

Используя это выражение, получим условие генерации волновой энергии в сопле

$$\cos \psi_T < -\frac{\kappa M^2}{4} B - \frac{1}{\kappa} \frac{1}{B},$$

где $B = (|T'|/T)/(|p'|/p)$ — величина, показывающая во сколько раз относительная амплитуда возмущений температуры больше относительной амплитуды возмущений давления.

Условие уменьшения потока волновой энергии к соплу будет определяться неравенством

$$\cos \psi_T < -\kappa M^2/4 \cdot B.$$

Решение этих неравенств можно представить в графическом виде. Внешне они будут выглядеть так же, как и решения неравенств (21) и (22), представленные на рис. 6.

Таким образом, в работе предложен метод численного решения задачи о распространении акустических продольных колебаний газа в камере сгорания. Он позволяет определять собственные частоты и показатели устойчивости колебаний, а также распределения амплитуд колебаний давления, скорости и других параметров по длине камеры. Уточнены условия, при которых взаимодействие между акустическими и энтропийными волнами в коротком сопле приводит к генерации волновой энергии. Оценки частоты по приближенной формуле (1) удовлетворительно совпадают с результатами численного решения задачи, за исключением случая продольных колебаний газа первой моды при взаимодействии их с колебаниями энтропии в сопле.

*Поступила в редакцию
10/IV 1979*

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Раушенбах. Вибрационное горение. М., ГИФМЛ, 1961.
2. В. И. Фурлетов. — В сб.: Горение гетерогенных и газовых смесей. Черногловка, ОИХФ АН СССР, 1977.
3. Л. Крокко, Ч. Синь-И. Теория неустойчивости горения в жидкостных ракетных двигателях. М., ИЛ, 1958.
4. Г. Н. Абрамович. Прикладная газовая динамика, М., Наука, 1969.
5. Б. В. Раушенбах, С. А. Белый и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М., Машинное строительство, 1964.
6. В. А. Скляр, В. И. Фурлетов. ПМТФ, 1974, 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ НА ОТКРЫТОМ КОНЦЕ ИМПУЛЬСНОЙ КАМЕРЫ

*А. П. Быковец, В. Б. Репин
(Казань)*

Импульсная камера — это устройство, в котором происходит периодическое накопление и сгорание взрывоопасной смеси [1]. В простейшем случае она представляет собой трубу, закрытую с одного конца, через который подаются горючее и окислитель. В настоящее время такие устройства нашли широкое применение для очистки поверхностей нагрева котлоагрегатов [1], используются для нанесения покрытий [2], ведутся работы по применению их для интенсификации тепло- и массообменных процессов [3].

