

Поскольку в [6] было показано, что для круглых трубок коэффициент давления зависит не только от числа Рейнольдса, но и от отношения внутреннего диаметра трубки к наружному, т. е. $C_p = C_p(Re, d/D)$, то, предположив, что $d/D = \gamma$, запишем соотношение (2) с использованием гидравлического диаметра

$$(3) \quad \pi D_e^2 = D_T/2(H+B)K, \quad \text{откуда} \quad D_e = D_T \sqrt{\frac{2K}{\pi D_T} (H+B)}$$

Здесь K учитывает особенности обтекания плоской микротрубки и определяется требованием, чтобы значения C_p для плоской микротрубки и круглой трубки были равны при одном и том же значении числа Рейнольдса.

Зависимость $K=f(\gamma)$, приведенная на фиг. 4, может быть приближенно описана соотношением

$$(4) \quad K \approx 0.14\gamma^{-5}$$

и была получена из соотношения (3) при известных геометрических размерах плоской микротрубки и отношении $D_e/D_T = Re_T^0/Re_T$, найденном совмещением кривых 1^0-4^0 с кривыми 1-4 на фиг. 3. Таким образом, используя соотношения (3) и (4) при заданных геометрических размерах плоской микротрубки, можно рассчитать диаметр эквивалентной круглой трубки $D_e = D$, у которой зависимость коэффициента давления C_p от числа Рейнольдса будет такой же, как и у плоской микротрубки.

Поступила 29 III 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. *Homann F.* The effect of high viscosity on the flow around a cylinder and around a sphere. *NACA, Tech. mem.*, 1952, No. 1334.
2. *Durand W. F.* *Aerodynamic theory*, vol. 3. Berlin, Springer, 1935.
3. *Barker M.* On the use of very small pitot-tubes for measuring wind velocity. *Proc. Roy. Soc., Ser. A.*, 1922, vol. 101, No. 712.
4. *Hurd C. W., Chesky K. P., Shapiro A. H.* Influence of viscous effects on impact tubes. *J. Appl. Mech.*, 1953, vol. 20, No. 2.
5. *McMillan F. A.* Viscous effects on pitot-tubes at low speeds. *J. Roy. Aeronaut. Soc.*, 1954, vol. 58, No. 524.
6. *Михайлова Н. П., Реник Е. У.* Влияние вязкости на показания трубок полного напора при малых скоростях потока. *Изв. АН СССР, МЖГ*, 1976, № 1.
7. *McMillan F. A.* Viscous effects on flattened pitot-tubes at low speeds. *J. Roy. Aeronaut. Soc.*, 1954, vol. 58, No. 528.
8. *Peterson C. W., George O. L.* Wind tunnel pressure probes: new calibrations for new geometries and flow environments. *AIAA paper*, 1974, No. 635.

УДК 533.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПУСКА КЛИНОВИДНОГО СОПЛА УДАРНОЙ ТРУБЫ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

А. Б. БРИТАН, Ю. В. ЖИЛИН, А. П. МАЗМАНЯНЦ

(Москва)

Приводятся результаты исследования запуска клиновидного сопла ударной трубы. Показано, что в режиме запуска с перерасширением основные потери рабочего времени связаны со вторичной ударной волной и в рассмотренных сечениях сопла занимают около половины всей длительности запуска. Обсуждается применимость полученных результатов для исследования запуска клиновидных сопел различной геометрии.

В настоящее время исследование ударного запуска сопел представляют значительный интерес в связи с моделированием на ударных трубах процессов в газодинамических лазерах. Общая картина установления стационарного потока в соплах изучена достаточно подробно [1, 2]. Начало процесса запуска, как правило, надежно регистрируется любой из используемых экспериментальных методик и связано с приходом в измерительное сечение сопла первичной ударной волны. Значительно сложнее определить полную длительность запуска, так как момент окончания запуска и переход к стационарному истечению часто трудно зарегистрировать из-за сложного характера течения за первичной ударной волной [1].

