

методов осреднения позволило авторам [2, 3] получить согласующиеся с численным счетом результаты только благодаря грубости модели по отношению к зависимости $B(M)$. В самом деле, интервал изменения критерия B , в котором скорость волны горения в одномерной модели практически совпадает со скоростью в двумерной, довольно широк (погрешность расчета B велика), хотя специального исследования этого вопроса не проводилось.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбанин С. С., Соболев С. Л. Докл. АН СССР, 1983, 269, 6, 1394.
2. Александров В. В., Давыденко А. А. и др. ФГВ, 1987, 23, 2, 70.
3. Коваленко Ю. А. ФГВ, 1987, 23, 6, 61.
4. Кутателадзе С. С. Анализ подобия и физические модели.— Новосибирск: Наука, 1986.
5. Вольперт А. И., Худяев С. И. Анализ в классах разрывных функций и уравнения математической физики.— М.: Наука, 1975.

Поступила в редакцию 15/VI 1988,
после доработки — 1/XII 1988

УДК 662.613 + 535 + 339 + 533.601

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЗА ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОПЛОВЫМ БЛОКОМ НА ИНВЕРСИЮ И МОЩНОСТЬ В УСЛОВИЯХ CO₂-ГДЛ НА ГОРЕНИИ

В. А. Левин, С. Ю. Митичкин, Ю. В. Туник, А. Н. Хмелевский
(Москва)

Традиционные направления теоретического изучения гомогенных газодинамических CO₂-лазеров — исследования влияния различного рода добавок, связанных с использованием того или иного вида начального материала для образования лазерно-активной среды, состава смеси, параметров торможения, формы сопла и параметров резонатора, на характеристики ГДЛ [1]. В рамках разработанных математических моделей успешно решаются задачи оптимизации для обособленного сопла CO₂-ГДЛ. Взаимодействие соседних сверхзвуковых потоков становится существенным в химических лазерах на смешении и газодинамических лазерах с селективным возбуждением. В этих случаях процессы теплопроводности и диффузии определяют состав и качество лазерно-активной среды, попадающей в резонатор смесевых лазерных устройств, поэтому соответствующие расчеты необходимо проводить на основе модели вязкого, теплопроводного газа.

В гомогенных системах с сопловыми решетками состав смеси определен. Причиной неоднородности сверхзвукового потока в резонаторе могут служить поперечные смешения сопловых лопаток, изменяющие отношения выходных и минимальных сечений сопел. В результате на срезе соседних сопел формируются потоки, характеризующиеся различными числами Маха M , давлением p , плотностью ρ , что приводит к перестройке структуры течения с образованием ударных волн (УВ) и волн разрежения в потоке за сопловым блоком, а следовательно, — к изменению коэффициента оптического усиления и других параметров лазерно-активной среды. В случае тонких пограничных слоев и вязких следов влияние поперечных деформаций решетки может быть исследовано теоретически в рамках модели невязкого газа. Характер возникающих при этом газодинамических возмущений схематически представлен на рис. 1.

Вопрос о влиянии различных элементов подобных возмущений в 6 Физика горения и взрыва № 6, 1989 г.

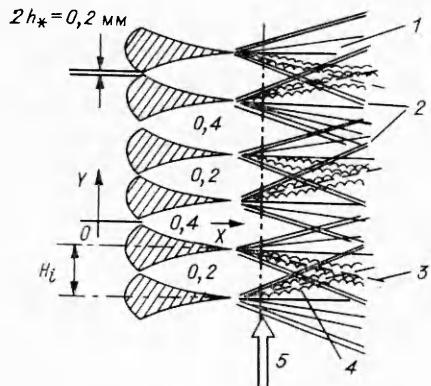


Рис. 1. Схема газодинамических возмущений за деформированной сопловой решеткой.
1 — волна разрежения; 2 — УВ; 3 — контактная поверхность; 4 — след; 5 — положение луча зондирующего лазера.

