

На рис. 1, 2 даны результаты численных расчетов в безразмерных переменных $\xi^* = \xi\gamma/V$, $y^* = y\gamma/V$, $z^* = z/\beta y_0$, $Q^* = QN^2/V^3$, $w^* = w/V$. На рис. 1 показаны левый и правый фронты, рассчитанные по формуле (4.5) при $y_0^* = 0,4$. На рис. 2 сплошные линии — графики вертикальной скорости $w^*(\xi^*)$, построенные по формуле (4.8) для значений $Q^* = 1$, $z_0^* = 0,2$, $z^* = 0,1$ и $y^* = 0,29$ (а), $y^* = 0,51$ (б); штриховые — вертикальная скорость при постоянной глубине $H^* = 1$. Видно, что слева от оси движения амплитуда волны для переменного дна меньше, чем для постоянного, а справа больше.

Автор выражает благодарность В. А. Боровикову за постоянное внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Keller J. B. Surface waves on water of non-uniform depth // J. Fluid Mech.— 1958.— V. 4, pt 6.
2. Keller J. B., Van C. Mow. Internal wave propagation in an inhomogeneous fluid of non-uniform depth // J. Fluid Mech.— 1969.— V. 38, pt 2.
3. Воронович А. Г. Распространение поверхностных и внутренних волн в приближении геометрической оптики // Изв. АН СССР. ФАО.— 1976.— Т. 12, № 8.
4. Боровиков В. А., Владимиров Ю. В. Трансформация волн Эйри в плавнонеоднородном по горизонтали океане // Волны и дифракция: Тр. IX Всесоюз. симпоз. по дифракции.— Тбилиси, 1985.— Т. 1.
5. Keller J. B., Munk W. H. Internal wave wakes of a body moving in a stratified fluid // Phys. Fluids.— 1970.— V. 13, N 6.
6. Боровиков В. А., Владимиров Ю. В., Кельберт М. Я. Поле внутренних гравитационных волн, возбуждаемых локализованными источниками // Изв. АН СССР. ФАО.— 1984.— Т. 20, № 6.
7. Льюис Р. Формальная теория бегущей волны / Квазиоптика.— М.: Мир, 1966.
8. Бабич В. М., Булдырев В. С. Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн.— М.: Наука, 1972.
9. Федорюк М. В. Обыкновенные дифференциальные уравнения.— М.: Наука, 1985.

г. Москва

Поступила 13/IV 1988 г.

УДК 533.6:535.417

А. С. Борейшо, С. И. Дуюнов, В. В. Лобачев,
А. В. Морозов, А. Г. Попов

ОПТИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО ПОТОКОВ, ФОРМИРУЕМЫХ БЛОКАМИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОПЕЛ

Широкое использование для формирования газовых потоков блоков мелкомасштабных осесимметричных сопел заставляет подробно изучать газодинамическую структуру таких потоков и делает весьма актуальной задачу обеспечения их высокого оптического качества.

Анализ картины течения и полученные в [1—3] результаты свидетельствуют о регулярном характере неоднородностей в таком потоке и указывают на принципиальную возможность уменьшения фазовых искажений проходящего излучения за счет взаимной компенсации и осреднения вдоль оптического пути. Для этого необходимо определенным образом ориентировать поток относительно направления распространения излучения [1, 3].

В [1—3] приводятся результаты оптической аттестации газовых потоков, сформированных блоками осесимметричных сопел. Эти результаты заключаются в оценке интегральной неоднородности плотности $\Delta\rho/\rho$ тем или иным способом. По величине неоднородности плотности делается вывод об оптическом качестве потока на основании пропорциональности $\Delta\varphi$ (фазовых искажений) неоднородности Δn (показателя преломления, который зависит, в частности, и от плотности газа).

В [2] методом тальбот-интерферометрии оптическое качество потоков, сформированных блоками осесимметричных сопел, оценивалось по

искажениям в исследуемой среде первоначально плоского зондирующего волнового фронта (ВФ). Для измеренных искажений профиля ВФ строились одномерные диаграммы направленности излучения в дальней зоне. Эти результаты позволили сделать вывод о возможности получения достаточно высокой направленности излучения, проходящего через поток, однако их необходимо рассматривать как тест-оценки, которые позволяют судить об оптическом качестве газовых потоков, но не отражают всей полноты реальной физической картины как самого течения, так и особенностей ВФ и диаграммы направленности излучения.

Исчерпывающую информацию об оптическом качестве среды дают реальная диаграмма направленности излучения (т. е. двумерное распределение интенсивности) и такие ее характеристики, как относительная доля энергии в центральном лепестке W_{-1}^{+1} (по сравнению с идеальной картиной) и относительная осевая интенсивность (число Штреля Sh).