1. В работе экспериментально исследовался запуск сопла ударной трубы большого диаметра. Диафрагма на входе в сопло отсутствовала. Так как сопло работало с перерасширением, необходимо было убедиться, что за время эксперимента в сечениях, в которых проводились измерения, успевае установиться стационарный режим истечения. Описание экспериментальной установки и методики измерений дано в [3]. При исследовании запуска схема измерения оптического усиления [3] была модифицирована таким образом, что поток зондировался одновременно в двух сечениях. В этих же сечениях в боковой, параллельной потоку стенке сопла устанавливались пленочные датчики. Датчики включались в мостовую схему, и через усилитель сигнал подавался на вход осциллографа.

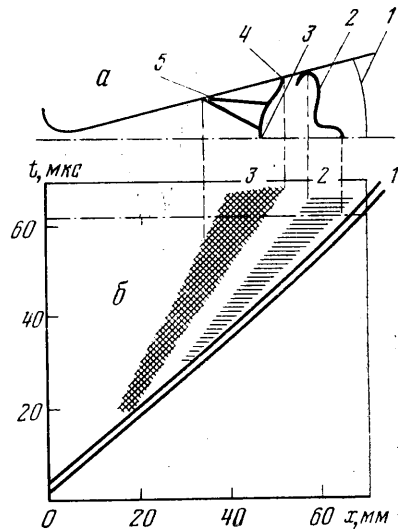
Оптическое исследование процесса запуска сопла проводилось на ударной трубе квадратного сечения, оснащенной теневым прибором и скоростным фоторегистратором [4]. Модель сопла, используемая в оптических измерениях, отличалась от исследуемого сопла только поперечным размером. Регистрация велась в режиме непрерывной фоторазвертки через узкую миллиметровую щель, расположенную вдоль оси сопла. Кроме того, для облегчения процедуры расшифровки фоторазверток получены однократные тепловские фотографии истечения в различные моменты времени относительно начала запуска.

2. Схема расположения волновых фронтов в процессе запуска приведена на фиг. 1, а и соответствует тепловской фотографии, полученной при однократной съемке. Видно, что за первичной ударной волной 1 следует контактная поверхность 2, отделяющая истекающий газ от газа, первоначально заполнявшего сопло. Позади контактной поверхности образуется вторичная ударная волна 3, которая согласовывает давление в нестационарной волне разрежения с давлением за первичной ударной волной. Окончание запуска связано с приходом в измерительное сечение сопла вторичной ударной волны либо нестационарной волны разрежения. В каждом конкретном случае исчерпывающую информацию об этом может дать оптическая визуализация течения. Для расшифровки результатов, полученных с помощью других методик или различных датчиков, необходимо заранее знать тип возмущения, которым определяется окончание запуска (ударная волна или волна разрежения). Наиболее просто рассчитать промежуток времени t_* , за который волна разрежения пройдет расстояние x от критического сечения до измерительного сечения сопла. Если u и a — соответственно локальные значения стационарной скорости потока и скорости звука, то величина t_* , т. е. время заполнения сопла стационарным потоком газа равно

$$t_* = \int_0^x \frac{dx}{u-a}$$

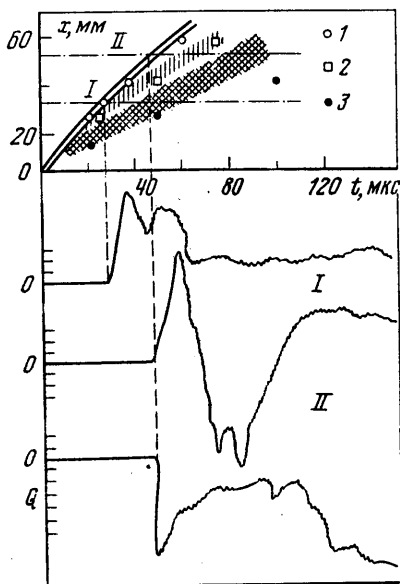
Очевидно, что нестационарная волна разрежения пройдет это же расстояние за время, меньшее чем t_* , так как относительная скорость $(u-a)$ волны разрежения в нестационарном потоке всегда выше, чем в стационарном [5]. Приведенное выражение позволяет рассчитать момент прихода в измерительное сечение сопла первой характеристики отрицательного семейства, движущейся со стационарной скоростью. Величину t_* также называют минимальной длительностью запуска сопла, причем значения t_* , рассчитанные в работе [1], неплохо согласуются с экспериментом в расчетном и близком к расчетному режимах, а также в режимах с недорасширением потока. При запуске сопла с перерасширением начинают сказываться эффекты вязкости и двумерности течения. С ростом перерасширения уменьшается скорость вытеснения вторичной ударной волны, и в конце концов она может занять стационарное положение внутри сопла, препятствуя установлению сверхзвукового течения. Перерасширение приводит к отрыву потока и нарушению одномерности течения.

