

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ С НУЛЕВЫМ ИЗБЫТОЧНЫМ ИМПУЛЬСОМ

А. С. ГИНЕВСКИЙ, К. А. ПОЧКИНА, Л. Н. УХАНОВА

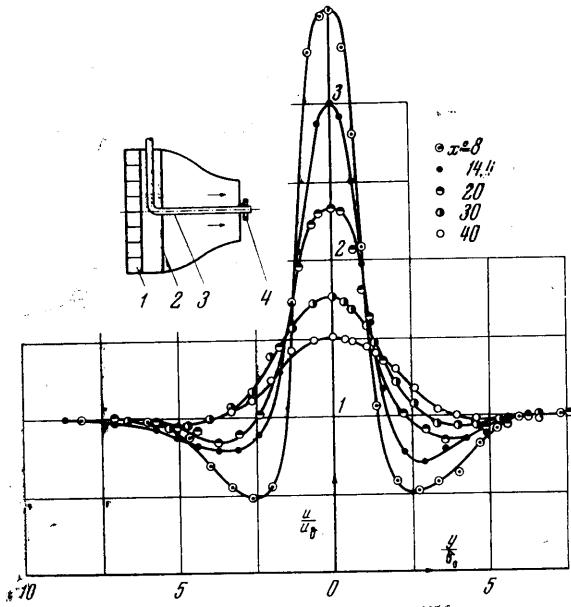
(Москва)

В настоящее время подробно изучены закономерности распространения плоских и осесимметричных турбулентных струйных течений для тех случаев, когда избыточный импульс

$$I = 2\pi j \rho \int_0^{\delta} u(u - u_{\delta}) y^j dy$$

либо положителен, либо отрицателен. Первый случай соответствует струе в спутном потоке ($u > u_{\delta}$), второй — турбулентному следу за телом. Здесь u — продольная составляющая скорости, u_{δ} — скорость спутного потока, δ — радиус струи, ρ — плотность жидкости, $j = 0$ и $j = 1$ соответствуют плоскому и осесимметричному течению.

В ряде случаев, однако, представляет интерес рассмотрение турбулентного струйного течения с нулевым избыточным импульсом, когда в поперечных сечениях струи $u \leq u_{\delta}$. Такое течение, в частности, образуется за самодвижущимися объектами, у которых на режиме установившегося прямолинейного движения сила тяги в точности равна силе сопротивления (следы гидродинамических движителей). Конкретный



Фиг. 1

вид такого течения зависит от взаимного расположения движителя и источника сопротивления. Наибольший интерес представляет тот случай, когда движитель располагается на оси симметрии струйного течения.

Необходимо отметить, что струйные течения с нулевым избыточным импульсом изучены мало. Экспериментальное исследование таких течений, по-видимому, не производилось. Что касается теоретических исследований, то лишь в книге Г. Биркгофа и Э. Саарантонелло [1] дается линеаризованное решение, справедливое на большом расстоянии от тела, где скорость весьма мало отличается от скорости спутного потока. Из этого решения, в частности, следует, что следы гидродинамических движителей затухают быстрее, по сравнению с обычными следами. Другим отличительным свойством этих следов является уменьшение с удалением от тела локального числа Рейнольдса, определенного по эффективному поперечному размеру струйного течения и по некоторой характерной разности скоростей. Аналогичное явление, как известно, имеет место для обычного осесимметричного турбулентного следа [2]. Таким образом, на достаточно большом удалении от тела, вследствие уменьшения локального числа Рейнольдса, существует тенденция к переходу турбулентного течения в ламинарное.

В настоящей заметке излагаются некоторые результаты экспериментального исследования осесимметричных течений с нулевым избыточным импульсом на небольшом удалении от источника возмущения, где местные скорости заметно отличаются от скорости спутного потока и течение является полностью турбулентным.

