

СВС, не оказывающих существенного влияния на работу спектрометра.

Таким образом, приведенные данные, являясь первыми при изучении СВС методом ЭПР в органических системах, указывают на возможность определить роль радикальных частиц в твердофазных реакциях, установить парамагнитные характеристики СВС-продуктов, а также могут оказаться полезными при решении одной из основных задач теории горения — нахождении связи между макропараметрами процесса ( $T_{\max}$ ,  $T_z$  и др.) и происходящими при этом элементарными химическими актами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Физическая химия. Современные проблемы.— М.: Химия, 1990.— С. 8—44.
2. Третьяков В. Д. Твердофазные реакции.— М.: Химия, 1978.— С. 167.
3. Похил П. Ф., Мальцев В. М., Зайцев В. М. Методы исследования процесса горения и детонации.— М.: Наука, 1969.
4. Климчук Е. Г., Аветисян Г. М., Мержанов А. Г. Закономерности самораспространяющихся процессов твердофазного синтеза малоната пиперазина // Докл. АН СССР.— 1990.— 311, № 5.— С. 1161.
5. Климчук Е. Г., Аветисян Г. М., Мержанов А. Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез органических соединений // ЖПХ.— 1990.— 63, № 6.
6. Климчук Е. Г., Мержанов А. Г. Особенности взаимодействия малоновой кислоты с пиперазином в режиме горения // ФГВ.— 1990.— 26, № 6.
7. Бучаченко А. Л., Вассерман А. М. Стабильные радикалы.— М.: Химия, 1973.

г. Ереван

Поступила в редакцию 5/X 1990

УДК 533.6.011 + 536.14

*А. С. Борейшо, В. Ф. Лебедев, В. А. Левин, С. Ю. Мигичкин,  
Д. В. Степанов, А. Н. Хмелевский, Р. М. Юсупов*

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕРСНЫХ СВОЙСТВ ПОТОКА ЗА БЛОКОМ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОПЕЛ В УСЛОВИЯХ ГОМОГЕННОГО ГДЛ

Приводятся результаты расчетно-экспериментального исследования инверсных характеристик потока за сопловым блоком мелкомасштабных осесимметричных сопел в условиях гомогенного ГДЛ на  $\text{CO}_2$ . В результате сгорания ацетиленовоздушных смесей разного состава получали рабочую газовую смесь. Параметры торможения варьировались в широких пределах. Анализировалось влияние выбора геометрии сопел и их компоновки на параметры активной среды. Измеренные значения коэффициента усиления в потоке за блоком осесимметричных сопел не уступают полученным ранее с использованием сопловых блоков плоской геометрии.

Для обеспечения большого расхода газа в газодинамических лазерах (ГДЛ) сопла компонуются в сопловые блоки (СБ). Поиск оптимальной формы сопел, их компоновки и условий течения за срезом соплового блока, обеспечивающих быстрое смешение сверхзвуковых струй и высокое оптическое качество потока в зоне высокой инверсии, привели к использованию малоразмерных осесимметричных сопел [1, 2]. По-видимому, они наиболее подходящи [3] и с точки зрения их использования при высоких параметрах и больших тепловых потоках в стенке сопла. Наиболее теплонпряженные участки соплового аппарата любой конструкции — область входа в сопло и критическое сечение. В отличие от осесимметричных сопел сопловые лопатки плоской геометрии нуждаются в охлаждении не только дозвуковой части, но и области критических сечений.