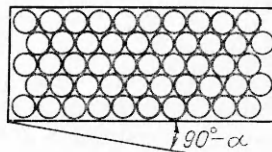
Дискретное представление информации в методе тальбот-интерферометрии позволило получить полную картину искажений ВФ с использованием сравнительно простой обработки интерферограмм. Измерение искажений ВФ по всей апертуре зондирующего пучка, захватывающего основную область течения, позволило выявить, оценить и учесть ряд особенностей потока, сформированного блоком осесимметричных сопел. В [3] указывалось на преимущественное влияние системы ударных волн (УВ) на газодинамические параметры на небольших (до 10 калибров струй) расстояниях от блока осесимметричных сопел и на рост общего уровня плотности вниз по потоку.

Обнаруженный в экспериментах и полученный в расчетах сильный нелинейный рост плотности вниз по течению в пределах аттестуемой области, захватываемой зондирующим излучением, оказывает существенное влияние на характер искажений ВФ и, как следствие, на диаграмму направленности. Искажение ВФ в направлении вдоль потока в пределах аттестуемой области течения может значительно превышать периодические искажения ВФ в направлении поперек потока, возникновение которых обусловлено взаимодействием мелкомасштабных осесимметричных струй. Однако искажение ВФ в направлении вдоль потока, несмотря на нелинейность, представляется достаточно простым, так как, во-первых, оно имеет место лишь на сравнительно небольших расстояниях (< 10 калибров струй) от блока и поэтому не является решающим для активных сред в системах со смещением разнородных компонентов, во-вторых, даже в случае необходимости использования участка течения сразу за срезом блока осесимметричных сопел оно может быть легко учтено и физически устранено сравнительно простыми средствами.

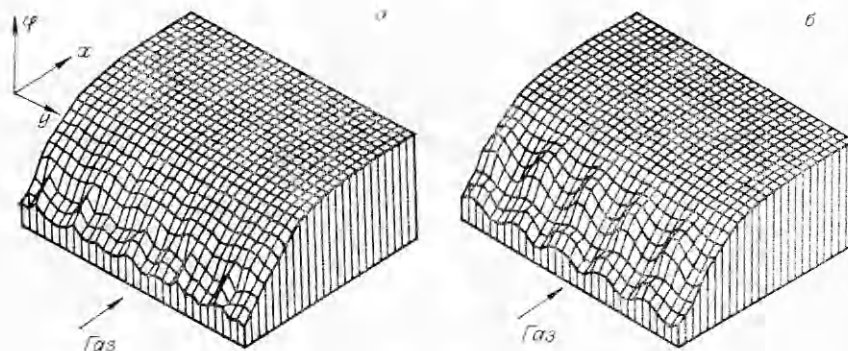
Наибольший интерес с точки зрения влияния на оптическое качество потока представляют искажения ВФ в направлении поперек течения. Как указано выше и в [1, 3], регулярный характер неоднородностей в потоке, определяемый периодическим расположением сопел в блоке, обеспечивает принципиальную возможность уменьшения фазовых искажений излучения на выходе из газовой среды.

Ниже приводятся результаты численного и экспериментального (методом тальбот-интерферометрии) исследования зависимости оптического качества потоков от ориентации их относительно распространения излучения.

Изучались потоки, сформированные блоком профилированных осесимметричных сопел со степенью расширения 36 ($d_* = 1,1$ мм, $d_a = 6,6$ мм). Сопла расположены в шахматном порядке (гексагональная упаковка) и выходными сечениями вписаны в прямоугольник 35×85 мм (рис. 1), течение моделировалось холодным воздухом (α — угол ориентации рядов сопел относительно направления зондирующего излучения).



Р и с. 1



Р и с. 2

циально созданном автоматизированном комплексе на базе инструментального микроскопа и ЭВМ. Диаграммы направленности строились из условия пропорционального накопления фазовых искажений при однократном прохождении излучением потока с размером 1,05 м [2].

Расчеты искажений зондирующего ВФ и соответствующих диаграмм направленности проводились в предположении о возможности отдельного учета фазовых набегов, приобретаемых излучением на системе УВ и следов смещения [1, 3]. На рис. 2 показаны характерные расчетные ВФ излучения, прошедшего систему УВ в потоке, сформированном блоком осесимметричных сопел, при $\alpha = 19$ и 30° (а и б), x и y — координаты вниз по потоку и поперек потока соответственно, φ — фаза прошедшего излучения. Фазовый набег, связанный с ростом общего уровня плотности вниз по течению, существенно превышает амплитуду периодических фазовых искажений в другом направлении (поперек потока), что характерно для зоны преимущественного влияния на параметры газа УВ на участке течения вблизи блока. Следует отметить также, что интенсивность УВ быстро уменьшается и уже в пределах выбранной апертуры они практически затухают. В расчетах диаграммы направленности, проводимых с целью оптимизации ориентации блока, производилась корректировка ВФ путем вычитания величины фазового набега, отвечающего росту общего уровня плотности вниз по потоку. Анализ результатов проведенного численного моделирования показывает, что имеются предпочтительные направления ($\alpha_1 \approx 6^\circ$, $\alpha_2 \approx 19^\circ$), распространяясь вдоль которых в потоке, сформированном исследованным блоком осесимметричных сопел, излучение приобретает минимальные фазовые набег на всей апертуре. Диаграммы излучения для этих направлений близки к идеальным: $Sh \sim 0,95$ по сравнению с традиционными направлениями распространения излучения $\alpha = 0$ или 90° , для которых $Sh \sim 0,3$, т. е. оптимальная ориентация соплового блока позволяет втрое увеличить относительную осевую интенсивность в дальней зоне и долю энергии в центральном лепестке диаграммы направленности.