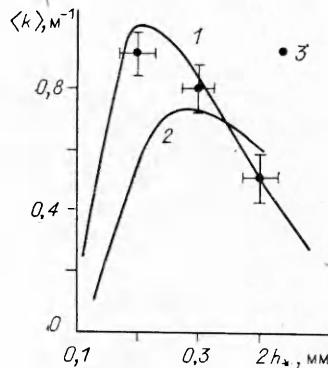


Рис. 2. Зависимость $\langle k \rangle (2h_*)$.
 $p_0 = 4$ (1), 2 МПа (2); 3 — осредненные экспериментальные результаты.

потоке па инверсные свойства среды рассматривался ранее. Так, в [2] проведены оценки, а в [3] представлены экспериментальные результаты по изменению коэффициента усиления при переходе через стационарную прямую УВ и волну разрежения в условиях, характерных для ГДЛ. Эффекты образования УВ в сверхзвуковых соплах ГДЛ, связанные с выбором формы сопел, изучались в [4]. В [5, 6] теоретически исследовался вопрос об изменении усиления в косых скачках слабой интенсивности и в ударном слое при обтекании затупленного тела.

Заметное падение удельного энергосъема зарегистрировано экспериментально в работе [7] при увеличении среднеквадратичного отклонения в размерах критических сечений от номинального, отрицательное влияние УВ па энергосъем в ГДЛ с селективным возбуждением отмечается в [8]. В экспериментальных исследованиях изучается комплексное влияние всех факторов, связанных с образованием газодинамических неоднородностей за деформированной сопловой решеткой, па параметры лазерно-активной среды, в том числе наличие пограничных слоев и вязких следов в потоке.

Сопоставление расчетов для невязкого газа и эксперимента, проводимое в настоящей работе, позволяет разделить эффекты вязкого и силового взаимодействия сверхзвуковых потоков в резонаторной области. Экспериментальные исследования проведены для гомогенного CO₂-ГДЛ па продуктах сгорания ацетилена с блоком плоских сопел. Форма последних определяется семейством кривых $Y = y_w(X) + A$, где параметр A меняется от сопла к соплу, а функция $y_w(X)$ неизменна и задается уравнением эллипса

$$\left(\frac{X - X_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y_w - Y_0}{b}\right)^2 = 1.$$

Рассматривается вариант с параметрами контура: $X_0 = 26$ мм, $a = 28,47$ мм, $Y_0 = -4,231$ мм, $b = 10,63$ мм. Высота минимального сечения $2h_* = 0,3$ мм при $A = 0$, выходное сечение $H_0 = 13,2$ мм, длина сверхзвуковой части сопла $L = 24,5$ мм; состав смеси: $\xi_{CO_2} = 0,1176$, $\xi_{N_2} = 0,7376$, $\xi_{CO} = 0,0324$, $\xi_{H_2O} = 0,062$, $\xi_{O_2} = 0,0313$; температура торможения $T_0 = 2330$ К. Согласно расчетам, указанное значение \dot{n}_* в этих условиях оптимально по коэффициенту усиления k в резонаторной области при давлении торможения $p_0 = p_* = 2$ МПа (рис. 2), т. е. при этом давлении изменение параметра A в ту или другую сторону приводит к уменьшению осредненного по сечению $\langle k \rangle$ за отдельно взятым соплом. При $p_0 \neq p_*$ $2h_* = 0,3$ мм не обеспечивает максимума $\langle k \rangle$. Так, при $p_0 = 4$ МПа максимальное $\langle k \rangle$ достигается, если $2h_* = 0,2$ мм (см. рис. 2). При $p_0 < p_*$ соплу с минимальным сечением $2h_* = 0,3$ мм соответствует

точка слева от максимума на практически прямолинейном участке кривой.