Теплоотвод в критических сечениях блоков осесимметричных сопел (БОС) осуществляется за счет теплопроводности стенок. Кроме того, вызванные нестационарным и неоднородным характером давления вибрации сопловых лопаток, а также их тепловое расширение могут существенно изменять высоту критических сечений [5] и тем самым

Т а б л и ц а 1

Состав	Вид сопла	Метод нагрева	$p_0$ , атм	$T_0$ , К	$d_*$ , мм	$A_e/A_*$	$d_e$ , мм	$L$ , мм	$\varphi$ , град	Литература
83,5 % $N_2$ + 15 % $CO_2$ + 1,5 % $H_2O$	П	КС	10	1400	0,6	—	10	28	—	[7]
89 % $N_2$ + 10 % $CO_2$ + 1 % $H_2O$	К	УТ	50	1300—1750	0,4	76,6	3,5	7,7	11,4	[1,2]
50 % $N_2$ + 40 % He + 10 % $CO_2$	К	ЭВ	20—40	2500	0,8	60	—	—	—	[8]

## БПОС-1

	П	КС	9,5—65	2410—1730	0,8	39	5,0	7,7	8	Настоящая работа
--	---	----	--------	-----------	-----	----	-----	-----	---	------------------

## БПОС-2

Продукты сгорания ацетилена в воздухе (6,54 и 4 % $C_2H_2$ )	П	КС	9,5—65	2410—1730	1,1	36	6,6	6,5	10	
--	---	----	--------	-----------	-----	----	-----	-----	----	--

## БПОС-3

	П	КС	9,5—65	2410—1730	0,6	64	4,8	8,4	6	
--	---	----	--------	-----------	-----	----	-----	-----	---	--

## БКС

	К	КС	9,5—65	241—17330	0,6	64	4,8	8,4	14	
--	---	----	--------	-----------	-----	----	-----	-----	----	--

П р и м е ч а н и е.  $p_0$ ,  $T_0$  — давление и температура торможения;  $d_*$ ,  $d_e$  — диаметры критического и выходного сечений сопла;  $A_e/A_*$  — степень расширения сопла;  $L$  — длина сверхзвуковой части сопла;  $\varphi$  — угол наклона касательной к профилю на срезе сопла; П — профилированное, К — коническое, КС — камера сгорания, УТ — ударная труба, ЭВ — электровзрыв, W — удельный энергосъем,  $K_V$  — коэффициент усиления, БПОС(БКС) — блок профилированных (конических) осесимметричных сопел.

сильно исказить поток за срезом [6]. При продолжительной работе плоских лопаток наблюдается повышение температуры хвостовых частей, что способствует их преждевременному разрушению [4, 5]. В сравнении с блоками плоских сопел БОС более просты и дешевы в изготовлении. Неизбежный недостаток БОС состоит в наличии донных областей в сечении среза сопел, что приводит к дополнительным потерям полного давления. Исследование профилированных осесимметричных сопел показало [1], что по коэффициенту восстановления давления в перемешанном потоке за срезом соплового блока они уступают как коническим, так и плоским профилированным.

Имеющаяся в литературе информация об экспериментальном исследовании инверсных свойств потока за блоком малоразмерных осесимметричных сопел в гомогенных ГДЛ крайне ограничена (табл. 1). Следует отметить, что только в работах [1, 2] измерялся коэффициент усиления и указано на перспективность его применения в сопловых блоках гомогенных ГДЛ. В [7, 8] определялся энергосъем, причем в [7] использовалось неоптимальное профилированное осесимметричное сопло, а в [8] — коническое. Приведенных в табл. 1 экспериментальных данных явно недостаточно как для анализа адекватности построенных математических моделей [1, 9—11], так и для прогнозирования эффективности использования таких сопловых блоков в реальных многокомпонентных лазерных смесях гомогенных ГДЛ, использующих продукты сгорания различных топлив.

В работе [9] предложено применять усеченные осесимметричные профилированные сопла для компоновки соплового блока. При этом усеченное сопло получалось из профилированного на большую степень расширения путем обрезания контура в сечении с конечным углом наклона образующей к оси сопла  $\varphi$ . Предполагалось, что использование профилирования позволит более эффективно заморозить поток, а выбор небольшого значения  $\varphi$  не приведет к существенному ухудшению его оптического качества.