На фиг. 1, а видно, что при движении по соплу вторичная ударная волна в результате взаимодействия с пограничным слоем на стенках сопла приобретает характерную λ -образную форму. Ее плоская часть 3 заключена внутри области, ограничен-

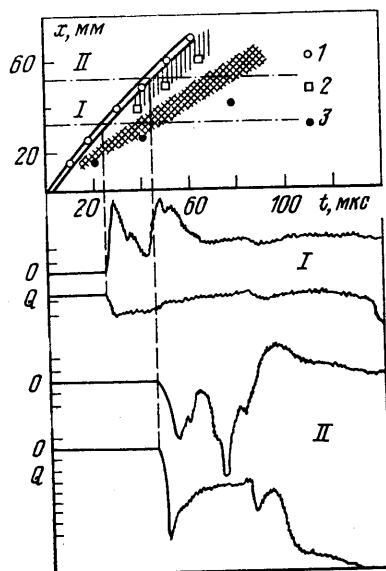


Фиг. 1

ной с одной стороны точкой отрыва потока 5, с другой — точкой присоединения 4. Из графика видно, что подробности течения в этой области проявляются только на тепловых фотографиях. На фоторазвертках фиг. 1, 6 траектория вторичной ударной волны не имеет четких границ и изображена в виде широкой линии (заштрихованная область 3). Пунктиром указаны положения соответствующих возмущений в момент времени $t=62$ мсек после начала запуска, когда была получена теплов-



Фиг. 2



Фиг. 3

ская фотография. Так как размеры зон 3 на фоторазвертке и 4, 5 на схеме достаточно близки, можно утверждать, что размытость изображения зоны 3 связана с процессом взаимодействия вторичной ударной волны с пограничным слоем на боковых, параллельных потоку стенках сопла. Рассчитать траекторию движения вторичной ударной волны по соплу с учетом перечисленных эффектов в настоящее время не

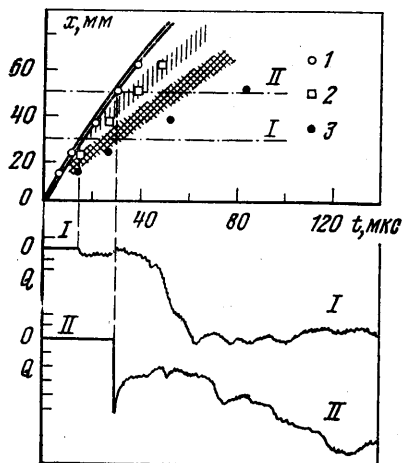
Режим	P_2 , ата	T_2 , °К	P_2/P_1	M_*	B^* , сек ⁻¹
А	4.52	1492	68.84	3.9	0.2
Б	6.67	1884	101.59	4.6	0.227
В	15.6	3169	230.67	6.4	0.3

представляется возможным. Сводка характеристик исследованных режимов приведена в таблице, индекс 5 соответствует параметрам газа на входе в сопло, 1 — невозмущенному газу. Там же приведено значение числа Маха M_* первичной ударной волны в критическом сечении сопла [6]. Рабочая смесь содержала 15% углекислого газа и 85% азота. Результаты исследования режимов А, Б, В представлены соответственно на фиг. 2—4. Фоторазвертки в координатах путь — время, форма сигналов с пленочных датчиков Q и фотосопротивлений I , регистрирующих изменение зондирующего излучения, проходящего поперек потока в сопле¹, представлены в единой временной и размерной шкале. Сложный характер течения за фронтом первичной ударной волны затрудняет подробную интерпретацию сигналов с пленочных датчиков и фотоприемников, однако основные закономерности, отвечающие началу и окончанию запуска, проявляются достаточно надежно при сопоставлении с результатами оптической регистрации. Так, началу запуска соответствует резкий всплеск сигнала,

