

03; 07; 12

© 1990 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ОКОН СО СВОБодНЫМ ВИХРЕМ

*А. А. Гилерсон, В. И. Панченко, В. Г. Рафиков,
Р. И. Сериков, В. М. Хайлов*

Проведено расчетное и экспериментальное исследование оптических свойств аэродинамических окон, течение в которых на расчетном режиме подчиняется закону «свободного вихря». Показано влияние слоев смешения, эжекции газа, нерасчетности течения на распределение осредненной и нестационарной составляющих изменения фазы проходящего излучения и уменьшение максимума интенсивности излучения в дальней зоне.

Аэродинамические окна (АО) представляют собой устройства, которые разделяют среды с разными свойствами (давлением, температурой, химическим составом) за счет движения газового потока без использования твердых материалов. АО используются для вывода излучения большой интенсивности из проточных лазерных установок, в резонаторе которых давление отличается от атмосферного [1]. АО могут применяться также на испытательных стендах, в металлургических агрегатах, вихревых трубах и т. п.

Основными характеристиками АО являются энергетические (расход газа, мощность, необходимая для обеспечения заданного отношения давлений на окне) и оптические, определяющие влияние течения в АО на проходящее излучение. Как было показано в [1], поглощением излучения в АО для многих рабочих газов можно пренебречь, поэтому в силу пропорциональности показателя преломления газа его плотности оптическое качество окон будет определяться геометрией струи газовой завесы и распределением плотности в ней, а также уровнем нестационарных возмущений плотности, возникающих в потоке.

Как и в [1], искажения, создаваемые потоком в АО, будем оценивать в приближении геометрической оптики по изменениям фазы

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\beta}{\rho_s} \int_l \Delta\rho dl, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, β — постоянная Гладстона—Дейла, ρ_s — плотность газа при нормальных условиях, $\Delta\rho$ — изменение плотности на траектории луча по сравнению с плотностью на некоторой произвольной траектории, взятой за базовую, например в плоскости среза сопла; l — расстояние вдоль рассматриваемого луча.

Интеграл берется вдоль всего пути распространения луча в АО. В безразмерном виде выражение (1) может быть записано в виде, удобном для обобщенного представления результатов, как это принято в теории подобия,

$$\overline{\Delta\varphi} = \frac{\Delta\varphi}{\omega} = \int_l \overline{\Delta\rho} dl, \quad (2)$$

где $\omega = (2\pi/\lambda) (\beta/\rho_s) \rho^* D$ — параметр приведения, для воздуха $\lambda = 10.6$ мкм, при нормальных атмосферных условиях и $D = 100$ мм $\omega = 16.4$; ρ^* — характерная плотность газа, часто в качестве такой плотности удобно принимать плот-

ность газа в области высокого давления $\rho^* = \rho_+$; D — размер апертуры (отверстия для прохождения луча) вдоль потока.

По распределению фазы в апертуре можно оценить максимум интенсивности излучения в дальней зоне [2]

$$\frac{I}{I_0} = \left| \frac{1}{A} \int_A e^{i\Delta\varphi} dA \right|^2 = e^{-\langle \Delta\varphi \rangle^2}, \quad (3)$$

где A — площадь апертуры АО, J_0 — максимум интенсивности излучения в дальней зоне при однородном распределении фазы в апертуре, $\langle \Delta\varphi \rangle$ — среднеквадратичное отклонение фазы в апертуре.

При малых искажениях фазы ($\langle \Delta\varphi \rangle \leq 0.5$) можно записать

$$\frac{\Delta I}{I_0} \approx \langle \Delta\varphi \rangle^2. \quad (4)$$

По виду источника энергии, используемого для создания газового потока, АО принято разделять на окна напорного типа (работающих от системы высокого давления) и вакуумного типа, где происходит откачка газа вакуумным устройством. Основными газодинамическими параметрами окон являются $\bar{p}_0 = p_0/p_+$ и $\bar{p} = p_+/p_-$ — отношения давлений на сопле и на струе (p_0 — давление в камере сопла; p_+ , p_- — давления над и под струей газовой завесы).

