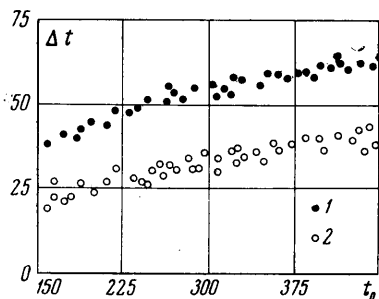
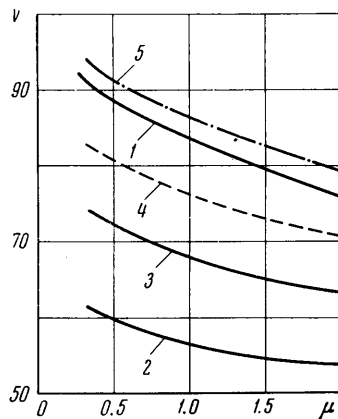


раметры потока зависят от одной координаты, силы тяжести частиц и их объем пренебрежимо малы, частицы сферические и одного размера. Коэффициент сопротивления частицы взят в форме, предложенной Л. С. Клячко [2]. Процесс течения газа с твердыми частицами описывается системой дифференциальных уравнений, приведенной в работе [3]. Параметры потока на входе в сопло подбирались такими, чтобы обеспечивались расходы воздуха, указанные на фиг. 2. При критическом режиме истечения ( $G = (8-10) \cdot 10^{-3}$  кг/сек) начальные значения параметров соответствовали числу Маха в выходном сечении сопла, равному единице. Решение системы уравнений производилось методом Рунге — Кутты на ЭЦВМ «Урал-2». На фиг. 4 представлен результат расчета скорости частиц  $v$  м/сек в зависимости от концентрации твердой фазы  $\mu$  при расходах воздуха  $G = 1 \cdot 10^{-2}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$  (кривые 1 и 2 соответственно) и  $G = 8 \cdot 10^{-3}$  (кривые 3, 4, 5), сплошные кривые соответствуют начальной температуре смеси  $t_0 = 160^\circ$ , штриховые —  $t_0 = 250^\circ$ , штриховые с точками —  $t_0 = 400^\circ$ .



Фиг. 3



Фиг. 4

Из приведенных данных эксперимента и расчета видно, что при скоростях частиц порядка  $\sim 80$  м/сек температура торможения исследованного двухфазного потока выше температуры смеси на входе в сопло на 35%. Это обстоятельство необходимо учитывать при конструировании и выборе материала деталей и узлов машин, подверженных воздействию двухфазной струи высокой температуры.

Поступило 27 III 1969

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cose D. A., Lee B. T. Heat transfer from an impinging rocket jet. AIAA Journal, 1965, vol. 3, No. 1. (Рус. перев.: Ракетная техника и космонавтика, Мир, 1965, № 1, стр. 255—257.)
2. Клячко Л. С. Уравнения движения пылевых частиц в пылеприемных устройствах (По поводу статьи Т. С. Вавакина «О витании шарообразных тел в воздухе», помещенной в журнале «Отопление и вентиляция», 1933, № 2, 3, 4). Отопление и вентиляция, 1934, № 4.
3. Bailly W. S., Nilson E. N., Serra R. A., Zupnik T. F. Gas-particle flow in an axisymmetric nozzle. ARS Journal, 1961, vol. 31, No. 6, pp. 793—799.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОЙ  
ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ

Л. А. ВУЛИС, И. А. КЕЛЬМАНСОН, И. Б. ПАЛАТНИК

(Ленинград)

Излагаются результаты экспериментального исследования плоской затопленной струи воздуха. Проводится распределение средней скорости, пульсаций продольной и поперечной компонент скорости, касательного напряжения трения, коэффициента корреляции в поперечных сечениях струи. Результаты измерений сопоставлены с данными других авторов.

Исследованию структуры турбулентной осесимметричной струи, т. е. подробному измерению полей средних и пульсационных характеристик, посвящено значительное число работ [1-6 и др.]. Для плоской турбулентной струи аналогичных данных существенно меньше. В последнее время появились работы с достаточно подробными данными о структуре плоской струи [7, 8], но они, главным образом, относятся к автомодельным течениям на значительном удалении от устья струи ( $x/2h \approx 100$ , где  $h$  — полуширина щели).

Проводимые ниже результаты измерений, выполненных на плоской турбулентной струе воздуха, дают дополнительную информацию о развитии струи на участке первых пятнадцати калибров ( $0 \leq x/2h \leq 15$ ). В опытах плоская струя воздуха вытекала из профилированного сопла с выходным сечением  $20 \times 300$  мм<sup>2</sup>. Скорость истечения в основной части опытов была равна 58 м/сек, число Рейнольдса  $R = 2u_0 h / \nu = 77.5 \cdot 10^3$ .

