

В. Н. КРОШКО, член-корреспондент АН СССР Р. И. СОЛОУХИН

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ИНВЕРСИИ ПРИ ТЕПЛОМ ВОЗБУЖДЕНИИ СМЕШЕНИЕМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Возможность получения инверсии при тепловом возбуждении путем быстрого перемещения нагретого возбуждающего и холодного излучающего молекулярных газов была обоснована в ⁽¹⁾ путем численного анализа предложенной модели процесса. Эксперименты, в которых в системе $\text{CO}_2 - \text{N}_2$ в качестве возбуждающего газа использовался нагретый в электрической дуге азот (²⁻⁴), подтвердили эффективность такого способа получения инверсии. В опытах с использованием чисто термического способа нагрева возбуждающего газа (сжатие в ударных волнах) ⁽⁵⁾ было найдено, что эффективность газодинамических систем со смешением может быть существенно выше, чем устройств с быстрым расширением смеси заранее перемешанных молекулярных газов (обычный г.д.л.-режим).

Преимущества газодинамических систем с отдельным возбуждением заключается прежде всего в отсутствии нагрева излучающей составляющей инверсионной среды и в снижении требований к газодинамике «замораживания» в случае расширения при истечении чистого азота. Поскольку разработка практических схем эффективного преобразования энергии колебательных состояний молекул в когерентное излучение еще далека от своего завершения, а системы с отдельным возбуждением, несмотря на сложность процесса смешения, во многих отношениях являются наиболее перспективными, в данной работе был произведен экспериментальный поиск оптимальных режимов получения инверсии при перемешивании в сверхзвуковом потоке азота.

Опыты проводились на импульсной газодинамической установке (ударной трубе), моделирующей работу стационарной системы, имеющей расход рабочей среды 0,1–1 кг в 1 сек. Достоинствами использования ударной трубы являются предельная простота эксперимента, широкий диапазон достижимых температур и давлений и отсутствие мощных стационарных устройств для нагрева и охлаждения рабочего газа. Результаты моделирования показали, в частности, что соответствующим подбором термических и газодинамических условий смешения, при длине активной среды 12 см, в квазинепрерывном режиме генерации может быть получена мощность порядка 300 вт, что в 5–25 раз превышает уровень мощности при том же запасе тепловой энергии для генерации в обычном г.д.л.-режиме.

Нагрев азота до заданной температуры (800–3600° К) осуществлялся за отраженной ударной волной в канале с прямоугольным сечением $3 \times 12 \text{ см}^2$. Для получения сверхзвуковых потоков «замороженного» азота использовались профилированные двумерные сопла; при неизменной ширине выходного сечения 20 мм ширина критического сечения сопла изменялась в пределах от 0,15 до 2 мм. Сопловая секция соединялась с вакуумным ресивером и отделялась от основного канала ударной трубы тонкой медной диафрагмой с насечками. Углекислый газ в смеси с гелием вводился в поток со звуковой скоростью — через две щели в стенке сопла, имеющие ширину 0,3 мм и расположенные на расстоянии 4 мм от критического сечения. Система смешения с введением CO_2 через щель, установленную в центральной части потока, оказалась менее эффективной. Начало исте-

чения углекислого газа синхронизовалось с началом формирования потока азота путем разрыва тонкой лавсановой диафрагмы с помощью взрыва проволоочки. Температура торможения азота определялась по ударной адиабате, а давление измерялось непосредственно — с помощью импульсного пьезодатчика, расположенного в стенке перед соплом. Оптический резонатор (плоское и сферическое зеркала, радиус 2–5 м) располагался на расстоянии 5 см от критического сечения сопла. Для уменьшения загрязнения зеркал они углублялись в стенку канала на 10 см. Интерферометрическая съемка поля плотности потока в области оптического резонатора показала, что течение является аэродинамически регулярным, т.е. скачки и области отрыва отсутствуют. Для регистрации меняющейся во времени интенсивности и полной энергии светового пучка, выходящего через отверстие в одном из зеркал резонатора (диаметр 2 мм), использовалась измерительная система, состоящая из германиевого приемника, импульсного осциллографа с трубкой памяти и калориметра.