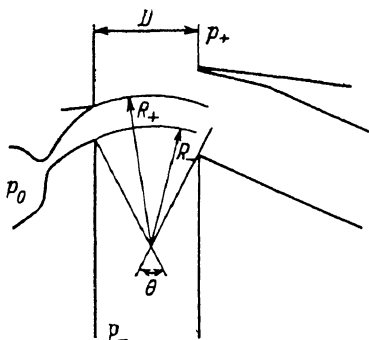


Рис. 1. Схема АО со свободным вихрем.

Напорные окна со свободным вихрем [3, 4] имеют хорошие расходные характеристики, но их применение может быть ограничено из-за оптических искажений, создаваемых потоком с распределением параметров по закону свободной вихря $V \cdot r = \text{const}$ (V — скорость газа, r — радиус линии тока) (рис. 1). В идеальном случае такое окно представляет собой отрицательную газодинамическую линзу, оптическая сила которой зависит от параметров газового потока и угла поворота потока в апертуре θ .

Изменения фазы излучения, создаваемые потоком АО, можно условно разделить на 3 составляющие: $\overline{\Delta\varphi}_+$, $\overline{\Delta\varphi}_-$, $\overline{\Delta\varphi}_{\text{стр}}$ — искажения, вызванные искривленностью верхней и нижней границ струи (приводящие к различию путей лучей в области высокого и низкого давлений) и вызванные самой струей (кольцевой сегмент струи лучи проходят по хордам, имеющим переменную длину по апертуре). Расчеты для АО с идеальной (невязкой) струей показывают, что основная оптическая неоднородность $\overline{\Delta\varphi}_+^{\text{max}}$ создается из-за искривленности верхней границы струи, окрестность которой является областью наибольшей плотности;

абсолютное значение величины $\overline{\Delta\varphi}_+^{\text{max}}$ (стрелки прогиба изменения фазы) быстро убывает с увеличением отношения давлений на окне; $\overline{\Delta\varphi}_{\text{стр}}^{\text{max}}$ в 3—4 раза меньше $\overline{\Delta\varphi}_+^{\text{max}}$ (рис. 2). Можно показать, что изменения фазы увеличиваются пропорционально углу поворота потока в апертуре и слабо зависят от отношения давлений на сопле \bar{p}_0 .

В реальном аэродинамическом окне на границах струи происходит нарастание слоев смешения от сопла к диффузору, что делает более сложным распределение осредненной составляющей плотности газа в апертуре по сравнению с идеальным, а также приводит к появлению нестационарных возмущений плотности. На основе обработки многочисленных интерферограмм течения газа в апертуре АО в [5] была получена зависимость, позволяющая оценить толщины слоев смешения на границах криволинейных струй при заданных параметрах идеального течения. Было показано также, что со стороны высокого давления нарастание слоя смешения происходит быстрее, а со стороны низкого давления — медленнее, чем в случае распространения струи с прямолинейной осью. По-

этому, учитывая малую толщину слоя смешения на нижней границе струи, а также малые значения плотности газа со стороны низкого давления, при расчете оптических свойств АО принималось во внимание только влияние слоя смешения со стороны высокого давления, распределение плотностей поперек слоя принималось линейным. Учет слоя смешения приводил к уменьшению максимальных отклонений фазы в апертуре и появлению несимметрии в распределении фазы (рис. 3).

Экспериментальное исследование оптических свойств АО проводилось на нескольких установках с просвечиванием в направлении вывода предполагаемого излучения и использованием интерферометрии видимого света. Визуализация осуществлялась на интерферометре, создававшемся на базе теневого прибора ИАБ-451 [6], с узким опорным пучком. В качестве источника света использовался импульсный лазер ОГМ-20 с длиной волны излучения $\lambda = 0.6943$ мкм и длительностью импульса $\sim 10^{-8}$ с. Это время существенно меньше характерного времени турбулентных пульсаций, поэтому каждая картина

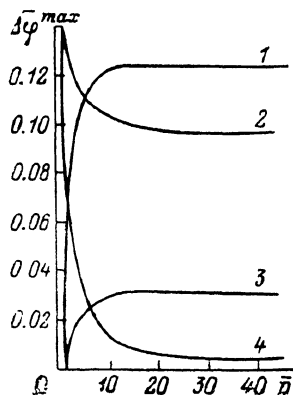


Рис. 2. Влияние отношения давлений на окне на максимальное изменение фазы.