Чтобы явно выделить влияние динамического взаимодействия сверхзвуковых потоков, истекающих в полость резонатора из соседних сопел, полезно сравнить величину осредненного по сечению резонатора коэффициента усиления за деформированной решеткой Σ со средним значением осредненных коэффициентов усиления $\langle k \rangle_i$, за каждым отдельно взятым соплом

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \langle k \rangle_i}{\sum_{i=1}^n H_i}.$$

Здесь n — число рассматриваемых сопел; $H_i = H_0 + 2A_i$ — высота выходного сечения i -го сопла. Если сдвиг $|A_i| \ll H_0$, то $\sigma \approx \frac{\sum_{i=1}^n \langle k \rangle_i}{n}$.

Параметром σ учитывается только то изменение $\langle k \rangle_i$, которое происходит в каждом, отдельно взятом сопле из-за изменения соотношения выходного и минимального сечений. В величине Σ дополнительно проявляется влияние образующихся за деформированной решеткой УВ, волн разрежения, а в экспериментах — и вязких следов.

В качестве первого шага естественно рассмотреть поток за фрагментом деформированной решетки, в которой смещается каждая вторая лопатка, так что уменьшение критического сечения одного сопла приводит к увеличению минимального сечения соседнего па ту же величину. Рассматривались значения $|A| = 0,03$ и $0,05$ мм. Этим сдвигам соответствуют индексы, приписываемые ниже величинам σ и Σ : σ_3 и Σ_3 соответствуют $|A| = 0,03$ мм, а σ_5 и Σ_5 для $|A| = 0,05$ мм; Σ_0 — средний коэффициент усиления за педеформированной решеткой. Ниже Σ_0 , σ_5 , Σ_5 относятся как к расчетным, так и экспериментальным результатам.

Эксперименты проводились на импульсной установке взрывного типа с использованием соплового блока, состоящего из 25 плоских лопаток с указанным выше профилем. Степень расширения $H_0/2h_* = 43$ при $2h_* = 0,3$ мм, общая длина активной части потока за срезом соплового блока 0,33 м. Истечение происходило в прямоугольный плоскопараллельный канал, боковые стенки которого имели отверстия для крепления окон из фтористого бария. Для измерения усиления использовалась стандартная двухпроходная схема [9]. Лазерная среда, содержащая CO_2 , N_2 , H_2O и другие компоненты, образовывалась в результате сгорания ацетиленовоздушной смеси (6,54 % C_2H_2) в шаровой камере объемом $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ м³. Горение инициировалось электровзрывом проволочки. По показаниям датчика давления, установленного в боковой стенке, контролировался процесс завершения горения, подбиралась необходимая толщина специальной мембранны, разделяющей камеру и предсопловой объем, а также рассчитывалась температура торможения [9] в продуктах взрыва, поступающих на вход соплового блока. Равновесный состав продуктов приведен в [10] и получен на основе расчета [11]. В экспериментах измерялся коэффициент усиления на расстоянии 7 мм от среза сопел.

Как и следовало ожидать (имея в виду влияние параметра $p_0 n_*$ на величину инверсии пасленности низких колебательных уровней молекул газовой смеси), при $p_0 \lesssim 2$ МПа большие значения $\langle k \rangle$ достигаются в соплах с большими размерами, а при $p_0 > 2$ МПа — в сопловом блоке с меньшим критическим сечением. Данные для педеформированных блоков с $2h_* = 0,2$ и $0,4$ мм позволяют экспериментально оценить среднеарифметическое значение σ_5 и сравнить его с Σ_5 (рис. 3), а также с Σ_0 (точки 2) для педеформированной решетки с $2h_* = 0,3$ мм.