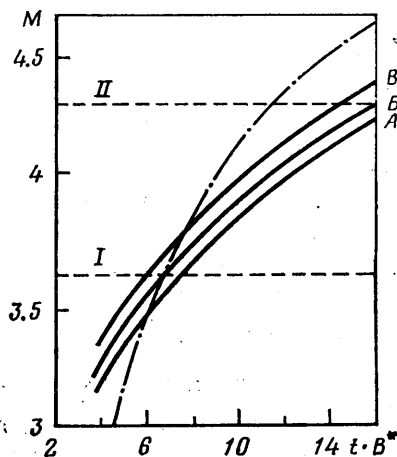
¹ Штрихпунктиром обозначены первое (I) и второе (II) измерительные сечения сопла.

связанный с приходом в измерительное сечение сопла первичной ударной волны, а постоянный уровень сигнала соответствует окончанию запуска и устанавливается после того, как согласно полученным фоторазверткам через сечение сопла пройдет вторичная ударная волна.

3. Анализ полученных результатов удобно проводить в безразмерных координатах, приведенных на фиг. 5. По оси ординат отложены стационарные значения числа Маха потока вдоль оси сопла, а по оси абсцисс — произведение времени t на комплекс



Фиг. 4



Фиг. 5

$V^* = 2 \operatorname{tg}(\alpha/2) a_s / h^*$. Штрихпунктирная кривая позволяет определить минимальное время запуска сопла [7]. При построении траекторий вторичных ударных волн (сплошные линии) использованы координаты средней части заштрихованной области 3 на фоторазвертках. Кривая минимального времени запуска делит фиг. 5 на две части. Если траектория вторичной ударной волны лежит левее штрихпунктирной кривой, то длительность запуска соответствует минимальной и определяется волной разрежения. Если правее, появляются дополнительные потери, связанные со вторичной ударной волной. Используя данные, приведенные на фиг. 5 и в таблице, можно показать, что полная длительность запуска и дополнительные потери увеличиваются с удалением измерительного сечения от горла сопла и с уменьшением перепада давления на входе. Так, например, полная длительность запуска для режима А увеличивается от 35 мксек в первом сечении до 60 мксек во втором (фиг. 2). При этом согласно фиг. 5 вторичная ударная волна приходит в первое сечение на 4 мксек, а во второе — на 27 мксек позже волны разрежения. Следовательно, потери, связанные со вторичной ударной волной, занимают в первом сечении 11,4%, а во втором — до 45% величины полной длительности запуска. С учетом размытости изображения траектории вторичной ударной волны на фоторазвертках приведенные значения потерь следует увеличить в среднем на 10% их величины. На фиг. 2–4 приводятся сравнение результатов оптического исследования с расчетом.

Использованный метод стационарного расширения [7] позволяет достаточно точно рассчитать траектории первичной ударной волны 1 и контактной поверхности 2 (соответствующие траектории, полученные из расчета обозначены точками). Существенное расхождение с экспериментом рассчитанной траектории вторичной ударной волны 3, по-видимому, объясняется одномерной постановкой расчета и упрощенностью модели течения [7]. Отметим, что данный метод может использоваться только для приближенных оценок длительности запуска.

Анализируя результаты эксперимента, следует отметить, что длительности запуска, определяемые по показаниям фотоприемников и пленочных датчиков, хорошо согласуются между собой, но систематически превышают на 10–20 мксек значения, определяемые по фоторазверткам. В рассмотренных режимах большую роль играют пристеночные взаимодействия, поэтому причина расхождения, возможно, в различном характере нарастания пограничного слоя на боковых стенках модели сопла, изготовленных из полированного стекла и на металлических стенках исследуемого сопла.

