

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

К. К. Ким, Д. Д. Томилин

(Новосибирск)

Описывается измерение плотности воздуха при помощи интерферометра в сверхзвуковом сопле прямоугольного поперечного сечения. Исследована структура потока в реальном сопле Лавалья. Показано, что в ядре потока течение следует законам движения идеального газа и имеет волновой характер. Для толщин пограничных слоев на стенках сопла получено соотношение $\delta_z = (3 \div 4) \delta_y$ при отношении ширины сопла к высоте $L/h = 3,75 \div 7,5$.

Структура потока в реальном сверхзвуковом сопле может существенно отличаться от расчетной не только из-за дефектов, допущенных при его изготовлении, но также вследствие нарастания пограничных слоев на стенках сопла. В ряде случаев важно знать параметры сверхзвукового потока именно в реальном сопле. Определение этих параметров (плотности ρ , давления p , температуры T , скорости u , числа Маха M) в любом сечении исследуемого сопла и будет целью данной работы.

1. При исследованиях в сопле Лавалья возникают специфические трудности, связанные с большими градиентами плотности воздуха вдоль сопла и с появлением зоны размытости интерференционной картины за горловым сечением при выходе на расчетный режим. Зона размытости появляется при малых перепадах давления, достаточных, однако, для установления звуковой скорости в горле сопла, и смещается вниз по потоку по мере увеличения давления перед соплом. Аналогичная картина наблюдается при обтекании околосзвуковым потоком одиночных профилей и решеток [1].

Исследуемый участок сопла состоял из двух стальных блоков и двух плоскопараллельных пластин, изготовленных из оптического стекла ЛК-5, которые образуют две другие стенки канала. Контур сверхзвукового участка сопла для простоты изготовления выполнен прямолинейным, так как условие однородности потока на выходе сопла не было решающим. Сопло помещалось в рабочее плечо интерферометра Майкельсона. В качестве источника света использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения $\lambda = 0,6328 \text{ мк}$. Будучи идеальным монохроматическим источником, лазер очень упрощает юстировку интерферометра. Для получения равномерного светового поля лазерный луч пропусклся через вращающийся матовый фильтр.

В установке предусмотрена возможность измерения полного давления p_0 и температуры торможения T_0 воздуха, поступающего в сопло. Давление измерялось образцовым пружинным манометром, а температура — хромель-копелиевой термопарой. Кроме того, замерялись атмосферное давление p_a и температура T_a . Вдоль профиля сопла, на верхней и нижней стенках, были сделаны дренажные отверстия для замера статических давлений. Последние измерялись посредством U-образных ртутных манометров, смонтированных на общем щите. Пневмометрический метод использовался в данной работе как контрольный.

2. Плотность ρ в какой-либо точке сжимаемой среды пропорциональна смещению интерферометрической полосы в этой точке по сравнению с ее первоначальным положением и определяется формулой [2]:

$$\rho = \rho_a + CS \left(C = \frac{\lambda \rho'}{2L(n' - 1)} = \text{const} \right) \quad (2.1)$$

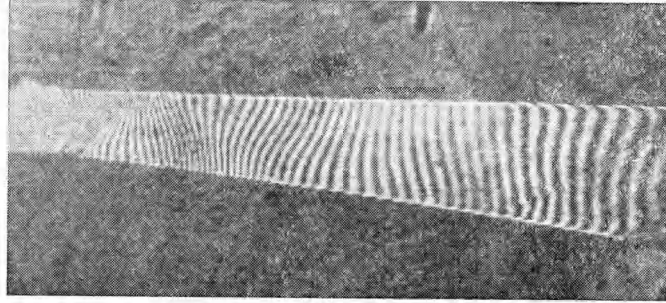
Здесь ρ_a — плотность стандартного поля (невозмущенная атмосфера), S — смещение полосы, λ — длина волны монохроматического источника света, $2L$ — удвоенная ширина сопла, ρ' , n' — плотность и показатель преломления воздуха при $t = 20^\circ \text{ C}$ и давлении 760 мм рт. ст.