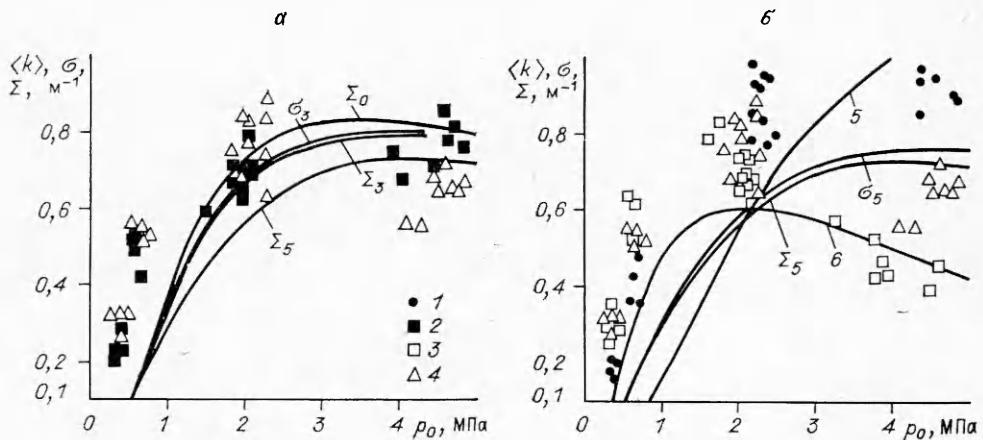


Рис. 3. При различных давлениях торможения сравниваются экспериментальные значения коэффициента усиления за деформированным на 33 % сопловым блоком (4) со значениями (2) за недеформированной решеткой с $2h_* = 0,3$ мм (а), а также (б) со среднеарифметическим значением за блоками с $2h_* = 0,2$ (1) и $0,4$ мм (3).
5, 6 — расчетные данные.

Во всем диапазоне p_0 значение σ_5 практически совпадает с Σ_5 (см. рис. 3), т. е. на рассматриваемом небольшом расстоянии от среза взаимодействие соседних сверхзвуковых потоков не успевает проявиться. Отличие этих параметров от Σ_0 недеформированного блока с $2h_* = 0,3$ мм не превышает величины относительной деформации решетки, т. е. меньше 30 %. При $p_0 > 2$ МПа недеформированной решетке с $2h_* = 0,3$ мм соответствует точка, лежащая правее максимума, т. е. на выпуклом участке кривой рис. 2, поэтому (см. рис. 3) Σ_0 несколько больше σ_5 и Σ_5 , т. е. уменьшение коэффициента усиления в раздвинутом сопле не компенсируется за счет соседнего сопла. При $p_0 < 2$ МПа величины Σ_0 , σ_5 и Σ_5 мало отличаются друг от друга (см. рис. 3), так как в этих условиях соплу с номинальной высотой критического сечения соответствуют точки на левом, практически прямолинейном участке кривых рис. 2.

Расчеты проводились с использованием модели певзязкого газа по методике [4]. Результаты (кривые на рис. 3) качественно соответствуют экспериментальным данным, полученным на небольшом расстоянии от среза сопел.

Выvodимая мощность рассчитывается по методике [12] с использованием приближения постоянной интенсивности. Предполагается, что длина резонатора вдоль потока $l = 0,15$ м, а пороговое значение среднего по объему резонатора коэффициента усиления

$$\langle k \rangle = -\ln r_1 r_2 / 2d = 0,275 \text{ м}^{-1},$$

где r_1 , r_2 — коэффициенты отражения зеркал; d — длина оптического пути, равная ширине решетки, т. е. сумме высот выходных сечений сопел.

Среднеарифметические значения мощности на единицу длины оптического пути вычислялись по формуле

$$\bar{W} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i H_i}{\sum_{i=1}^n H_i}.$$

Здесь W_i — мощность для одиночного изолированного сопла, приходящаяся на единицу высоты выходного сечения.

