме работы камеры пик в спектре колебаний давления газа отсутствовал, т. е. его появление связано с особенностями самого процесса горения.

Декремент и центральная частота колебаний, соответствующих спектральному пику, определялись по реализации 500 периодов. Смеще-

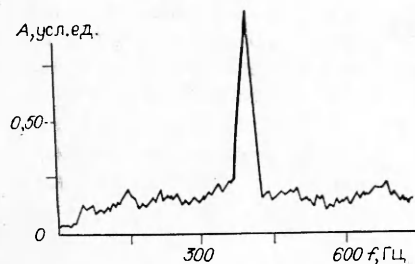


Рис. 2. Спектр колебаний давления

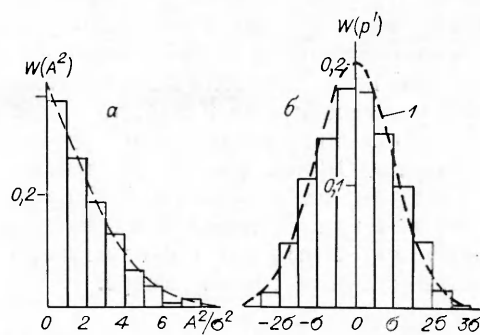


Рис. 3. Гистограммы распределений $W(A^2)$ (а) и $W(p')$ (б) в камере.

1 — нормальный закон распределения.

ние в оценках декремента оказалось незначительным, так как в полосе применяемого фильтра $\sigma_x/\sigma_e > 16$. (Отметим, что для модельной камеры $\sigma_x/\sigma_e \approx 16$ при $d \leq 0,2$, для натурной — при $d \leq 0,4$.) Получено $f = 395 \pm 0,4$ Гц, $d = 0,06 \pm 0,02$.

На осциллограммах колебаний давления при $d < 0,1$ хорошо просматривается периодичность процесса. Поэтому проведена диагностика характера регистрируемых колебаний. Результаты ее — гистограммы распределений квадрата амплитуды $W(A^2)$ и значений колебаний давления газа $W(p')$ в узкой полосе спектра (396 ± 38 Гц) — представлены на рис. 3. Монотонный характер убывания зависимости $W(A^2)$ и форма распределения значений колебаний, соответствующая гистограмме случайного шума с нормальным распределением, свидетельствуют об отсутствии автоколебаний, т. е. вибрационного горения. Этот факт подтверждает и предложенный количественный критерий. Параметр v_2 оценивался по тому же числовому материалу, что и d , и оказался равным 0,33; значения $v_2 < v_{2l}$ указывают на случайную природу исследуемых колебаний. Исследования с натурной камерой подтвердили высокую чувствительность декремента к изменению параметров режима и геометрии камеры, в частности к изменению площади проходного сечения сопла.

Выбор места регистрации колебаний давления газа в камере сгорания. Оценки декремента и частоты, вообще говоря, не зависят от места установки датчика давления. Однако надо иметь в виду следующее обстоятельство. Величина отношения сигнал/шум, существенно влияющая на достоверность оценок, зависит от места регистрации колебаний газа. Это объясняется пространственным распределением среднеквадратичных значений амплитуды узкополосных колебаний давления газа с интересующей собственной частотой камеры. Отношение соответствующих величин в пучности и узле колебаний давления, выделенных с помощью узкополосного фильтра (8,5%), на режиме устойчивого горения отличаются в 1,5—2,5 раза. Уровень же аддитивного широкополосного шума примерно одинаков в любом месте камеры (за исключением участков, расположенных близко к концу зоны циркуляции за стабилизаторами пламени). Отсюда следует, что достоверность оценок декремента будет тем выше, чем ближе к пучности давления выбрано место регистрации колебаний газа.

При $\sigma_x/\sigma_e < 16$ необходимо внести поправку в оценку декремента [1]. Величина отношения σ_x/σ_e с достаточной точностью может быть определена интегрированием спектральной плотности мощности в полосе пропускания применяемого цифрового фильтра. При этом изменение спектральной плотности широкополосного шума в указанной полосе частот описывается линией, плавно соединяющей участки спектра по обе стороны пика.

Выводы. Подтверждена работоспособность авторегрессионного метода определения логарифмического декремента и частоты собственных коле-

баний газа в модельной и натурной камерах сгорания на режимах устойчивой работы. Чтобы отличить случайные узкополосные колебания газа от почти гармонических автоколебаний, когда формальное применение метода может привести к неверному выводу об устойчивости процесса горения, предложен и опробован количественный критерий распознавания. Он заключается в оценке вероятности появления внутрикамерных шумов, превышающих 0,85 среднеквадратичного значения колебаний давления газа. С целью повышения достоверности оценок логарифмического декремента даны рекомендации о выборе места регистрации колебаний давления газа в камере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кармалита В. А., Фурлетов В. И. ФГВ, 1987, 23, 6.
2. Белый В. В., Рябцев А. П., Соловьев В. В. и др. ФГВ, 1985, 21, 1, 64.
3. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику.— М.: Наука, 1966.
4. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника.— М.: Сов. радио, 1966.
5. Диментберг М. Ф. Нелинейные стохастические задачи механических колебаний.— М.: Наука, 1980.

Поступила в редакцию 2/VI 1986,
после доработки — 27/XI 1986

О РАДИАЦИОННОЙ ТЕПЛОТДАЧЕ С ГОРЯЩЕЙ УГЛЕРОДНОЙ ЧАСТИЦЫ

А. В. Горбатов, Е. В. Самуйлов
(Москва)

Исследование горения угольных газовзвесей представляет значительный интерес в связи с проектированием и созданием топков парогенераторов [1] и высокотемпературных камер сгорания [2, 3], использующих в качестве горючего уголь. При изучении распространения интенсивного оптического излучения в воздухе, запыленном углеродными частицами, приходится изучать процесс горения угольного аэрозоля в мощном электромагнитном поле [4]. Для ответа на ряд возникающих при этом вопросов необходимо знать динамику горения частицы угля, которая определяется условиями тепло- и массообмена. Тепловой баланс частицы зависит от скорости горения, теплового эффекта и энергообмена с внешней средой. При этом вклад радиационных потерь энергии в теплообмен может быть заметным. В настоящей работе обсуждается вопрос о корректном расчете мощности, теряемой горячей частицей на излучение.

Обычно лучистая мощность P , диссипируемая в окружающее пространство отдельной горячей сферической частицей, вычисляется по формуле [1—4]

$$P(T) = 4\pi R^2 \epsilon(T) \sigma T^4. \quad (1)$$

Здесь R — радиус; T — температура поверхности частицы; σ — постоянная Стефана — Больцмана; $\epsilon(T)$ — полусферическая интегральная степень черноты поверхности вещества, из которого состоит частица. Значения $\epsilon(T)$ содержатся, например, в [5], где приведены результаты экспериментов с плоскими непрозрачными телами. Известно также другое соотношение [6]:

$$P = 4\pi^2 R^2 \int_0^\infty Q(x; m) B_\nu(T) d\nu, \quad (2)$$

где $B_\nu(T) = 2h\nu^3 c^{-2} [\exp(\hbar\nu/kT) - 1]^{-1}$ — спектральная интенсивность