Во всей исследованной области течение оставалось плоским, что контролировалось измерением динамического давления вдоль длины сопла на различных расстояниях от его среза.

Измерялись распределения полного напора трубкой Пито с внешним диаметром 0.8 мм и пульсационные характеристики с помощью электротермоанемометра ЭТАМ-3А. Измерения пульсаций проводились однониточным насадком из вольфрамовой нити диаметром 15 мк. Аппаратура ЭТАМ-3А имеет усилитель ЭСУ-2А с компенсацией тепловой инерции нагретой нити (постоянная времени порядка 1 мкс<sup>-1</sup>).

Для определения поперечной составляющей пульсации скорости и касательного напряжения трения применялась следующая методика: для каждой измерительной точки производилась запись показаний при трех значениях угла поворота насадка относительно вектора скорости. Полученные таким путем данные позволяют рассчитать для каждой точки потока локальные значения <sup>2</sup> компонент  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$  и произведения  $\langle u'v' \rangle$ . Ошибка при вычислении пульсационных величин с учетом погрешностей методики измерения составляла 15%, ошибка при измерении динамического давления трубкой Пито не превышала 2%. Подробные экспериментальные данные, полученные при измерениях в плоской затопленной струе воздуха в сечениях на расстояниях  $x/2h = 2, 5, 7, 10$  и 15 калибров от устья сопла, представлены на фиг. 1.

В левом столбце графиков на фиг. 1 изображены кривые изменения динамического давления и градиента средней скорости  $du/dy$ . Методом эквивалентной задачи теории теплопроводности [9] был проведен расчет профилей средней скорости в этих сечениях. Расчет, как и в других случаях, дал хорошее согласие с опытом; на фиг. 1 (слева) сплошной линией нанесен расчетный профиль средней скорости. На этой же серии графиков (левый столбец на фиг. 1) приведены экспериментальные кривые значений

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{\langle u'^2 \rangle}}{u_0}, \quad \varepsilon_v = \frac{\sqrt{\langle v'^2 \rangle}}{u_0}$$

В пределах экспериментального разброса значения  $\varepsilon_u$  и  $\varepsilon_v$  удовлетворительно описывается одной кривой. Эта кривая на расстоянии  $x/2h = 2$  имеет ярко выраженный максимум; постепенно по мере удаления от устья струи этот максимум расплывается и смещается от кромки сопла во внешнюю часть зоны смешения. На той же фиг. 1 (справа) приведены расчетные (кривые 1) и экспериментальные кривые распределения касательного напряжения трения. Расчет производился по двухчленной формуле, предложенной в работе [10] для турбулентного напряжения трения