На рис. 4 представлены распределения параметров при $p_0 = 4$ МПа за двумя обособленными соплами с увеличенным и уменьшенным на 84

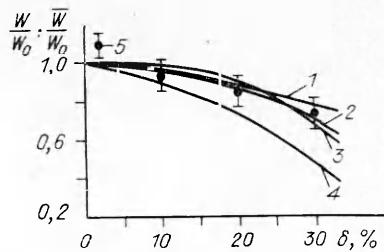
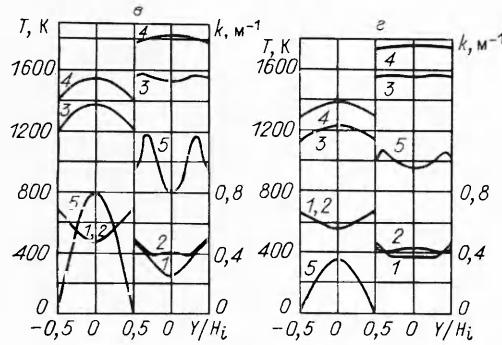
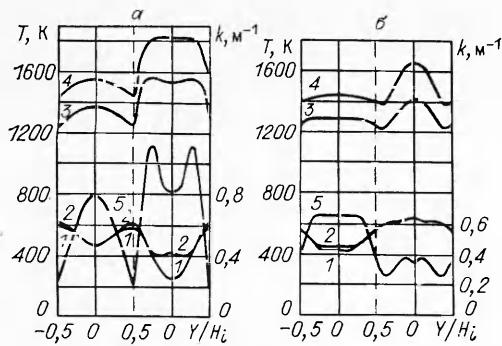


Рис. 5. Зависимости W/W_0 (1, 3) и \bar{W}/W_0 (2, 4) от δ .
 p_0 , МПа: 1, 3 — 2, 2, 4 — 4; 5 — эксперименты [7].

Рис. 4. Распределения температур (1—4) и коэффициента усиления (5) во фрагменте из двух сопел деформированной решетки (а, б) и соответствующих обособленных соплах (в, г). Левая половина каждого рисунка — створ сопла с $2h_* = 0,4$ мм, правая — $2h_* = 0,2$ мм.
1 — T ; 2 — $T_1 = T_2$; 3 — T_3 (T_i — колебательные температуры соответствующих мод CO_2); 4 — колебательная температура атмосферы T_4 .

величину $|A| = 0,05$ мм минимальным сечением, а также за фрагментом деформированного блока, составленного из таких же двух сопел. Рис. 4, а, в и б, г соответствуют расстоянию от среза сопел 7 и 60 мм.

В одиночном сопле с $2h_* = 0,2$ мм параметры поддерживаются практически на одном и том же уровне. При $2h_* = 0,4$ мм релаксационные процессы приводят к существенному снижению коэффициента усиления и уровня запасенной колебательной энергии (ср. кривые T_3 и T_4 на расстояниях 7 и 60 мм от среза сопел). На расстоянии 60 мм коэффициент усиления только на половине сечения выше порогового.

В сопловой решетке поток с более высоким p_0 заметно расширяется за счет соседних потоков с меньшим p_0 , пересекая границу, разделяющую створы соседних сопел. В результате T_3 и T_4 в створе сопла с увеличенным h_* в среднем на 100 К выше, а T и $T_1 = T_2$ ниже на 150—200 К, чем в одиночном сопле при $X = 84,5$ мм. Как следствие коэффициент усиления во всем сечении за сопловой решеткой выше порогового, т. е. вся резонаторная полость участвует в генерации выводимого излучения. В случае обособленных сопел одно из них практически не дает вклада в выходную мощность излучения.

Аналогичная ситуация, но с меньшим эффектом, возникает и при оптимальном по коэффициенту усиления давлении $p_0 = 2$ МПа для недеформированного соплового блока. При $p_0 < 2$ МПа сопло с уменьшенным размером критического сечения вообще не участвует в генерации выводимой мощности, так как коэффициент усиления за ним не достигает порогового значения. По тем же причинам большим величинам относительной деформации $\delta = |A|/2h_*$ соответствуют и большие отклонения W от W_0 — мощности за сопловым блоком без деформаций с $2h_* = 0,3$ мм.