$$p_0 = 8.0, \theta = 60^\circ; 1 - \Delta\varphi_{\pm}^{\max}, 2 - \Delta\varphi_{\mp}^{\max}, 3 - \Delta\varphi_{\text{стр}}^{\max}, 4 - \Delta\varphi_{\text{стр}}^{\min}.$$

давала распределение фазы в конкретный момент времени. На каждом режиме получалось 2...6 интерференционных картин, пауза между импульсами составляла 20...30 с. Одна из интерферограмм на характерном режиме приведена на рис. 4. Искривления полос на интерферограммах обусловлены как структурой потока, определяющей осредненное распределение плотности, так и нестационарными возмущениями. Для выделения стационарной и нестационарной составляющих изменения фазы обработка интерферограмм апертуры производилась следующим образом. На каждой интерферограмме выбиралось 8...10 интерференционных полос, полностью наблюдавшихся в пределах поля. В направлении вдоль потока картина раз-

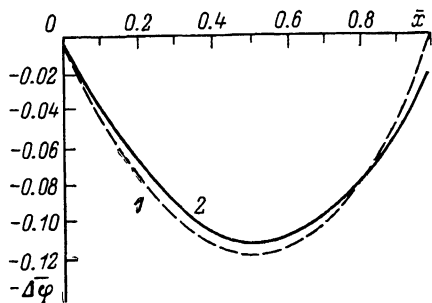


Рис. 3. Влияние слоя смешения на верхней границе струи на распределение фазы в АО. $p_0 = 9.6, \theta = 60^\circ$; 1 — с «идеальным» свободным вихрем, 2 — с учетом слоя смешения.

делялась на 10...12 сечений, в которых находилось смещение каждой из полос относительно полос нулевой настройки. Поскольку геометрия канала вдоль кромки сопла выдерживалась постоянной, то предполагалось, что осредненная составляющая изменения фазы должна быть одинаковой для всех полос, поэтому принималось, что для j -го сечения смещение полосы, соответствующее осредненной составляющей, равно

$$S_{\text{ср}j} = \frac{\sum_{i=1}^M S_{ij}}{M},$$

где S_{ij} — смещение i -й интерференционной полосы в j -м сечении, M — число обрабатываемых полос.

Тогда смещение, соответствующее нестационарной среднеквадратичной составляющей изменения фазы $\langle \Delta S_n \rangle_j$, равно

$$\langle \Delta S_n \rangle_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_{i,j} - S_{cp,j})^2}{M}}$$

Среднеквадратичное смещение, соответствующее нестационарной составляющей изменения фазы в целом по апертуре, находилось как

$$\langle \Delta S_n \rangle = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \langle \Delta S_n \rangle_j^2}{N}}$$

где N — число сечений вдоль потока, в которых проводилась обработка.

Для перехода от смещений полос к безразмерным изменениям фазы использовалась формула

$$\overline{\Delta \varphi} = \frac{\Delta \varphi}{\omega} = \frac{\lambda \frac{S}{d}}{\beta \rho_+ D}$$

где $\Delta \varphi$ — изменение фазы; λ — длина волны излучения, при котором получена интерферограмма; d — период полос настройки.

Таким образом находились величины $\overline{\Delta \varphi}_{cp,j}$, соответствующие осредненной составляющей изменения фазы, а также нестационарные составляющие по сечениям $\langle \overline{\Delta \varphi_n} \rangle_j$ и в целом по апертуре $\langle \overline{\Delta \varphi_n} \rangle$.

При малых отношениях давлений на АО и большом угле поворота потока ($\bar{p}_0=9.6$, $\bar{p}=2.0$, $\theta=60^\circ$) относительная толщина струи мала ($h_a/D=0.09$) и течение в апертуре оказывается неустойчивым, из-за колебаний струи в целом оптические искажения могут достигать при $\omega=16.4$ величин $\langle \Delta \varphi \rangle=1.5 \dots 2$, что неприемлемо для большинства установок.