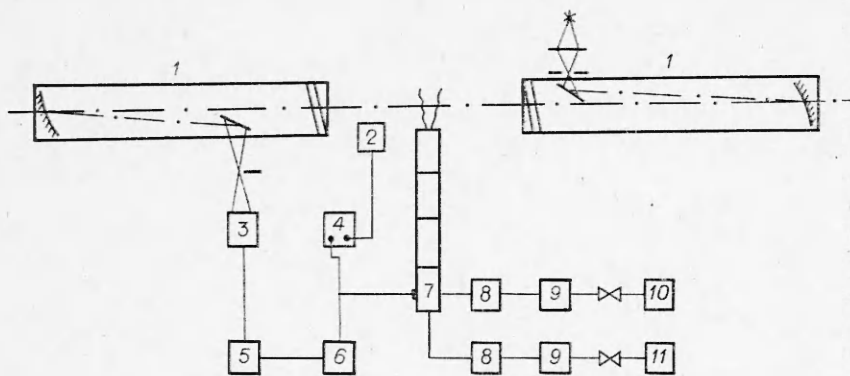


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Для разработки эффективных импульсных камер необходимо знать физические процессы, происходящие у открытого конца камеры, такие как образование ударной волны, струйное истечение, вихреобразование и т. д. Известно, что если в трубе, закрытой с одного конца, осуществить подрыв заряда ВВ или горючей смеси газов, то на открытом конце трубы наряду с ударными волнами формируется кольцевой вихрь, который проходит значительные расстояния не разрушаясь [4]. В распространении вихревых колец условно можно выделить три стадии — формирование, развитие и затухание. Если последняя стадия, которая начинается на расстоянии нескольких калибров от среза трубы, наиболее изучена [5], то этого нельзя сказать о начальных стадиях. В работе [4] отмечается, что до настоящего времени не существует какой-либо схемы расчета, которая позволяла бы по заданным параметрам трубы и весу ВВ определять параметры сформировавшегося турбулентного вихря.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование начальных стадий развития турбулентного вихревого кольца, образующегося на открытом конце импульсной камеры.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Использовалась стальная труба 7 с внутренним диаметром $d = 0,05$ м. Труба секционная, что позволяло изменять ее длину L в пределах от 0,4 до 4,0 м. Горючее (пропан) вводится тангенциально на расстоянии 0,03 м от закрытого конца трубы, а воздух вводится аксиально через закрытый конец. Для развязки трубы с измерителями расходов 9 в линиях подачи газа из баллона 10 и воздуха из воздуходувки 11 установлены ресиверы 8. Горючее и окислитель подавались непрерывно в течение эксперимента. Периодическое зажигание осуществлялось индукционной искрой с помощью блока зажигания 6, электрическая схема и принцип работы которого описаны в [6]. Разрядный промежуток помещался на расстоянии 0,1 м от открытого конца трубы. Частота зажигания выбиралась из условия трехкратной продувки импульсной камеры свежей смесью.

Визуализация процесса вихреобразования осуществлялась прибором ИАБ-451 1, настроенным по методу щели и ножа [7]. Для киносъемки использовалась кинокамера СКС-1М 3. Частота съемки изменялась в пределах 3000—4000 кадр/с. Для синхронизации изготовлена электронная схема 5, регулируемая в пределах 1 с. Методика киносъемки следующая. Запускалась импульсная камера и производилось 15 ÷ 20 выхлопов, после чего включалась схема синхронизации, которая запускала кинокамеру с определенной временной задержкой до следующего выхлопа. Благодаря этому процесс вихреобразования фиксировался на киноплёнке в тот момент, когда скорость протяжки пленки была максимальной.

О движении вихря судили по перемещению его передней границы, величина которого измерялась по киноплёнке компаратором МИР-12 с точ-

ностью до 1%. На основе метода наименьших квадратов полученные результаты в координатах путь — время аппроксимировались полиномом пятой степени, что позволяло в дальнейшем определить скорость движения вихревого кольца. Время сгорания смеси в импульсной камере измерялось фотоумножителем 2 или по кинолентке. В первом случае сигнал с ФЭУ подавался на осциллограф 4, запуск развертки которого осуществлялся синхронно с искрой. Во втором случае в поле ИАБ-451 помещался разрядный промежуток, включенный последовательно с основным. В результате на кинокадрах получалась метка, фиксирующая момент проскока искры.

Опишем основные процессы, происходящие при горении газозвушной смеси в импульсной камере. При проскоке искры у закрытого конца трубы происходит зажигание смеси, которая при сгорании расширяется и вытекает через открытый конец в окружающее пространство. При этом на срезе импульсной камеры образуется вихревое кольцо. По мере продвижения фронта горения по трубе происходит увеличение давления, сопровождающееся повышением скорости истечения смеси из трубы. В момент появления фронта горения на открытом конце импульсной камеры рост давления и скорости истечения прекращается. При этом смесь, вытолкнутая из трубы, догорает, образуя характерный сноп пламени. После прекращения горения происходит переходный процесс, приводящий к выравниванию давления в камере до значения в окружающем пространстве.

Несомненно, что характер изменения давления в импульсной камере во времени и его абсолютная величина, а следовательно, и скорость истечения продуктов сгорания будут определяться динамикой процесса горения, т. е. скоростью движения пламени v_n . Поэтому определена зависимость скорости движения пламени от некоторых режимных факторов: от длины импульсной камеры L , концентрация смеси C , скорости заполнения камеры свежей смесью v_3 . Полученные зависимости приведены на рис. 2. Концентрация менялась в пределах 3,5 ÷ 6,5%, скорость заполнения — 0 ÷ 0,75 м/с.