На рис. 5 представлены расчетные зависимости W/W_0 и \bar{W}/W_0 от δ . В рассмотренных условиях большим p_0 соответствуют и наибольшие значения W_0 . Как и в [7], с ростом δ уменьшается мощность. Причем величина \bar{W} с хорошей точностью соответствует выводимой мощности в случае деформированного блока при оптимальном по коэффициенту усиления давлении $p_0 = p_* = 2$ МПа (см. рис. 5), т. е. величина W реаль-

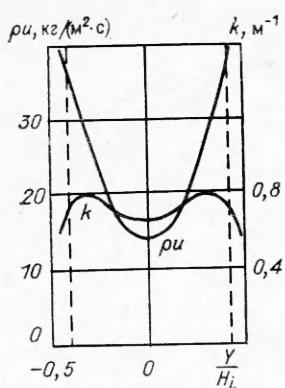


Рис. 6. Распределение расхода газа и коэффициента усиления на срезе сопла с $2h_*=0,3$ мм ($p_0 = 2$ МПа, $T_0 = 2330$ К).

ной установки может быть оценена по формуле

$$W = \int W_A P(A) dA.$$

Здесь W_A — мощность излучения, приходящаяся на единицу выходного сечения одиночного сопла со сдвигом A ; $P(A)$ — плотность вероятности распределения величины A в реальных сопловых блоках с большим количеством лопаток.

Проведенные двумерные расчеты не учитывали вязкости газа, поскольку преследовали цель выделения силового взаимодействия потоков на инверсные характеристики в резонаторной области. Вязкость, однако, может оказаться существенной в экспериментах за счет изменения параметров потока в пограничных слоях и следах. Числа Рейнольдса Re , рассчитанные с использованием длины сверхзвуковой части лопатки в качестве характерного размера, для параметров потока вблизи стенки и давлениях торможения 0,6 и 4 МПа равны соответственно 10^4 и $6,7 \cdot 10^4$. Сравнение их с критическим значением $Re_* = (3,5 - 10) \cdot 10^5$ [13] показывает, что в рассматриваемых режимах пограничный слой ламинарный. Для оценки толщины вытеснения пограничного слоя в выходном сечении сопла можно воспользоваться соотношением [14]

$$\delta^* = 5x/\sqrt{Re_0},$$

в котором x — координата выходного сечения сопла, а Re_0 вычисляется по параметрам торможения и половине высоты критического сечения. Результаты расчета δ^* на срезе сопла с $2h_* = 0,3$ мм приведены на рис. 6 (штриховые линии), на нем же представлены распределения расхода ρ_i и коэффициента усиления k поперек сопла.

Влияние вязкости в экспериментах зависит от условий течения в сопле: для сопел с равномерными параметрами на выходе, которые использовались в [7], оно наименьшее. Поэтому приведенные двумерные невязкие расчеты (см. рис. 5) по влиянию силового взаимодействия на энергосъем подтверждаются результатами измерений [7].

Особенность сопел, использованных в данной работе, — существенная неравномерность параметров: как показывают расчеты, давления на оси и у стеки на срезе при $2h_* = 0,3$ мм различаются примерно в 6 раз. В результате значительная часть расхода газа приходится на пристеночный слой (см. рис. 6), где наличие пограничного слоя в реальных условиях оказывает существенное влияние на величину оптического усиления. За срезом в створе каждого сопла давление выравнивается, газ из областей с высоким давлением вблизи стенок устремляется к оси симметрии, что приводит к разбуханию следов. Последние практически смыкаются на расстоянии 20 мм за срезом соплового блока, что хорошо заметно по сажевым отпечаткам потока на боковых стенках канала. Как следствие, расчеты по невязкой модели согласуются с экспериментами в непосредственной близости к срезу сопла (см. рис. 3, а, б) и заметно отличаются в области смыкания пристеночных слоев: так, в отличие от расчетов, значение $\langle k \rangle$ становится отрицательным при $p_0 \geq 1$ МПа на расстоянии 60 мм от среза сопла. Оценки, выполненные с использованием модели невязкого газа, показывают, что релаксационная зона за срезом должна иметь значительную ($\approx 0,5$ м) длину, т. е. исчезновение инверсии на расстоянии 60 мм не является следствием релаксации в невязком потоке.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Использование модели невязкого газа для оценки взаимодействия потоков за срезом деформированного соплового блока ограничен применимостью самой модели, которая справедлива лишь для тонких пограничных слоев.