Цель настоящей работы — получение экспериментальных данных об инверсных свойствах активной среды за блоками осесимметричных усеченных профилированных и конических сопел в широком диапазоне параметров торможения. Изучались блоки с различными профилями, степенями расширения, диаметрами критических сечений, а также способы компоновки индивидуальных моносопел в блок. Геометрические характеристики сопел и диапазон параметров торможения указаны в табл. 1. С целью прогнозирования инверсных свойств потока и их сопоставления проводились численные расчеты.

Численно гомогенный  $\text{CO}_2$ -ГДЛ исследовался с использованием одномерной модели [9]. Кинетические уравнения выбирались на основе работы [12]. Сопловой блок предполагался собранным из набора идентичных моносопел. Параметры течения в выходном сечении моносопел корректировались аналогично [1] для учета пограничного слоя и скачка уплотнения, возникающего при взаимодействии потоков газа, истекающих из соседних моносопел. Вязкость течения учитывалась в приближении ламинарного пограничного слоя в двумерной постановке;  $T_w/T_0 = 0,15$  ( $T_w$  — температура стенки сопла). Рассматривались три вида моносопел: коническое, осесимметричное профилированное и плоское профилированное. Для блока конических сопел скачок уплотнения учитывался аналогично [1]. Для профилированных сопел потери на ударное взаимодействие будут существенно ниже в связи с меньшим углом наклона образующей контура на срезе и в расчетах не учитывались. Предполагалось, что течение газа до критического сечения равновесное, а состав соответствует продуктам сгорания смеси 6,5 %  $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{воздух}$  [13]. Расчеты проводились для  $T_0 = 2400$  К. Различные виды моносопел сопоставляли при одинаковых степенях расширения ( $A_e/A_* = 64$  п размерах критического сечения ( $d_* = h_* = 0,6 \cdot 10^{-3}$  м).

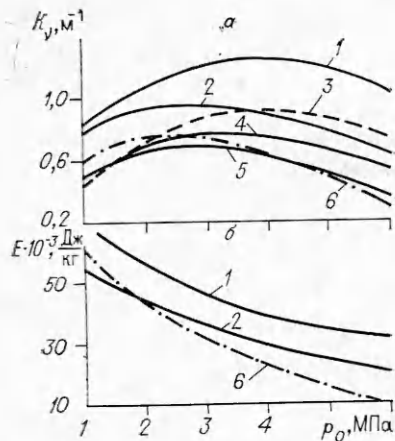


Рис. 1. Зависимости  $K_v(p_0)$  и  $E(p_0)$ .  
1, 3 — БПОС-3; 2, 4, 5 — БКС; 6 —  
плоское сопло.

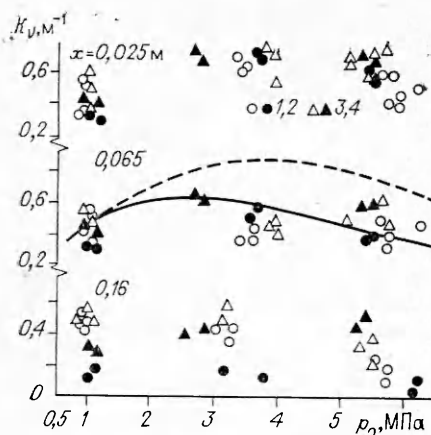


Рис. 2. Сравнение  $K_v$  в потоке за  
БПОС-3 (2, 4) и БКС (1, 3).  
1, 2 — 6,54 %  $C_2H_2$  + воздух; 3, 4 — 4 %  
 $C_2H_2$  + воздух.

Профиль сопел выбирался из таблиц профилей с равномерным выходом [14], рассчитанных методом характеристик для постоянного показателя адиабаты ( $\gamma = 1,4$  и  $1,35$  для осесимметричного и плоского). Для учета толщины вытеснения пограничного слоя контур плоского сопла корректировался по методике [14]. Коническое сопло имело одинаковые с профилированным диаметр выходного и критического сечений, длину сверхзвуковой части и степень расширения. При этом угол между образующей контура сопла и осью составил  $\sim 14^\circ$  (см. табл. 1).