Отметим, что скорость движения пламени — средняя скорость движения пламени по трубе, которая определяется как $v_n = L/\tau_{сг}$, где $\tau_{сг}$ — время сгорания. Большой разброс значений v_n обусловлен недостаточной стабильностью работы импульсной камеры, что является характерной чертой систем, в которых осуществляется ускоренное движение пламени.

Из рис. 2 следует, что скорость движения пламени растет по мере увеличения длины импульсной камеры. Однако для больших длин она достигает некоторого предела. Характер такой зависимости можно объяс-

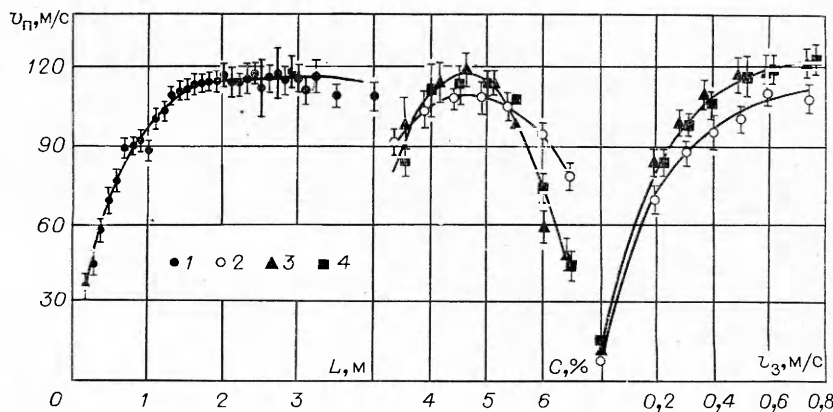


Рис. 2. Зависимость скорости пламени от режимных параметров.
1 — $C=4\%$, $v_3=0,5$ м/с; 2 — $L=1,2$ м; 3 — $L=2,2$ м; 4 — $L=3,0$ м.

нить следующим образом. Согласно [8] скорость распространения фронта турбулентного пламени пропорциональна величине скорости турбулентных пульсаций. При этом ускорение фронта пламени происходит до тех пор, пока выполняется условие

$$l/\lambda > v'/u_n,$$

где l — масштаб турбулентности; λ — ширина зоны нормального горения; v' — скорость турбулентных пульсаций в потоке; u_n — нормальная скорость распространения пламени. При нарушении этого условия (например, при росте v') некоторая часть поверхности фронта пламени «выключается» из процесса воспламенения несгоревшего газа, что приводит к стабилизации скорости распространения фронта пламени или даже к его замедлению. Следовательно, для длинных импульсных камер скорость движения пламени не зависит от L , а будет определяться составом смеси. Причем, как это видно из рис. 2, зависимость v_n от C аналогична зависимости нормальной скорости распространения пламени от концентрации, с той лишь разницей, что максимум скорости несколько смещен в область обогащения смеси (см. [9] с. 144, рис. 80). Скорость движения пламени в импульсной камере зависит и от скорости заполнения камеры свежей смесью. Если смесь неподвижна, то значение v_n мало отличается от нормальной скорости распространения пламени для пропано-воздушной смеси. С ростом скорости заполнения происходит резкое увеличение скорости движения пламени, так как при этом происходит увеличение степени турбулентности потока, что обуславливает более эффективное турбулентное смешение и перенос активных радикалов из зоны реакции в свежую смесь.

Перейдем к описанию образования вихревых колец на срезе импульсной камеры. На рис. 3 приведены кинокадры теневой картины процесса вихреобразования. Следует отметить, что эти снимки не передают подробно процесс вихреобразования, но дают представление о последовательности фаз процесса. Фотографии рис. 3, а получены для импульсной камеры с $L = 0,9$ м и $d = 0,05$ м. Через 45 мс после проскока искры на срезе камеры появляются первые признаки зарождения вихревого кольца, которое расширяется и принимает сферическую форму (6,15 мс). Размер его непрерывно увеличивается. Через 6,4 мс, когда отношение поперечного размера вихревого кольца к продольному составляет 1 : 2, кольцо отрывается от среза трубы и движется, сохраняя свою форму. После того как вихревое кольцо пройдет расстояние порядка четырех калибров, из трубы появляется пламя (9 мс). В последующем кольцо уходит из поля зрения.