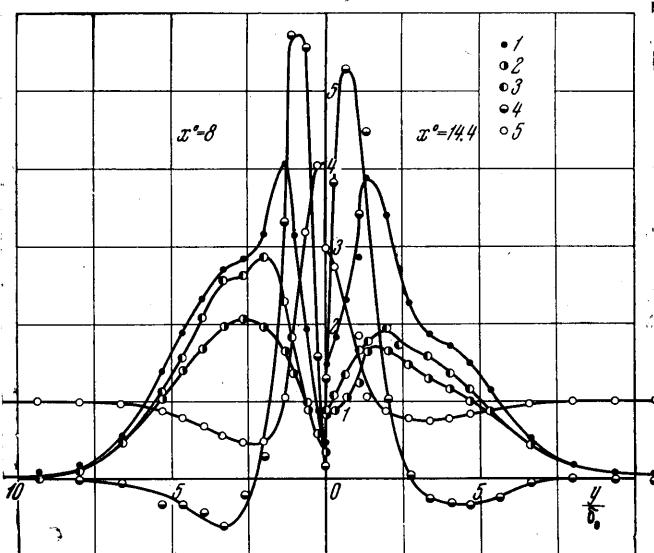
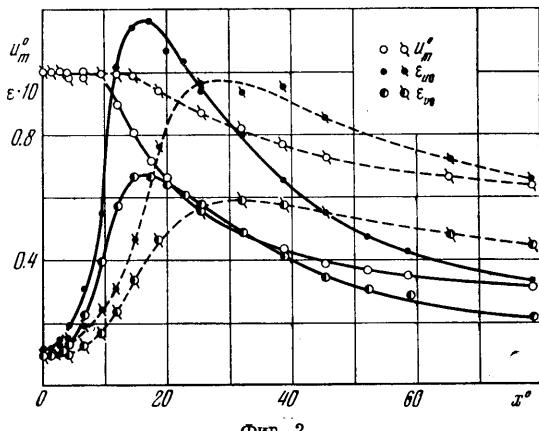
Эксперимент был поставлен в аэrodинамической трубе с открытой рабочей частью. Диаметр выходного сечения сопла равен 440 мм, скорость истечения $u_{\delta} = 0-45$ м/сек. Вдоль оси симметрии сопла располагается трубопровод, заканчивающийся соплом с диаметром выходного сечения $2\delta_0 = 15$ мм, скорость истечения $u_0 \approx 100$ м/сек. Концентрично с осью симметрии в выходном сечении малого сопла на тонких проволочных тягах закреплялось кольцо, обтекание которого спутным потоком позволяло получить профиль скорости в следе, (фиг. 1) Здесь 1 — хонейкомб, 2 — выравнивающая сетка, 3 — трубопровод, 4 — кольцо.

При фиксированной скорости спутного потока $u_{\delta} = \text{const}$ в начале эксперимента подбиралось такое значение скорости истечения u_0 , при котором избыточный импульс

в выбранном поперечном сечении оказывается равным нулю. Поскольку в изучаемом течении продольный градиент давления практически отсутствует, то избыточный импульс должен меняться вдоль по потоку незначительно, т. е. в пределах погрешности измерений. Экспериментальная проверка подтвердила постоянство нулевого избыточного импульса во всех поперечных сечениях струи.

Измерения осредненной скорости производились при помощи трубы Пито. Кроме того, при помощи термоанемометрической аппаратуры крестообразным термонасадком производилось измерение средних скоростей, трех компонент пульсационной скорости и корреляции между продольными и поперечными пульсациями скорости в одной точке. Отсюда элементарным пересчетом определялись значения рейнольдсова напряжения сдвига [8]. Измерения средней скорости крестообразным термонасадком и трубкой Пито дали хорошо согласующиеся между собой результаты.

На фиг. 1 показаны профили скорости осесимметричного струйного течения с нулевым избыточным импульсом на различных расстояниях от сопла $x^o = x / \delta_0$ при отношении скорости спутного потока к скорости истечения, равном $m = u_\delta / u_0 = 0.26$. Здесь, прежде всего, обращает на себя внимание слабое нарастание вдоль по потоку ширины струйного течения. В каждом поперечном сечении профиль скорости может быть условно разделен на две части: «струйную» в средней части, простирающуюся от точки максимума до точки минимума скорости, и «следнюю», простирающуюся от точки минимума скорости наружу до точки, где $u = u_\delta$. Можно полагать, что особенности рассматриваемого течения в основном обусловлены взаимодействием обоих указанных выше течений: «струйного» и «следового».



Фиг. 3

На фиг. 2 представлено изменение вдоль оси x параметров течения струи с нулевым избыточным импульсом ($I = 0$, сплошная кривая) и струи в спутном потоке ($I > 0$, пунктир) при одинаковом значении параметра $m = 0.26$. Здесь $u_m^o = u_m / u_0$, u_m — скорость на оси, $e_{u0} = \sqrt{\langle u'^2 \rangle} / u_0$, $e_{v0} = \sqrt{\langle v'^2 \rangle} / u_0$ — безразмерные среднеквадратич-

ные значения продольной и поперечной составляющих пульсационной скорости. Отсюда видно, что затухание осредненных и пульсационных характеристик струйного течения с нулевым избыточным импульсом происходит гораздо интенсивнее по сравнению со струей с положительным избыточным импульсом. Таким образом, установка кольца около сопла при истечении струи в спутный поток создает значительную начальную неравномерность и тем самым способствует интенсификации турбулентного обмена.