Отметим, что для изученной схемы расположения сопел изменение α в пределах $0-30^\circ$ исчерпывает весь возможный набор взаимных положений блока и направления распространения излучения. Изменение α в пределах $30-60^\circ$ и $60-90^\circ$ эквивалентно изменению в интервале $0-30^\circ$, для которого проведено исследование. На рис. 3 изображена зависимость Sh и W_{-1}^{-1} от угла ориентации рядов сопел α . Кривые 1, 2 — Sh и W_{-1}^{-1} при моделировании течения со следами смещения, а 3, 4 — при моделировании течения с пространственной структурой УВ, точки — результаты экспериментов.

Расчет фазовых искажений, приобретаемых излучением на системе следов смещения струй, истекающих из осесимметричных сопел рассматриваемого блока, показывает, что и в этом случае (для которого не учитывается влияние УВ) имеются оптимальные углы ориентации, причем совпадающие с теми, что получены для участка течения в зоне влияния УВ.

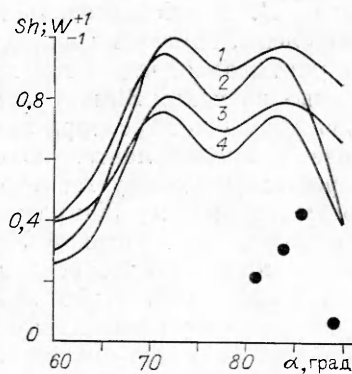
Показателем возможности существенного повышения оптического качества при зондировании под этими углами является значительное увеличение осевой интенсивности и доли энергии в центральной лепестке диаграммы направленности.

Результаты экспериментов подтверждают обнаруженные численным моделированием тенденции изменения оптического качества среды в зависимости от ориентации блока осесимметричных сопел. На рис. 4 показаны диаграммы направленности излучения, прошедшего поток под различными углами ($a - e$ для $\alpha = 2; 4; 6; 8^\circ$). Сравнение диаграмм указывает на наличие оптимального угла, величина которого $\alpha = 4^\circ$

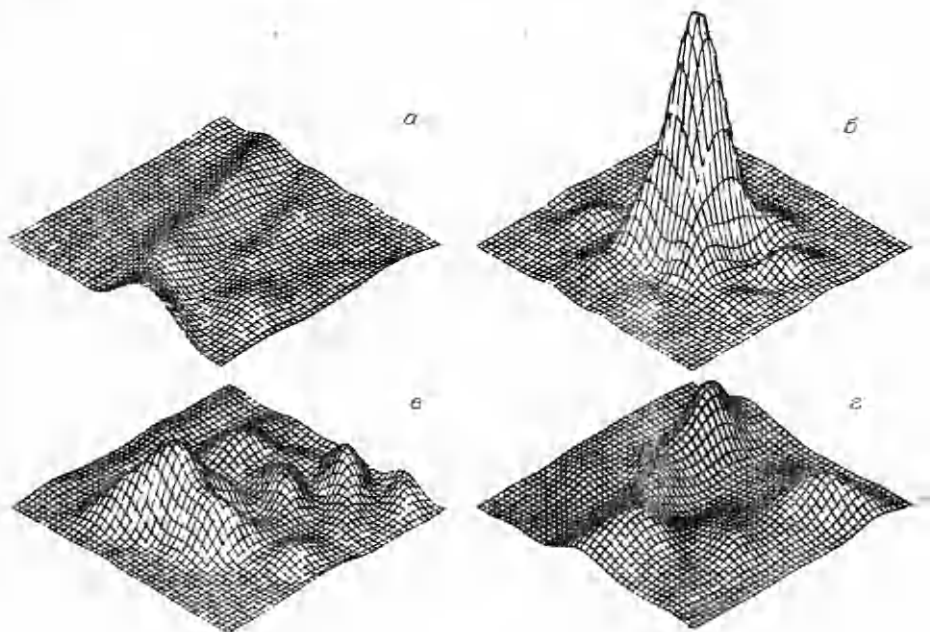
удовлетворительно соответствует одному из значений, найденных в расчетах. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности значительного улучшения диаграммы направленности в случае оптимальной ориентации блока (примерно втрое по сравнению с $\alpha = 0$ увеличиваются относительная осевая интенсивность и доля энергии в центральной лепестке).