Результаты расчетов приведены на рис. 1, где представлено изменение коэффициента усиления  $K_v$  и запасенной в потоке колебательной энергии  $E$  в зависимости от давления торможения рабочей смеси на расстоянии  $0,065$  м от среза, где, как показали газодинамические исследования настоящей работы, течение за блоком осесимметричных сопел практически однородное. Без учета потерь вследствие вязкости и ударно-волнового взаимодействия (см. кривые 1, 2 на рис. 1, а) при  $p_0 = 1 \div 2$  МПа коэффициент усиления ведет себя одинаково для осесимметричного профилированного и для конического сопел. Однако при дальнейшем росте  $p_0$  значения  $K_v$  для профилированного сопла на  $\sim 20\%$  больше. Для плоского сопла в этом случае  $K_v = 60\%$  от уровня профилированного осесимметричного сопла, а максимум  $K_v$  достигается при примерно вдвое меньшем  $p_0$ . Учет вязких потерь в соплах приводит к падению  $K_v$  во всем диапазоне изменения  $p_0$  (линии 3, 4, 6 на рис. 1, а), однако при низких давлениях его снижение более существенно. Уровень максимальных величин  $K_v$  снижается на 30, 25 и 10% соответственно для осесимметричного профилированного, конического и плоского профилированного сопел. Одновременный учет вязкости и ударно-волнового взаимодействия (разворота потоков за срезом моносопел) приводит к дополнительному снижению  $K_v$  (кривая 5 на рис. 1, а), но, как указывалось выше, для профилированных сопел (осесимметричного и плоского) это падение должно быть существенно ниже.

Сравнение различных сопловых блоков по величине запасенной в потоке колебательной энергии показывает (рис. 1, б), что более высокий уровень  $E$  достигается для осесимметричных профилированных сопел. Значения  $E$  для БКС при  $p_0 > 2$  МПа превышают соответствующие для плоских сопел. Оценки показывают, что при одинаковых габаритах рассматриваемых блоков суммарная площадь критических сечений для БКС менее чем на 10% превышает аналогичную для блоков с осесимметричными соплами и, следовательно, можно ожидать и большей мощности излучения снимаемой с активной среды, сформированной БОС.

Таким образом, одномерный анализ показывает определенное преимущество применения блоков осесимметричных сопел в рассматриваемом гомогенном  $\text{CO}_2$ -ГДЛ с точки зрения параметров получаемой активной среды.

Измерение статического и полного (за прямым скачком) давлений в потоке за БПОС-2 и БПОС-3 при продувках воздухом предшествовало измерениям усиления и позволило сделать вывод о достаточно быстрой скорости выравнивания давления в потоке (на расстояниях порядка 10 калибров выходного сечения сопла) и, соответственно, о возможности применения одномерных моделей течения для анализа активной среды. Однако если в потоке за БПОС-2 удалось реализовать число Маха  $M$ , соответствующее геометрической степени расширения, то в БПОС-3 расчетные значения  $M$  не достигались, хотя и были несколько выше, чем в БПОС-2.

Исследование коэффициента усиления на длине волны  $\lambda = 10,6$  мкм в потоке за срезом сопел проводилось на импульсном аэродинамическом стенде взрывного типа, рассчитанном на предельные параметры  $T_0 = 3000$  К,  $p_0 = 200$  атм [13]. В качестве топлива для образования рабочей смеси газов использовались смеси ацетилена с воздухом. Применение топливных комбинаций на основе ацетилена для создания активной среды ГДЛ позволяет получить продукты сгорания в широком диапазоне параметров торможения и соотношений различных компонентов смеси. Рабочий состав содержит  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и другие компоненты, которые получаются в результате сгорания 4 и 6,54%-ных смесей ацетилена с воздухом [13]. Датчики давления, установленные во взрывной камере и на входе в сопловой блок, контролировали процесс сгорания смеси в реакторе и фиксировали давление торможения. Температура торможения соответствовала выбираемой начальной концентрации ацетилена в смеси и определялась по результатам многочисленных измерений, результаты которых обобщены в [15]. Продукты сгорания истекали в прямоугольный канал размером  $0,035 \times 0,085$  м со шлифованными стенками длиной 0,2 м. Измерения  $K_v$  проводили в трех сечениях от среза сопел вниз по потоку:  $x = 0,025$ ,  $0,065$  и  $0,16$  м. Зондирующие лучи были направлены вдоль осп симметрии соплового блока, параллельной большей стороне канала.