Вихревое кольцо образуется из свежей смеси, поэтому если пламя догоняет сформировавшееся вихревое кольцо, то оно загорается и, вследствие расширения при горении, происходит его разрушение. Однако если смесь богатая, то на срезе импульсной камеры все время присутствует факел и при формировании вихревого кольца происходит его зажигание в начальные моменты образования. При этом вихревое кольцо хотя и горит, но оно проходит значительные расстояния не разрушаясь. Таким образом, вихревое кольцо является устойчивым к процессу горения, если процесс его формирования сопровождается горением.

На рис. 3, б представлены характерные стадии процесса разрушения вихревого кольца для импульсной камеры с $L = 0,6$ м и $d = 0,05$ м. В данном случае начальные стадии развития вихревого кольца аналогичны, поэтому они опущены. На первом кадре вихревое кольцо оторвалось от среза импульсной камеры. Отчетливо видна его задняя граница и спиральная структура самого кольца. Затем появляется пламя (7,3 мс), которое догоняет вихревое кольцо (7,64 мс) и зажигает его. Кольцо разрушается после 10,75 мс.

Замечено, что в зависимости от режима горения образуется одно или несколько вихревых колец. Если время сгорания сравнимо с акустиче-

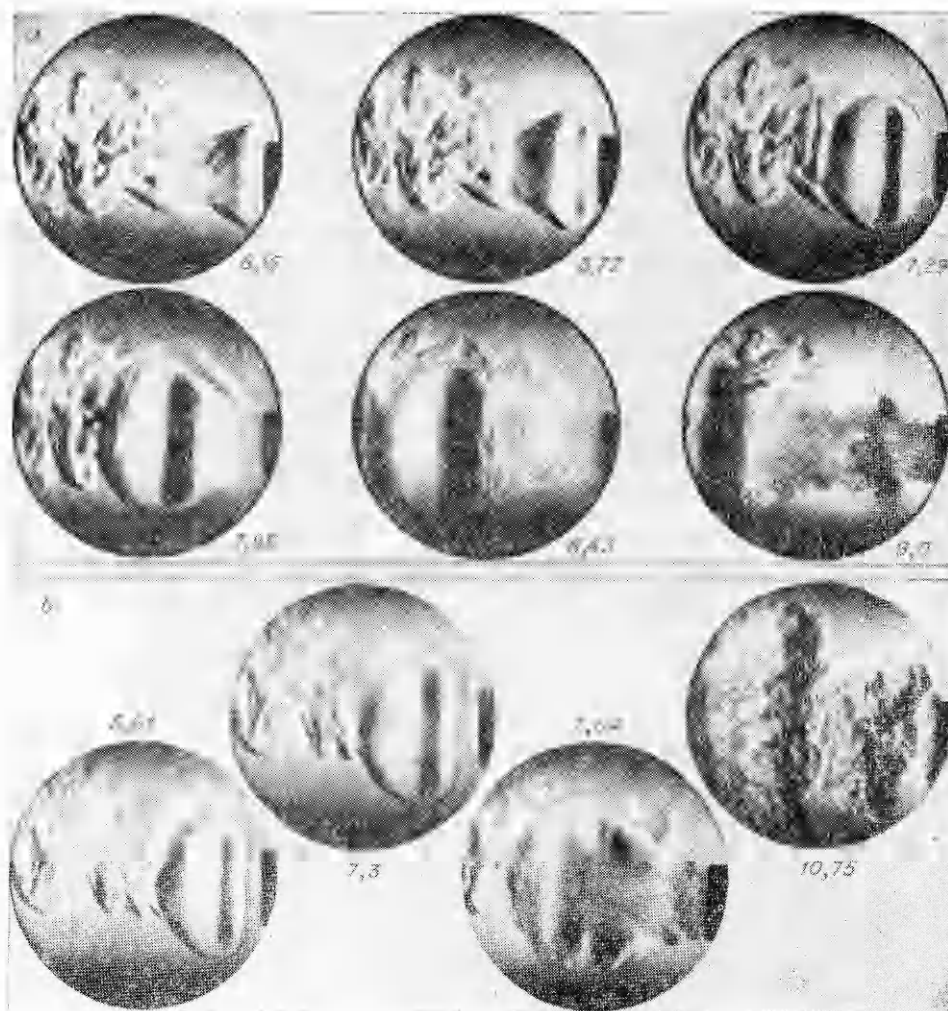


Рис. 3. Кинокадры теневой картины процесса вихреобразования (цифры у кадров — время в мс).