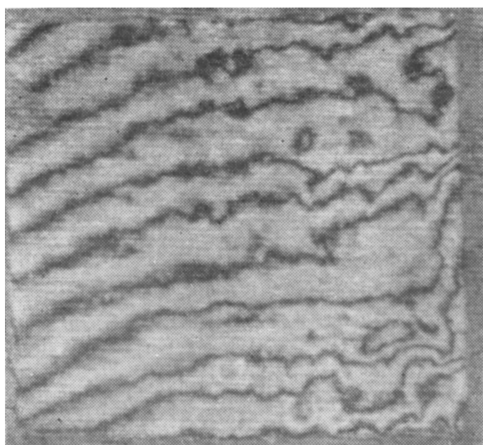


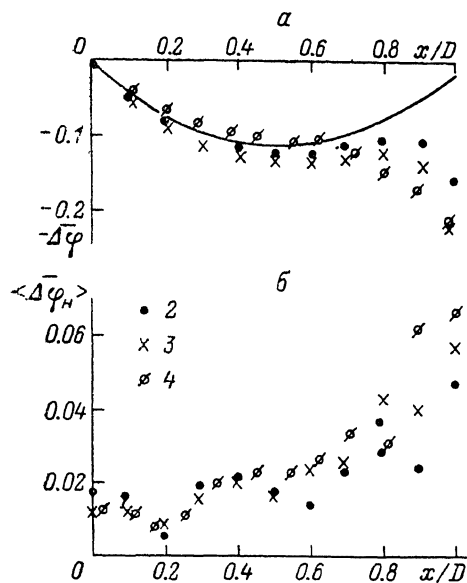
Рис. 4. Интерферограмма апертуры АО в режиме, близком к расчетному.

$$\bar{p}_0=9.5, \quad \bar{p}=7.5, \quad \theta=60^\circ.$$

При том же отношении давлений на АО $\bar{p}=2$, но меньшем угле поворота потока $\theta=26^\circ$ слияние слоев смешения происходит уже в диффузоре и течение становится устойчивым, ввиду малого отношения давлений \bar{p} осредненная составляющая изменения фазы мала ($\overline{\Delta \varphi}^{\max} \approx 0.02$) и основная неоднородность создается нестационарными возмущениями в потоке $\langle \overline{\Delta \varphi_n} \rangle \approx 0.3$, что при $\omega=16.4$ может приводить к относительному уменьшению максимума интенсивности $(\Delta I_{om})/I_{om} \approx 10\%$.

С увеличением отношения давлений на АО, как видно из рис. 2, максимальное отклонение осредненной составляющей изменения фазы увеличивается, но при сравнении расчетного распределения фазы (полученного с учетом влияния пограничного слоя на верхней границе струи) с найденным по обработке интерферограмм наблюдаются заметные различия, особенно в ближней к диффузору половине апертуры (рис. 5, а). Анализ теневых и интерференционных картин течения в АО, а также интерферограмм апертуры показал, что на осредненное распределение фазы в апертуре серьезное влияние оказывает течение вблизи кромки верхней стенки диффузора. В этой области происходит интенсивная эжекция воздуха из атмосферы в диффузор основной струей, причем расход эжектируемого газа, распределение плотности в окрестности кромки

зависят от отношений давлений \bar{p}_0 и \bar{p} , геометрии кромки и всего диффузора в целом. Распределение плотности оказывается таким, что радиус кривой изменения по апертуре среднеквадратично увеличивается и искажения уменьшаются. Распределенными возмущениями в потоке, для одной из геометрий диффузора приведены на рис. 5, б. Анализ кривых показывает, что они слабо зависят от отношения давлений в диапазоне $\bar{p}=7.6 \dots 15$. С учетом квадратичной коррекции осредненная составляющая изменения фазы мала. Она может вызывать уменьшение числа Штреля не более чем на $(\Delta I_{om})/I_{om}=3 \dots 5\%$ при $\omega=16.4$. Искажения, связанные с нестационарными изменениями плотности, оказываются значительно больше: в зависимости от геометрии диффузора они могут составлять $\langle \Delta \bar{\varphi}_n \rangle = 0.022 \dots 0.038$, что при $\omega=16.4$ вызовет уменьшение $(\Delta I_{om})/I_{om}=10 \dots 30\%$. При обработке нескольких (4...6) интерферограмм апертуры, зарегистрированных в одном и том же режиме, но в разные моменты времени, были получены близкие распределения фазы, отличавшиеся не более чем на 20% как по осредненным, так и по нестационарным составляющим.