На рис. 2 сопоставляются  $K_v$  для БПОС-3 и БКС, имеющих одинаковую компоновку и значения  $A_e/A_*$ ,  $d_*$ . Видно, что профилирование сопла не привело к увеличению  $K_v$  для БПОС-3, как это предсказывалось расчетами настоящей работы и [11]. Для состава с 4 %  $\text{C}_2\text{H}_2$  в исходной смеси значения  $K_v$  для сравниваемых сопловых блоков близки, а для состава с 6,54 %  $\text{C}_2\text{H}_2$  при  $x = 0,16$  м  $K_v$  для БПОС-3 даже несколько меньше. Отсутствие заметного отличия в данном случае объясняется отклонениями профилей индивидуальных сопел от оптимальных. Такие отклонения могут быть вызваны как упрощенностью профилирования ( $\gamma = \text{const}$ , отсутствие корректировки профиля на толщину вытеснения пограничного слоя), так и отклонениями при их изготовлении. На неоптимальность изготовленных моносопел в БПОС-3 указывают и данные газодинамических исследований: измеренные в потоке за срезом БПОС-3 числа Маха оказались ниже ожидаемых. Подобные результаты получены и в трехмерных расчетах [10], где исследуемое сопло также профилировалось при условии  $\gamma = \text{const}$  и без учета пограничного слоя. Неоптимальностью изготовления профилированных моносопел в БПОС-3 объясняется и отличие экспериментальных точек от расчетов на рис. 2. Вместе с тем в опытах с коническими соплами, качество изготовления которых выше, эксперименты значительно лучше согласуются с расчетом при  $x = 0,065$  м. Обращает на себя внимание падение  $K_v$  вниз по потоку от среза сопловых блоков. Оно более сильное, чем в [1], что, вероятно, вызвано большим количеством  $\text{H}_2\text{O}$ , наличием в потоке различных примесей, неизбежных в продуктах горения, а также тем, что в [1] в отличие от настоящей работы сверх-

звуковой канал за срезом был выполнен с некоторым расширением вдоль по потоку для компенсации влияния пограничного слоя.

Меньшие значения  $K_v$  для состава с большим количеством  $C_2H_2$  в исходной смеси (6,54 %) связаны с менее оптимальным составом рабочей смеси после сгорания для данной степени расширения моносопел.

Профилированные сопла, имея большую, чем конические скорость охлаждения в области критических сечений, дают (несмотря на возможные потери) вблизи среза коэффициент усиления, близкий к значению  $K_v$  для конических сопел. Однако более высокие температуры в потоке за срезом для состава 6,54 %  $C_2H_2$  и потери полного давления в профилированном сопле приводят к заметному снижению  $K_v$  для БПОС-3 в сравнении с БКС для  $x = 0,16$  м (см. рис. 2). Тем не менее, обладая достоинствами, связанными с лучшей однородностью потока, профилированные сопла при оптимальном профилировании и качественном изготовлении, вероятно, могут обеспечить значения  $K_v$  большие, чем в потоке БКС. В настоящей работе не исследовалась инверсия за блоком плоских профилированных моносопел с  $A_e/A_* = 64$ ,  $d_* = 0,6 \cdot 10^{-3}$  м. Однако результаты [13, 16—17] с близкими к используемым в настоящей работе составами или степенями расширения показывают, что достигаемые значения  $K_v$  за БПОС-3 и БКС не уступают полученным ранее с использованием сопловых блоков плоской геометрии.