Отработан следующий способ расшифровки интерферограмм. Интерференционная картина с пятикратным увеличением проектируется на экран из белой бумаги. Контур сопла и середины черных полос фиксируются карандашом, выделяется полоса нулевого порядка. В качестве последней выбирается одна из полос, не попадающая при возмущении в область размытости интерференционной картины и не выходящая за пределы исследуемого поля. В центр этой полосы устанавливается перекрестие компаратора, закрепленного на экране и снабженного микрометрическим винтом. После этого плавно открывают вентиль трубопровода, по которому подается в сопло высоконапорный воздух. Перемещая перекрестие компаратора, следят за полосой нулевого порядка до тех пор, пока не установится требуемый режим. На экране при этом наблюдается интерференционная картина смещенных полос (фиг. 1).

Вновь фиксируются середины черных полос и конечное положение полосы нулевого порядка. Затем так же плавно вентиль закрывается, и путем непрерывного слежения за полосой нулевого порядка проверяется ее совпадение с первоначальным положением. Интерферограмма смещенных полос совмещается таким образом с интерферограммой невозмущенных полос, и между номерами полос устанавливается правильное соответствие (фиг. 2).

Обработка интерферограмм сводится к измерению смещений S интерференционных полос в исследуемом поле относительно их первоначального положения.

Если течение будет изоэнтропическим и известны величины давления p_0 и температуры T_0 заторможенного потока, то по найденной плотности остальные параметры потока определяются известными соотношениями газовой динамики.



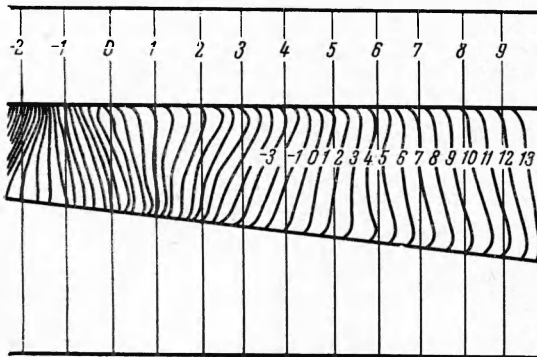
Фиг. 1.

Следует иметь в виду, что интерферометрический метод суммирует возмущения по длине луча и не позволяет выявить локальные неоднородности поля. Это и составляет основной источник ошибок, так как само по себе измерение смещений полос может про-

изводиться с высокой точностью.

Нарастающий на боковых стеклянных стенках пограничный слой вызывает отклонение видимой картины от плоской. Вследствие более низкой плотности в пограничном слое плотность воздуха в ядре потока, определенная по смещению полос, будет ниже ее действительного значения. Действительная плотность вне пограничного слоя ρ_e связана с кажущейся плотностью ρ , определенной по формуле (2.1), следующим образом [2]

$$\rho_e = \rho + \frac{2}{L} \int_0^{\delta} \Delta\rho(z) dz \quad (2.2)$$



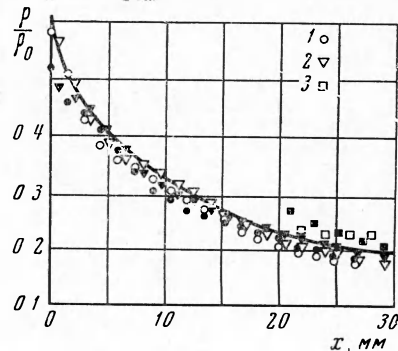
Фиг. 2

Здесь δ — толщина пограничного слоя на стекле, $\Delta\rho(z)$ — разность плотностей в ядре потока ρ_e и в пограничном слое $\rho(z)$ на расстоянии z от стеклянной стенки.

3. Результаты обработки интерферограмм в координатах ρ/ρ_0 (относительная плотность) и x (расстояние вдоль сопла от горлового сечения) представлены на фиг. 3; точки 1 и 2 соответствуют значениям $p_0 = 3.5$ и 4.1 кг/см², точки 3 — данные, полученные в результате обработки пневмометрических замеров для тех же значений давления воздуха перед соплом. Светлые точки соответствуют точкам замера вдоль верхней стенки сопла, зачерненные — вдоль нижней стенки.

Сопло было рассчитано по одномерной теории и методом характеристик без учета толщины пограничного слоя. Данные расчетов по обоим методам практически совпали. Расхождение экспериментальных точек с теоретической кривой не превышает 5—7%.