Таким образом, использованные для расчетов модели адекватны и удовлетворительно качественно описывают экспериментально зарегистрированные тенденции зависимости пространственных характеристик излучения от ориентации блока осесимметричных сопел, что подтверждается хорошим совпадением расчетных и экспериментальных значений оптимальных углов и одинаковым относительным увеличением Sh и W_{-1}^{-1} для этих углов по сравнению с $\alpha = 0$.

Различие абсолютных расчетных и экспериментальных величин во многом объясняется реализованным в расчетных моделях допущением о возможности раздельного учета влияния на параметры газа системы УВ и следов. Так, экспериментально изучалось оптическое качество потока на расстоянии 25—55 мм от блока (такой участок охватывался апертурой зондирующего пучка), т. е. в зоне существенного влияния на параметры



Р и с. 3



Р и с. 4

газа УВ. В действительности на этом участке течения имеются и развитые следы, однако их вклад в накопление фазовых искажений в расчетах не учитывался, что могло приводить к завышению соответствующих расчетных значений Sh по сравнению с экспериментальными при сохранении качественного характера зависимости $Sh(\alpha)$. Кроме того, 30-кратное увеличение экспериментально измеренных величин фазовых искажений при пересчете на длину геометрического пути в среде $\sim 1,05$ м приводит к соответствующему 30-кратному усилению влияния пристенных областей и инициируемых потоком УВ, возникающих в канале экспериментальной установки с размером сечения 35×85 мм. Это также может быть причиной различий в абсолютных значениях расчетных и экспериментальных Sh , причем экспериментальные значения, найденные при таком пересчете на большую длину оптического пути в потоке, очевидно, будут занижены против тех, которые могут быть получены для реальных потоков в крупногабаритных каналах.

Изложенные результаты численного и экспериментального (методом гальбот-интерферометрии) исследования оптического качества газового потока, сформированного блоком осесимметричных сопел, убедительно свидетельствуют о возможности улучшения диаграммы направленности излучения за счет оптимальной ориентации таких потоков относительно направления вывода излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Russell D. A., Chu Y. K. Aerodynamic disturbances from supersonic nozzle arrays // Proc. IV Intern. Symp. on Gasdynamic and Chemical Lasers, Italy, 1983.
2. Борейшо А. С., Коряковский А. С. и др. Исследование оптического качества газовых потоков, формируемых сопловыми блоками сотовой конструкции // ЖТФ.— 1985.— Т. 55, вып. 10.
3. Борейшо А. С., Лобачев В. В., Морозов А. В., Попов А. Г. Результаты исследования поля плотности и оптического качества потоков, формируемых сопловыми блоками сотовой конструкции // Физическая газодинамика: экспериментальное моделирование и диагностика.— Минск: ИТМО АН БССР, 1985.

г. Ленинград

Поступила 26/II 1988 г.

УДК 536.25

А. А. Головин, Ю. П. Гупало, Ю. С. Рязанцев

ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ КАПЛИ ПРИ ЕЕ ДВИЖЕНИИ ЗА СЧЕТ ХЕМОТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА

Известно, что капля жидкости (пузырек), помещенная в другую (не смешивающуюся с ней) жидкость, находясь в поле температуры с постоянным градиентом, в отсутствие внешних сил дрейфует по направлению градиента температуры с постоянной скоростью

$$U = \left| \frac{d\sigma}{dT} \right| \frac{Aa}{\mu_1} \frac{2}{(2 + \delta)(2 + 3\beta)}$$

где σ — межфазное натяжение; T — температура; $d\sigma/dT = \text{const}$; A — постоянный градиент температуры на бесконечности; a — радиус капли; μ_1 — динамическая вязкость внешней среды; β , δ — отношения соответственно динамических вязкостей и теплопроводностей жидкостей внутри и вне капли.

Впервые приведенное выражение для скорости термокапиллярного дрейфа было теоретически получено и подтверждено экспериментально в [1]. В дальнейшем явление термокапиллярного дрейфа капель и пузырьков подробно исследовалось (см., например, [2—5]). В частности, отмечалось, что капля более плотной жидкости при дрейфе вытягивается по направлению движения, в противном случае — сжимается [3, 5].

Термокапиллярный дрейф обусловлен эффектом Марангони, приводящим за счет зависимости поверхностного натяжения от температуры к возникновению дополнительных касательных напряжений на поверхности капли (пузырька), находящейся во внешнем неоднородном температурном поле. Между тем, как это впервые отмечено в [6], дополнительные касательные напряжения на поверхности капли могут быть