На рис. 3, 1, 2 видно, что в потоке за БПОС-1 состав, содержащий в исходной смеси 4 %  $C_2H_2$ , как и следовало ожидать, оптимален для сопел с меньшим  $A_e/A_*$ , поскольку содержит меньшее количество воды в конечных продуктах. Увеличение  $A_e/A_*$  с одновременным уменьшением  $d_*$  улучшает эффективность работы при большем содержании паров воды (состав 6,54 %  $C_2H_2$ ) и высоких параметрах торможения (ср. рис. 3, 2 и рис. 2, 2). Влияние компоновки и диаметра критического сечения на инверсию изучалось именно для состава 4 %  $C_2H_2 +$  воздух. Сравнивались величины  $K_v$  в потоке за БПОС-1 и БПОС-2 с одинаковым безразмерным профилем (табл. 2) и  $A_e/A_* = 39$ ,  $d_* = 0,8 \cdot 10^{-3}$  м и  $A_e/A_* = 36$ ,  $d_* = 1,1 \cdot 10^{-3}$  м соответственно. Результаты такого сопоставления показаны на рис. 3, 1 и 4, где заметно снижение  $K_v$  при увеличении  $d_*$  для высоких  $p_0$ , связанное с более медленным охлаждением рабочей смеси в соплах с большим  $d_*$ .

В процессе сборки осесимметричных моносопел в сопловой блок (при условии взаимного касания выходных сечений соседних моносопел) геометрические оси сопел можно располагать в вершинах либо квадратов (квадратная компоновка), либо правильных шестигранников (сотовая или гексагональная компоновка). Трехмерные структуры течения в потоке будут для таких сборок различны. Задача заключалась в экспериментальном исследовании влияния компоновки моносопел в блок на коэффициент усиления в потоке. Моносопла, из которых собирались сопловые блоки разной компоновки, имели  $d_* = 1,1 \cdot 10^{-3}$  м и  $A_e/A_* = 36$  (БПОС-2). Результаты экспериментального исследования коэффициента усиления за срезом сопловых блоков с различной компоновкой в широком диапазоне изменения  $p_0$  приведены на рис. 3. Сопловому блоку квадратной компоновки соответствуют точки 3, сотовой — 4. Можно показать, что для крупномасштабного сотового блока в среднем каждому моносоплу принадлежит примерно в 2,7 раза меньшая донная область, чем такому же моносоплу при квадратной упаковке. Однако суммарная площадь донных областей для обеих компоновок мала в сравнении с общей площадью потока за срезом сопел, чем и объясняется слабое влияние рассмотренных компоновок на  $K_v$  в экспериментах, представленных на рис. 3.

Таким образом, в работе проведено расчетно-экспериментальное исследование газодинамических и инверсных характеристик потока про-

Таблица 2

$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\theta$ , рад
0	1	0,4143
1,553	1,807	0,4802
3,075	2,547	0,4215
5,62	3,549	0,3334
16,29	6,019	0,1514

Примечание. Для сопел с  $d_* = 0,8 \cdot 10^{-3}$  м ( $A_e/A_* = 39$ ) профиль плавно доведен до  $d_e = 5 \cdot 10^{-3}$  м с сечения  $\bar{x} = 16,29$ ,  $\bar{y} = 6,019$ . Общая длина сверхзвуковой части  $7,72 \cdot 10^{-3}$  м. Для сопел с  $d_* = 1,1$  мм ( $A_e/A_* = 36$ ) выходное сечение соответствует координатам  $\bar{x} = 16,29$ ,  $\bar{y} = 6,019$ . Общая длина сверхзвуковой части  $6,52 \cdot 10^{-3}$  м.