Профили скорости, интенсивности турбулентности трех компонент пульсационной скорости $\varepsilon_u = \sqrt{\langle u'^2 \rangle} / u$, $\varepsilon_v = \sqrt{\langle v'^2 \rangle} / u$, $\varepsilon_w = \sqrt{\langle w'^2 \rangle} / u$ и рейнольдсова напряжение сдвига $\langle u'v' \rangle / u_{\delta}^2$ представлены на фиг. 3 для двух поперечных сечений: $x^\circ = 8$ (левая часть) и $x^\circ = 14.4$ (правая часть) в функции безразмерной поперечной координаты y / δ_0 . Здесь 1 — $\varepsilon_u \cdot 10$, 2 — $\varepsilon_v \cdot 10$, 3 — $\varepsilon_w \cdot 10$, 4 — $80 \cdot \langle u'v' \rangle / u_{\delta}^2$, 5 — u / u_{δ} .

Таким образом, профили интенсивности турбулентности в рассматриваемом течении заметно отличаются от аналогичных профилей осесимметричной струи в спутном потоке [8]. Необходимо заметить, что рейнольдсово напряжение сдвига приблизительно равно нулю в точках минимума скорости, т. е. на стыке «струйной» и «следной» частей профиля скорости, причем для каждого из этих участков профили рейнольдсовых напряжений сдвига близки к соответствующим профилям для струи и следа.

Последнее обстоятельство свидетельствует, что параметры осредненного течения в следах гидродинамических движителей могут быть определены на базе известных полуэмпирических теорий турбулентности и приближенных интегральных расчетных методов.

Поступило 4 VIII 1966

ЛИТЕРАТУРА

- Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. Изд. «Мир», 1964.
- Таунсенд А. А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. Изд. иностр. лит., 1959.
- Гиневский А. С., Илизарова Л. И., Шубин Ю. М. Исследование микроструктуры турбулентной струи в спутном потоке. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ В СПУТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Г. Н. АБРАМОВИЧ, О. В. ЯКОВЛЕВСКИЙ, И. П. СМИРНОВА, А. Н. СЕКУНДОВ,
С. Ю. КРАШЕНИННИКОВ

(Москва)

Излагаются результаты исследования газодинамических параметров и геометрических характеристик зоны смешения осесимметричных струй газов различной плотности (фреона-12, воздуха и гелия), распространяющихся в спутном потоке воздуха, в пределах начального участка ($0 \leq x / R \leq 3-30$). Приводятся экспериментальные данные о влиянии различия плотностей ($0.27 \leq n \leq 8.2$) и скоростей ($0 \leq m \leq 1.7$) газовой струи и спутного потока на процесс смешения.

1. Теория и практика струйных течений нуждаются в экспериментальном материале по смешению струй существенно различающейся плотности, который имеется в очень ограниченном количестве лишь для основного участка струи и совершенно отсутствует для ее начального участка. Настоящая работа посвящена изучению начального участка струи в спутном потоке существенно отличной плотности и должна в некоторой мере восполнить этот пробел.

Исследования проводились на специальной модели, позволявшей осуществлять осесимметричные коаксиальные потоки различных газов. Система трубопроводов и электроподогревателей обеспечивала подачу через внутренний и наружный контуры установки следующих газов: воздуха (молекулярный вес $\mu = 29$), фреона-12 ($\mu = 121$) и гелия ($\mu = 4$) с начальной температурой от 20 до 300° С. Модель состояла из внутреннего и внешнего сопел и цилиндрической камеры, где происходило смешение. Профилирование сопел (закон изменения площади проходного сечения) было выполнено по Витошинскому при степени поджатия 5. Внутренний диаметр внешнего сопла (и камеры смешения) составлял 150 мм, диаметр внутреннего сопла составлял 20 или 50 мм. Для выравнивания потоков перед соплами и в подводящих магистралях устанавливались специальные решетки с отношением площади проходного сечения к площади сечения трубопроводов 0.4. Интенсивность турбулентности на выходе из сопел, измеренная при помощи термоанемометра, не превышала 1—1.5%. Термоанемометрические измерения, проведенные при смешении воздушных потоков примерно