ским временем τ_a , определяемым как время, необходимое для распространения импульса сжатия по трубе, образуется одно вихревое кольцо. Такой режим назовем жестким. Осциллограмма давления в камере — это плавно нарастающая кривая, причем максимум давления во времени совпадает с моментом появления пламени на открытом конце трубы. При $\tau_{cr} \gg \tau_a$ характер изменения давления во времени становится немонотонным, на фоне общего нарастания появляются осцилляции с частотой, равной акустической частоте канала. В этом случае образуется несколько вихревых колец, причем их количество определяется как $n = \tau_{cr}/\tau_a$ или на единицу меньше. Такой режим горения назовем мягким.

Исследование динамических характеристик вихревого движения проводилось для жесткого режима горения, причем исследовались стадии движения вихревого кольца до момента его разрушения пламенем. Основное внимание уделялось начальным стадиям образования и развития кольца (расстояния порядка четырех калибров от среза импульсной камеры).

На рис. 4 представлена зависимость скорости движения вихревого кольца (v_v) от проходимого им пути (S) для камеры с $L = 1,45$ м и $d = 0,05$ м. Видно, что скорость движения вихревого кольца увеличивается

по мере удаления от среза импульсной камеры. Однако в [4, 5] теоретически и экспериментально показано, что скорость движения вихревого кольца уменьшается по мере увеличения пройденного пути по закону $v_v \sim S^{-3}$. Данное отличие обусловлено рядом обстоятельств. Во-первых, все полученные теоретические результаты, а также подавляющее число экспериментальных исследований проведено для области автомодельного движения вихревого кольца, которая начинается на расстоянии порядка 4—5 калибров [4]. Во-вторых, в работах [10, 11] скорость истечения меняется от нуля до конечной величины, а в [12] она изменяется линейно, но также от нуля. В импульсной камере начальная скорость истечения не равна нулю, т. е. завихренность в потоке с самого начала отлична от нуля, причем характер изменения скорости истечения во времени более сложный, так как он определяется газодинамическими и тепловыми процессами, происходящими при горении. В свою очередь, свойства горения, а следовательно, и динамические свойства вихревых колец будут определяться геометрическими (L, d) и динамическими (v_3 , способ ввода смеси, состав смеси) характеристиками импульсной камеры. Однако, как следует из рис. 2, основное влияние на динамические характеристики вихревого движения при жестком режиме горения оказывает длина импульсной камеры, ибо при изменении состава смеси жесткий режим горения наблюдается лишь в узкой области, а при увеличении скорости заполнения, начиная с некоторой ее величины, скорость пламени не меняется.

На рис. 5 приведена зависимость скорости движения вихревого кольца от длины импульсной камеры для различных расстояний от ее открытого конца. По мере увеличения длины импульсной камеры скорость движения вихревого кольца растет, что особенно выражено для коротких труб. В том случае, если длина трубы составляет 1,5 м и более, скорость движения вихревого кольца не изменяется. Характер такой закономерности следует из того факта, что скорость пламени, определяющая динамические свойства вихревого кольца, начиная с $L = 1,5$ м и выше, существенно не изменяется (см. рис. 2).

Приведенные выше данные лишь раз подтверждают, что на динамические свойства движения вихревого кольца непосредственное влияние оказывает скорость пламени. Поэтому скорость движения пламени можно принять за масштаб скорости движения вихревого кольца. Исходя из этого, получена эмпирическая зависимость

$$v_v/v_n = 0,43(S/d)^{0,77},$$

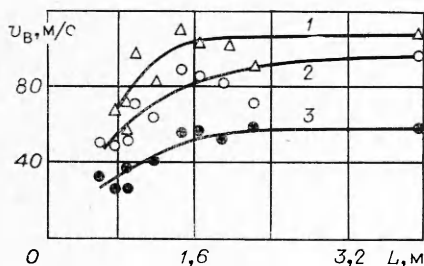


Рис. 5. Зависимость скорости движения вихря от длины камеры.
 $S, \text{ м: } 1 - 1,5 \cdot 10^{-2}, 2 - 10^{-2}, 3 - 5 \cdot 10^{-2}$.