В целом совпадение результатов, полученных на различных установках с помощью принципиально различных методик, позволяет в дальнейшем использовать ме-

тодики пленочной термометрии и поглощения ИК излучения для исследования запуска сопл, не проводя дополнительного оптического исследования. Однако при этом необходимо провести предварительные оценки длительности запуска по одной из приближенных методик, например [7], и затем с помощью эксперимента уточнить полученные значения.

В заключение укажем, что проведенное исследование охватывает широкий диапазон параметров на входе в сопло, реализуемых в экспериментах на ударных трубах. Для данного диапазона с учетом отклонений, связанных с изменением состава смеси, результаты, приведенные на фиг. 5, могут быть использованы для определения длительности запуска клиновидных сопл различной геометрии.

Авторы благодарят за полезные советы и обсуждения О. П. Шаталова, Л. Г. Гвоздеву, а также Ю. В. Акимова за помощь в проведении экспериментов.

Поступила 17 I 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. *Smith C. E.* Starting process in a hypersonic nozzle. *J. Fluid Mech.*, 1966, vol. 24, No. 4.
2. *Atann H. O.* Experimental study of the starting process in a reflection nozzle. *Phys. Fluids*, 1969, vol. 12, No. 5, Pt 2.
3. *Лосев С. А., Макаров В. Н., Павлов В. А., Шаталов О. П.* Исследование процессов в газодинамическом лазере на ударной трубе большого диаметра. *Физика горения и взрыва*, 1973, т. 9, № 4.
4. *Гвоздева Л. Г., Жилин Ю. В.* Формирование квазистационарной струи внутри сопла в процессе его ударного запуска. *Изв. АН СССР, МЖГ*, 1977, № 1.
5. *Абрамович Г. Н.* Прикладная газовая динамика, М., «Наука», 1969.
6. *Бриган А. Б., Мазманяц А. П.* Исследование газодинамических характеристик ударной трубы большого диаметра с соплом. *Науч. тр. Ин-та мех. МГУ*, 1976, № 43.
7. *Бриган А. Б.* Формирование течения в плоском сопле ударной трубы. *Науч. тр. Ин-та мех. МГУ*, 1976, № 43.

УДК 533.6.011

ОБ ОДНОМ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОМ НЕСТАЦИОНАРНОМ ДВИЖЕНИИ ГАЗА

В. А. ДВОРНИКОВ

(Томск)

Найдено решение системы уравнений, описывающей плоскопараллельные нестационарные потенциальные течения идеального газа, при условии, что компоненты скорости газа зависят от полярного угла θ и времени t .

Система уравнений, описывающая нестационарные потенциальные течения идеального газа в полярной системе координат, имеет вид [1]

$$(1) \quad \frac{\partial a}{\partial t} + N \frac{\partial a}{\partial r} + \frac{1}{r} \left[(\gamma-1)a \frac{\partial(Nr)}{\partial r} + T \frac{\partial a}{\partial \theta} + (\gamma-1)a \frac{\partial T}{\partial \theta} \right] = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{2} (N^2 + T^2) + \frac{a}{\gamma-1} \right] = 0, \quad \frac{\partial N}{\partial \theta} - \frac{\partial}{\partial r} [rT] = 0$$

Здесь N , T — соответственно радиальная, тангенциальная компоненты скорости газа, a — квадрат скорости звука. Найдем решение системы (1), полагая, что компоненты скорости N , T зависят только от угла θ и времени t . Это условие можно трактовать, как наложение дополнительной дифференциальной связи на систему (1). С учетом такого условия на скорость и последних двух уравнений системы (1) запишем выражения a , N , T в виде

$$(2) \quad N = f(\theta, t), \quad T = f_\theta'(\theta, t), \quad a = -(\gamma-1)[rf_t' - \psi(\theta, t)]$$

Здесь $\psi(\theta, t)$, $f(\theta, t)$ — пока произвольные функции.

Из структуры записи (2) видно, что эти решения при $f_t' \neq 0$ не включаются в хорошо известные классы плоскопараллельных течений с дополнительными дифференциальными связями — простые и двойные волны [2-6]. Поэтому интересно найти окончательный вид решений (2). Подставляя a , N , T из (2) в первое уравнение (1), приходим к переопределенной системе обыкновенных дифференциаль-