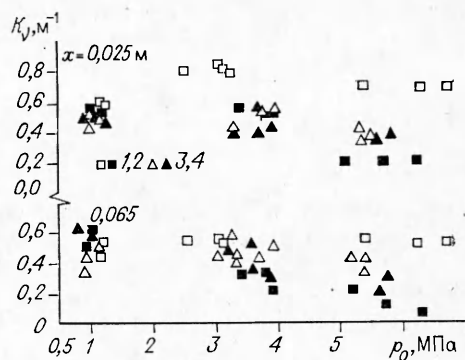


Рис. 3. Влияние компоновки и размера критического сечения.

1, 2 — БПОС-1; 3, 4 — БПОС-2; 1, 3, 4 — 4 %  $C_2H_2$  + воздух; 2 — 6,54 %  $C_2H_2$  + воздух.

дуктов сгорания ацетиленовоздушных смесей, характерных для гомогенного ГДЛ за сопловым блоком мелкомасштабных осесимметричных сопел.

На основе одномерных расчетов выявлены преимущества использования профилированных осесимметричных сопел в сопловых блоках по сравнению с коническими и плоскими для создания активной среды в ГДЛ. Представленные результаты экспериментальных исследований коэффициента усиления за БОС для многокомпонентных составов продуктов сгорания ацетиленовоздушных топлив показали перспективность применения БОС в гомогенных ГДЛ на горении. Измеренные значения  $K_v$  не уступают полученным ранее для сопловых блоков с плоской геометрией сопел.

Экспериментально исследовано влияние выбора геометрии осесимметричных сопел и способа их компоновки в сопловой блок на газодинамические и инверсные характеристики потока. Исследование давлений за блоком профилированных сопел выявило их невысокое качество изготовления, в результате измеренные значения  $K_v$  за блоками профилированных и конических сопел оказались близки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рассел Д., Нейс С., Роуз П. // РТК.— 1975.— 13, № 5.— С. 65—74.
2. Rose P. H. Shock tube and shock wave research: Proc. 11th Int. Symp. on shock tube and wave/Ed. by R. Ahlborn, A. Hertzberg, D. Russel.— Seattle: Univ. Washington Press, 1978.— P. 508—518.
3. Кассади П. Э., Пиндро А. Л., Ньютон Дж. Ф. // РТК.— 1979.— 17, № 8.— С. 59—70.
4. Ачасов О. В., Батманов С. В., Деревякин В. А. и др. Комплексные расчетно-теоретические и экспериментальные исследования активных сред, прогнозирование параметров и разработка элементов конструкций проточных газовых лазеров.— Минск, 1988.— (Препр. АН БССР.— ИТМО; № 2).
5. Арсеньев С. И., Борейшо А. С., Венгерский В. В. и др. // ТВТ.— 1988.— 26, № 5.— С. 985—992.
6. Левин В. А., Митичкин С. Ю., Туник Ю. В. Исследование влияния газодинамических возмущений за деформированным сопловым блоком на инверсию и мощность в условиях  $CO_2$ -ГДЛ на горении // ФГВ.— 1989.— 25, № 6.— С. 81—87.
7. Yatsiv S., Greenfield E., Dothan-Dentsh F. et al. // IEEE J. Quant. Electr.— 1972.— QE-8, N 2.— P. 161—163.
8. Бузоверя В. В., Выскубенко Б. А., Деменюк А. Т. и др. Экспериментальное исследование удельных энергетических характеристик ГДЛ с трехмерной сопловой решеткой: Тез. докл. III Всесоюз. конф. «Оптика лазеров».— Л., 1981.— С. 141.
9. Борейшо А. С., Лебедев В. Ф., Лобачев В. В. и др. // ИФЖ.— 1984.— 57, № 1.— С. 53—59.
10. Golovichev V. I., Sinitsin A. P. Gas flow and chemical lasers: Proc. 5th Int. symp. on gas flow and chemical lasers/Ed. by A. S. Kaye, A. C. Walker.— Oxford, 1984.— P. 463—469.