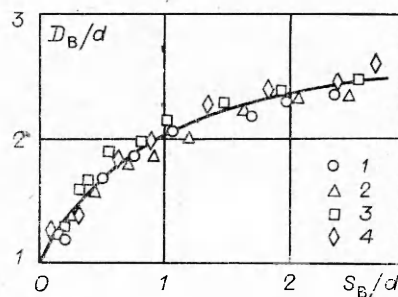


Рис. 6. Зависимость диаметра вихревого кольца от пройденного им пути.
 $L, \text{ м: } 1 - 0,6, 2 - 0,97, 3 - 1,17, 4 - 1,87$.

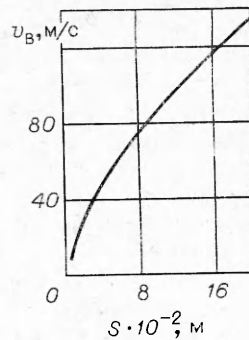


Рис. 4. Зависимость скорости движения вихря от расстояния.

обобщающая экспериментальные данные в диапазоне величин $L = 0,6—4,0$ м, $C = 3,5—6,5\%$ с точностью до 20%. Такой разброс обусловлен тем, что в качестве характерного масштаба скорости движения вихря принята средняя по длине импульсной камеры скорость движения пламени, в то время как характер зависимости должен быть подобен изменению локальной скорости движения пламени в процессе его движения по трубе.

Диаметр вихревого кольца определяется характеристиками процесса горения и зависит только от диаметра импульсной камеры. Экспериментально получена нелинейная зависимость диаметра вихревого кольца от пройденного пути для различных длин импульсной камеры (рис. 6).

Как отмечалось выше, в случае если пламя догоняет сформировавшееся вихревое кольцо, то оно разрушается. Однако существует критическое расстояние $S_{кр}$ от среза импульсной камеры, дальше которого пламя не распространяется. Величина этого расстояния будет определяться геометрическими и динамическими параметрами установки. С другой стороны, как следует из рис. 3, между моментом начала движения вихревого кольца и появлением пламени на открытом конце импульсной камеры существует определенная задержка во времени (Δt), величина которой увеличивается с ростом длины камеры. Следовательно, если за время Δt вихревое кольцо пройдет расстояние больше $S_{кр}$, то его структура не нарушается за счет процесса горения.

Поступила в редакцию
14/II 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. М. Щелоков, Э. М. Телегин и др. Методы наружной очистки котлов-утилизаторов. Казань, Изд-во КГУ, 1974.
2. Ю. А. Харламов, М. Х. Шоршоров и др. ФГВ, 1975, 11, 1, 88.
3. В. Б. Ребин, Ю. И. Панарин, А. П. Быковец.— В сб.: Сжигание топлив с минимальными вредными выбросами. Таллин, 1978.
4. М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М., Наука, 1973.
5. Б. А. Луговцов.— В сб.: Некоторые проблемы математики и механики. Л., Наука, 1970.
6. А. П. Быковец, Д. А. Ильин, Я. М. Щелоков.— В сб.: Вибрационное горение. Казань, Изд-во КГУ, 1977.
7. Л. А. Васильев. Теневые методы. М., Наука, 1968.
8. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
9. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М., Изд-во МГУ, 1957.
10. F. K. Elder, Jr., N. de Haas. J. Appl. Phys., 1952, 23, 10, 1065.
11. W. Pauman, W. G. F. Shepherd. Proceedings of the Royal Society. 1946, 186, 293.
12. C. Liess, N. Didden. ZAMM, 1976, 56, 206.

ИНИЦИИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ $N_2O + H_2$ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО HF-ЛАЗЕРА

Г. К. Васильев, Е. Ф. Макаров, Ю. А. Чернышев, В. Г. Якушев
(Черноголовка)

Исследование воздействия лазерного ИК-излучения на молекулярные системы привлекает внимание в связи с изучением возможностей стимулирования химических реакций и управления ими. В [1—4] исследован ряд реакций при воздействии излучения непрерывного CO_2 -лазера. В условиях [1—4] параметр, характеризующий меру «отрыва» колебательной