На рис. 1 приведены типичные осциллограммы интенсивности импульсов генерации, полученных в оптимальных условиях соответственно в режиме смещения (1) и в обычном г.д.л.-режиме (2). В том и другом случае длительность генерации примерно одинакова и определяется временем истечения через сопло газа, сжатого ударной волной, однако формы сигналов несколько различаются: в отличие от примерно постоянного уровня выходной мощности в г.д.л.-режиме мощность в режиме смещения обычно растет по мере расходования азота и затем проходит через максимум, что ясно свидетельствует о ее зависимости от соотношения между концентрациями азота и углекислого газа, так как расход CO_2 в течение нескольких миллисекунд практически не изменяется.

На рис. 2 приведены сводные данные о зависимости мощности генерации (средняя за 10^{-3} сек.) от температуры азота при фиксированном начальном давлении азота и CO_2 — для различных значений ширины горла сопла. Чтобы сильно не загромождать график экспериментальными точками, режимы с шириной горла 2 и 0,15 мм представлены лишь результирующими кривыми. Хорошо видно, что, как и в обычных г.д.л.-системах (6), абсолютная величина и положение максимума четко контролируются термическими и газодинамическими факторами. Однако, если в случае исте-

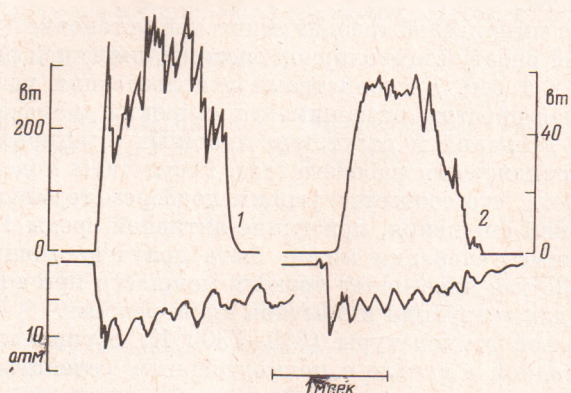


Рис. 1. Типичные осциллограммы изменения интенсивности генерации и давления нагретого газа: 1 — система со смещением, температура азота 1750°K , сопло 0,25 мм; 2 — режим г.д.л., температура смеси 1750°K , сопло 1 мм

чения через сопло заранее перемешанной смеси (г.д.л.-режим) переход мощности через максимум обуславливается конкуренцией между ростом и температурой колебательной энергии газа и совместным действием двух факторов: а) увеличением скоростей релаксации колебательных состояний молекул и б) ростом скоростей заселения нижнего и дезактивации верхнего рабочих уровней молекул CO_2 из-за увеличения поступательной температуры среды, то в системе со смещением роль фактора а) становится незначительной, так как полная «замороженность» потока азота в условиях проводимых опытов обеспечивается до температур выше 4000°K . В то же

время сильная зависимость эффективности системы на смешении от величины поступательной температуры (фактор б)) отмечалась при численном моделировании процесса в (1, 7, 8).

На рис. 3 приводятся зависимости мощности генерации от соотношений между начальными давлениями азота и CO_2 , полученные при постоянных температурах азота, близких к оптимальной для выбранной геометрии