2. Поперечное смещение лопаток, как правило, приводит к уменьшению коэффициента усиления и выводимой мощности излучения за сопловой решеткой. Отмеченное уменьшение не превышает средней величины сдвига $|A|$, отнесенной к размеру минимального сечения недеформированного сопла $2h_*$, если $\delta = |A|/2h_* \leq 30\%$.

3. Неравномерность потока на выходе сопла усиливает влияние пограничных слоев, сходящихся с сопловых лопаток, на инверсные характеристики газа. В области умеренных и высоких давлений торможения (в данном случае $p_0 \leq 1$ МПа) разбухание пристеночных слоев и вязких следов приводит к полной дезактивации среды на расстояниях, в ~ 10 раз меньших тех, что обусловлены релаксационными процессами в модели невязкого газа. Для корректного описания инверсных характеристик потока в этих условиях необходимо использовать более сложную модель, учитывающую вязкие свойства среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лосев С. А. Газодинамические лазеры.— М.: Наука, 1977.
2. Козлов Г. И., Ступицкий Е. А. ЖТФ, 1975, 45, 2, 359.
3. Солоухин Р. И., Фомин И. А. Докл. АН СССР, 1976, 228, 3, 596.
4. Левин В. А., Туник Ю. В. Изв. АН СССР. МЖГ, 1976, 1, 118.
5. Егоров Б. В., Комаров В. Н. ПМТФ, 1975, 2, 24.
6. Егоров Б. В., Комаров В. Н., Саягин Г. И. ПМТФ, 1976, 5, 13.
7. Горячев С. В., Новоселов А. Г., Полузотова И. Л. и др. // Газодинамика проточной части ГДЛ.— Новосибирск: ИТГИ СО АН СССР, 1987.
8. Борейшо А. С., Лавров А. В., Лебедев В. Ф. и др. ИФЖ, 1987, 52, 1, 90.
9. Британ А. Б., Левин В. А., Лосев С. А. и др. Квант. электроника, 1984, 8, 5, 1002.
10. Британ А. Б., Левин В. А., Старик А. М. и др. Квант. электроника, 1986, 13, 1, 86.
11. Смехов Г. Д., Фотиев В. А. ЖВММФ, 1978, 18, 5, 1283.
12. Туник Ю. В. // Неравновесные течения газа и оптимальные формы тел в сверхзвуковом потоке.— М.: Изд-во МГУ, 1978.
13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: Наука, 1969.
14. Верховский В. П. Численный расчет плоских сверхзвуковых сопел с изломом контура. Таблицы координат сопел на числа $M = 3 \div 7$. Тр. ЦАГИ.— 1975.— Вып. 1680.

Поступила в редакцию 25/IV 1988,
после доработки — 13/III 1989

УДК 531.781

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО КРЕШЕРА

B. F. Новиков, B. B. Насонов, A. B. Иванюк
(Тюмень)

Крешеры, по степени пластической деформации которых судят о величине приложенных напряжений, имеют низкую точность, одноразовое применение и неоднозначность показаний в случае различных скоростей нарастания давления в ударной волне (УВ) [1]. Магнитоупругий крешер, изготовленный из соединений $TbFe_2$, обладает тем преимуществом, что испытывает только упругую (не пластическую) остаточную деформацию. Это существенно улучшает метрологические характеристики датчика [2]. Однако крешеры на основе соединений Tb — Fe имеют недостатки, которые снижают возможности их применения прежде всего из-за невысокой прочности сплава и ненадежности клеевого соединения тензодатчика и крешера.