30%. При обработке нескольких (4...6) интерферограмм апертуры, зарегистрированных в одном и том же режиме, но в разные моменты времени, были получены близкие распределения фазы, отличавшиеся не более чем на 20% как по осредненным, так и по нестационарным составляющим.

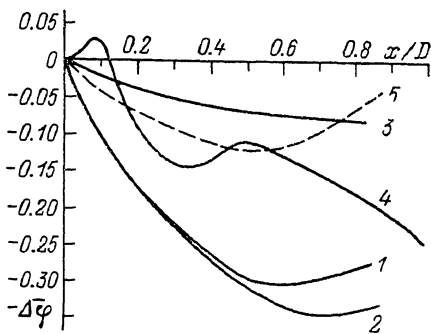


Рис. 5. Распределение осредненной и нестационарной составляющей изменения фазы в АО. 1 — $\bar{p}_0=9.6$, $\bar{p}=7.6$ (расчет); 2, 3 — $\bar{p}_0=9.5$, $\bar{p}=7.5$ (эксперимент — обработка по двум интерферограммам апертуры); 4 — $\bar{p}_0=7.0$, $\bar{p}=14$ (эксперимент).

Рис. 6. Распределения фазы излучения в апертуре АО в нерасчетных режимах.

\bar{p}_0 : 1 — 11.2, 2 — 12.2, 3 — 8.33, 4 — 5.98, 5 — 9.73; \bar{p} : 1 — 13.7, 2 — 15.1, 3 — 5.21, 4 — 3.05, 5 — 7.52 (расчетный режим, расчет).

В работе [4] была показана возможность построения сопел, реализующих на срезе течение со свободным вихрем, по двум методикам. В зависимости от принимаемой методики получают сопла различной длины, имеющие соответственно разную толщину пограничного слоя на выходе из сопла. На основе обработки интерферограмм апертуры АО, в которых устанавливались сопла разной длины, не было обнаружено различий в распределениях фазы, что с точки зрения оптического качества позволяет использовать в АО сопла обоих типов.

В работе [3] отмечалось что АО со свободным вихрем допускают плавное изменение отношения давлений на окне изменением полного давления на входе в сопло. При таком регулировании на кромках сопла АО возникают дополнительно волны разрежения или скачки уплотнения, которые накладываются на структуру свободного вихря, соответственно изменяется геометрия границ струи и распределение фазы в апертуре. На рис. 6. приведены распределения осредненных составляющих изменения фазы, полученные на нерасчетных режимах в одном из АО в широком диапазоне изменения отношений давлений \bar{p}_0 и \bar{p} . В зависимости от степени нерасчетности течения максимальные отклонения фазы могут увеличиваться или уменьшаться по сравнению с расчетным режимом (в 2 и более раз), в некоторых режимах (например, кривая 4 на рис. 6)

возможно нарушение параболического характера кривой. Изменения фазы при изменении режима могут быть особенно заметны при малых расчетных отношениях давлений на АО, поскольку в этом случае будет проявляться влияние геометрии не только верхней, но и нижней границ струи. Эти особенности, с одной стороны, должны учитываться при изменениях режима работы АО, а с другой стороны, могут быть использованы для малоинерционного точного управления лазерным излучением в случае применения АО в качестве газодинамической линзы.

Список литературы

- [1] *Парментьер Е. М., Гринберг Р. А.* // Ракетная техника и космонавтика. 1973. Т. 11. № 7. С. 59—68.
- [2] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970.
- [3] *Guile R. N., Hilding W. E.* // AIAA Paper. 1975. N 122. P. 1—10.
- [4] *Шеломовский В. В.* // Ученые записки ЦАГИ. 1982. Т. 13. № 1. С. 102—106.
- [5] *Панченко В. И., Гиллерсон А. А., Виноградов Б. С.* // Изв. вузов. Авиационная техника. 1986. № 1. С. 105—107.
- [6] *Бекетова А. К., Белозеров А. Ф., Березкин Л. Н.* и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.

Казанский авиационный институт
им. А. Н. Туполева

Поступило в Редакцию
13 июля 1989 г.
В окончательной редакции
31 мая 1990 г.