11. Аникин М. А., Кталхерман М. Г., Мальков В. М. и др. Зависимость параметров потока за сотовым блоком от угла раскрытия индивидуального микросопла // Газодинамика проточной части ГДЛ.— Новосибирск: ИГИМ СО АН СССР, 1987.— С. 65—78.
12. Бирюков А. С. Кинетика физических процессов в газодинамических лазерах // Тр. ФИАН.— 1975.— 83.— С. 13—83.
13. Британ А. Б., Левин В. А., Лосев С. А. и др. // Квант. электроника.— 1981.— 8, № 5.— С. 1002—1011.
14. Верховский В. П. Численный расчет плоских сверхзвуковых сопел с изломом контура. Таблицы координат сопел на числа  $M = 3-7$ : Тр. ЦАГИ.— Вып. 680.— 51 с.
15. Иванов В. Н. Исследование характеристик газодинамического лазера на продуктах горения углеводородно-воздушных смесей: Дис. ... канд. физ.-мат. наук.— М., 1978.— 112 с.
16. Булкин Ю. Н., Выскубенко Б. А., Кириллов Г. А. и др. // Квант. электроника.— 1981.— 8, № 6.— С. 1202—1207.
17. Евтюхин Н. В. Многокомпонентные активные среды газодинамического  $CO_2$ -лазера на продуктах сгорания С, Н, О, N-топлив: Дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Черноголовка, 1980.

г. Москва

Поступила в редакцию 19/VI 1990

УДК 622.235.5

*А. В. Михалюк, Ю. А. Писарев, П. А. Паршук*

### ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГРУНТАХ ПРИ ВЗРЫВАХ ГАЗОКУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ КАМУФЛЕТНОГО ДЕЙСТВИЯ

Приведены результаты изучения особенностей формирования напряженного состояния грунтового массива при взрывах газоккумулятивных зарядов. Показано, что по направлению действия газоккумулятивной струи имеет место увеличение амплитуд и длительности взрывных волн.

В работе [1] показано, что при взрывах трубчатых зарядов в воздухе в их полости формируется ударная волна (УВ), распространяющаяся вдоль осевого канала заряда со скоростью, в 1,65—1,75 раза превышающей скорость детонации. Это позволило предположить, а затем подтвердить экспериментально (при взрывах накладных зарядов такой конструкции [2]), что разрушающее действие трубчатого заряда в направлении оси капала значительно интенсивнее, чем для сплошного заряда той же массы и формы. В [1] обоснован кумулятивный механизм течения газа в канале, поэтому такие заряды предложено называть газоккумулятивными.

Усиление разрушающего действия вдоль оси газоккумулятивного заряда, по-видимому, связано с перераспределением энергии взрыва, излучаемой по различным направлениям, что должно найти отражение на амплитудных и временных параметрах взрывных волн. Ниже изложены результаты экспериментальной проверки этого предположения при взрывах газоккумулятивных зарядов камуфлетного действия в грунтовом массиве, представленном суглинками. Свойства грунтового массива в естественном состоянии, определявшиеся по стандартным методикам с помощью полевой лаборатории И. М. Литвинова (ПЛЛ-9), характеризовались следующими усредненными показателями: плотность минерального вещества 2710 кг/м<sup>3</sup>, плотность 1942 кг/м<sup>3</sup>, плотность скелета 1663 кг/м<sup>3</sup>, влажность массовая 16,80 %, влажность объемная 27,90 %, коэффициент пористости 0,63, пористость общая 38,65 %, пористость свободная 10,75 %.

Размер частиц, мм	Содержание в грунте, %	Размер частиц, мм	Содержание в грунте, %
>2	—0,2	0,05—0,10	—21,1
0,5—2	—1,2	0,01—0,05	—13,9
0,25—0,5	—18,9	0,005—0,01	—16,2
0,10—0,25	—17,7	<0,005	—10,8