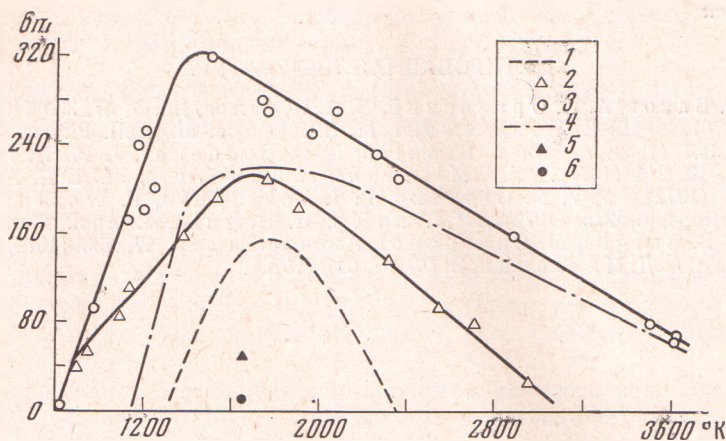
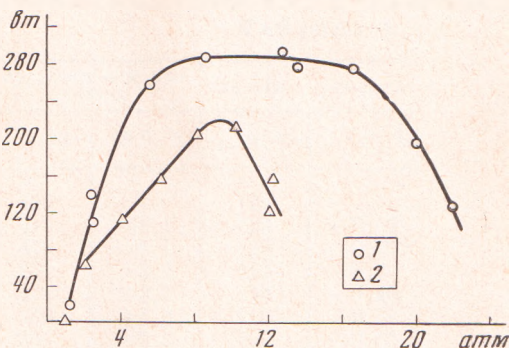


Рис. 2. Зависимость мощности генерации от температуры азота (давление азота везде 10 атм.) для различных значений ширины критического сечения сопла h_* , мм: 1, 5 — 2; 2 — 1; 3, 6 — 0,25; 4 — 0,15; 5, 6 — режим г.д.л.

сопла. Интересно отметить более слабую зависимость оптимальной мощности генерации от давления азота по сравнению с зависимостью от давления CO_2 . Качественно это согласуется с представлением о своеобразной «волне возбуждения» (8), распространяющейся в сторону струи азота: при повышении плотности центральная часть потока азота, где сосредоточен максимальный расход среды, может не участвовать в создании инверсной

Рис. 3. Зависимость мощности генерации от давления торможения: 1 — изменяется давление азота в форкамере сопла, давление смеси $\text{CO}_2 + 10\text{He}$ равно 10 атм., температура азота $1750 \pm 50^\circ \text{K}$, $h_* = 0,25$ мм; 2 — изменяется давление смеси $\text{CO}_2 + 10\text{He}$, давление азота равно $8,5 \pm 0,5$ атм., температура азота $1675 \pm 25^\circ \text{K}$, $h_* = 0,25$ мм



ситуации. В заключение подчеркнем, что опыт определения оптимальных режимов инверсии в молекулярной системе с отдельным тепловым возбуждением и смешением в сверхзвуковом потоке показывает, что как и в обычных г.д.л.-системах, газодинамическая сторона процесса остается контролирующей. В частности, для уменьшения роли столкновительных процессов и улучшения условий смешения крайне важным является переход в диапазон больших чисел Маха потока в сопле с сохранением умеренных плотностей потока азота. Система менее чувствительна к величине

плотности и соотношению между компонентами подмешиваемой смеси -- углекислого газа и гелия.

Авторы выражают свою признательность Ю. А. Якоби за полезные обсуждения и Н. А. Фомину за помощь в проведении эксперимента.

Институт теоретической и прикладной механики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
10 IV 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Н. Г. Басов, А. Н. Ораевский, В. А. Щеглов, *ЖТФ*, **37**, 339 (1967); *ЖТФ*, **40**, 173 (1970). ² E. E. Wisniewski, M. E. Fein et al., *Appl. Phys. Lett.*, **12**, 257 (1968); **14**, 337 (1969). ³ B. R. Bronfin, L. R. Boedeker, J. P. Cheyer, *Appl. Phys. Lett.*, **16**, 244 (1970). ⁴ J. Milewski, M. Brunne et al., *Bull. Acad. Polon. Sci.*, **20**, 73 (1972). ⁵ V. N. Croshko, R. I. Soloukhin, P. Wolanski, *Optics Communications*, **6**, 275 (1972). ⁶ J. Tulip, H. Seguin, *J. Appl. Phys.*, **42**, 3393 (1971). ⁷ R. Borghi, M. Charpenel, *Astronautica acta*, **17**, 833 (1972). ⁸ В. М. Маргулис, А. Д. Марголин, *ЖТФ*, **62**, 647 (1972).