Из визуальных наблюдений и анализа распределения плотности, полученного в результате обработки интерферограмм, видно, что вдоль сопла распространяется слабая волна расширения, характерная для сверхзвукового течения в плоском канале с углом



Фиг. 3

вой точкой. Движение волны расширения вдоль сопла совпадает с картиной течения, полученной методом характеристик.

Пограничный слой на металлических стенках сопла хорошо просматривается благодаря резкому искривлению интерференционных полос, его толщина δ_y составляет в выходном сечении сопла $0.6 \div 0.85$ мм при числе Рейнольдса $R_x = 1.35 \cdot 10^6$ и числе Маха $M \approx 2$. В окрестностях горла сопла толщина пограничного слоя пренебрежимо мала, на интерферограммах ее не удается измерить.

Эти результаты хорошо согласуются с данными работы [8], где при $R_x = (2.8-3.5) \cdot 10^6$ и $M = 2.3$ толщины пограничного слоя заключены в интервале от 0.6 до 1.4 мм. При этом давления перед соплом не превышали $2 \div 5$ кг/см².

Оценка толщины пограничного слоя δ_z на стеклянной стенке, произведенная по формуле (2.2), дает $\delta_z = (3 \div 4) \delta_y$ при $L/h = 3.75 \div 7.5$, где L — ширина сопла, h — его высота.

Авторы выражают благодарность Коронкевичу В. П. за оказанную помощь в работе.

Поступила 15 IV 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Зыкина - Моложен Л. М., Шапиро И. Г. Интерферометрическое исследование обтекания компрессорной решетки профилей. Аэродинамика, кн. 27, М., Машгиз, 1954.
2. Физические измерения в газовой динамике и при горении. М., Изд-во иностр. лит-ры, 1957.
3. Ладенбург Р., Бершадер Д. О ламинарном и турбулентном пограничном слое в сверхзвуковом потоке. Механика. Сб. сокр. перев. и рефератов иностр. период. лит-ры, 1950, вып. 1.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАДИУСА ВОЗДУШНОГО ВИХРЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКЕ

М. А. Гольдштик, Г. П. Зыкин, Ю. И. Петухов, В. Н. Соржин

(Новосибирск)

Для вычисления радиуса воздушного вихря чаще всего используется широко известный принцип максимума расхода [1]. Однако теоретически этот принцип не был обоснован. Наряду с ним предложены другие экстремальные принципы (например, [2]), дающие близкие результаты.

Известен ряд попыток обоснования принципа максимума расхода [3,4]. Однако в этих работах по существу показано, что данный принцип допускает различные эквивалентные формулировки. Здесь важно отметить, что принцип максимума расхода сформулирован для водосливов с широким порогом, частным случаем которых является центробежная форсунка с длинным соплом. Поэтому наиболее безукоризненно его применение для идеального случая бесконечного сопла [1]. Дальнейшее рассмотрение проведено в предположении, что сопло бесконечно длинно (явления в выходном сечении сопла не учитываются).

В рамках гидравлической постановки задачи, которая до настоящего времени только и рассматривалась, использование экстремальных принципов или иных дополнительных условий является необходимым. Целью данной работы является гидродинамическое решение задачи о течении идеальной жидкости в геометрии, отличающейся указанным образом от геометрии реальной центробежной форсунки. В такой постановке задача относится к числу типичных задач теории струй идеальной жидкости, для решения которых дополнительные условия типа экстремальных принципов не нужны. Роль соотношения, недостающего для замыкания системы уравнений в гидравлической постановке, играет условие потенциальности течения идеальной жидкости. Гидродинамические методы решения задачи позволяют вскрыть физический смысл принципа максимума расхода.

1. Численное решение задачи. Рассмотрим осесимметричное течение идеальной несжимаемой жидкости в области, показанной на фиг. 1. Здесь $DCC'D'$ — участок бесконечного сопла. В расчетах сечение CC' считается достаточно удаленным от входа, так что течение в нем можно считать однородным, $ABB'A'$ — свободная поверхность жидкости. Закрученный поток жидкости поступает через $FEE'F'$. Полный расход жидкости Q и циркуляция скорости Γ заданы.