$$\tau_T = \rho \frac{\partial u^2}{\partial y} \frac{d\xi}{dx} + \rho uv$$

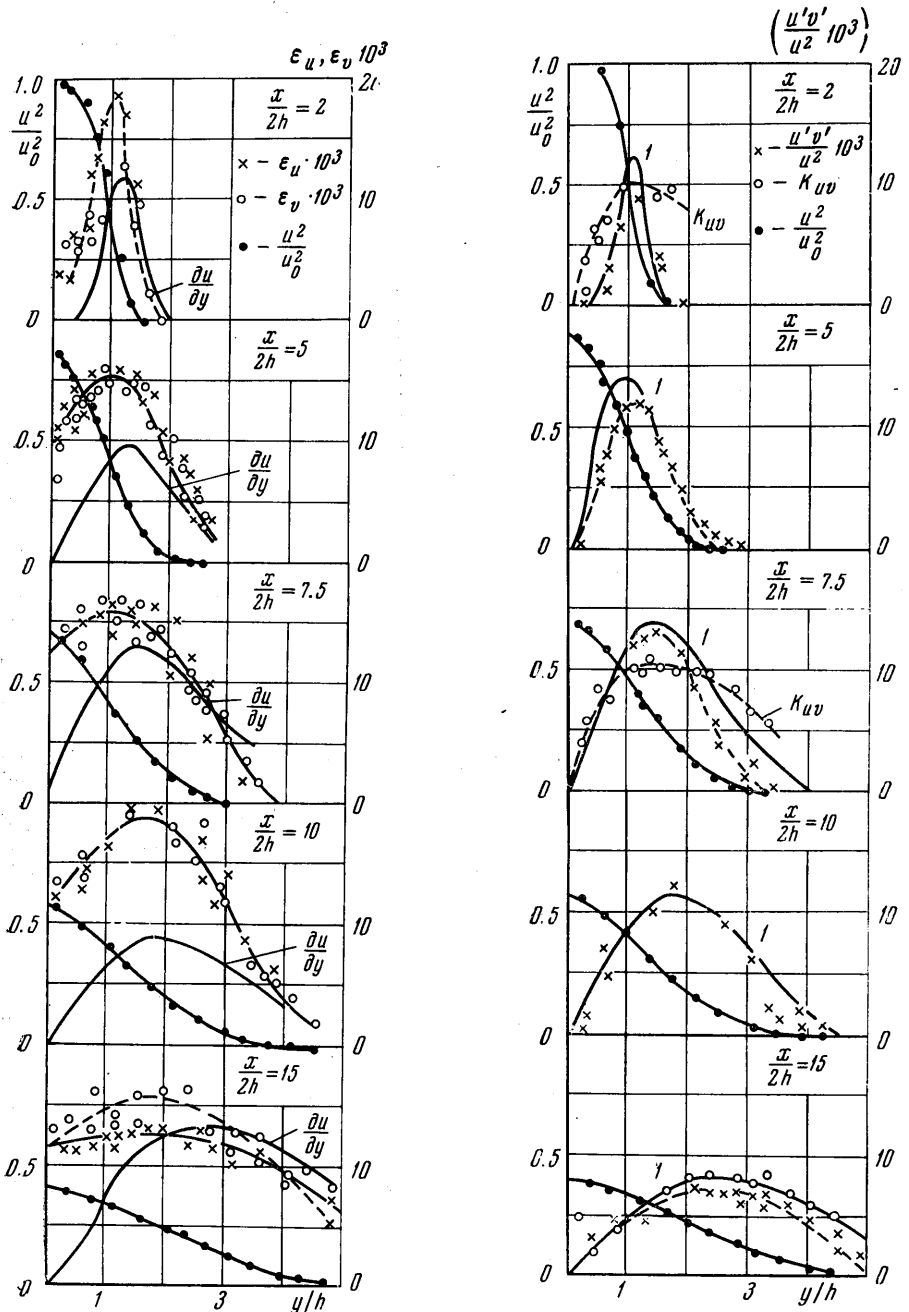
Эмпирическая связь  $\xi = \xi(x)$  имела вид  $\sqrt{\xi} = a_1 + c_1 x$ , причем постоянные  $a$  и  $c$  находились, как обычно [9], из сравнения опытного распределения средней скорости на оси струи с теоретическим решением уравнения

$$\partial u^2 / \partial \xi = \partial^2 u^2 / \partial y^2$$

Опытные точки, полученные с помощью электротермоанемометра, удовлетворительно согласуются с расчетом  $\tau_T$  по приведенной выше формуле, содержащей одну только эмпирическую константу  $c = 0.44$ . В начальном участке кривая касательного напряжения трения проходит через максимум, расположенный на кромке сопла. Постепенно, как и на кривой пульсаций скорости, этот максимум смещается от кромки сопла во внешнюю область струи.

<sup>1</sup> Характеристика электронного усилителя ЭСУ-2А линейна в диапазоне частот от 20 гц до 10 кгц.

<sup>2</sup> Тупые угловые скобки — средние значения.



Фиг. 1

Заслуживает упоминания, что при  $x/2h = 15$  данные по  $\tau_T$  для числа Рейнольдса  $R = 39 \cdot 10^3$  лежат несколько выше аналогичных данных для значения  $R = 77.5 \cdot 10^3$ . Такое же влияние числа  $R$  на пульсации в плоской струе отмечено в работе [8] на больших расстояниях  $x/2h \approx 100$ . Данные по пульсациям  $\epsilon_u$  (а также  $\epsilon_v$ ) для  $x/2h = 15$  и тех же значений числа  $R$  практически не различимы (фиг. 1 слева). Для расстояний  $x/2h = 2$  и  $x/2h = 7.5$  (фиг. 1 справа) показано также распределение значений коэффициента корреляции

$$K_{uv} = \frac{\langle u'v' \rangle}{\sqrt{\langle u'^2 \rangle \langle v'^2 \rangle}}$$

в этих поперечных сечениях струи. Коэффициент корреляции достигает максимального значения порядка  $K_{uv} = 0.5$ , что практически совпадает с данными для осесимметричной струи [9].

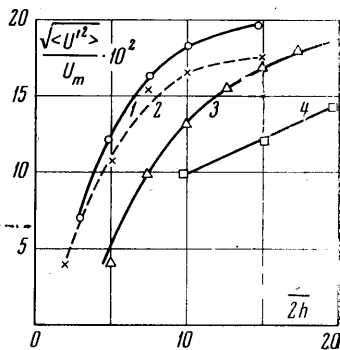
На фиг. 2 нанесены кривые изменения интенсивности пульсаций

$$\frac{\sqrt{\langle u'^2 \rangle}}{u_0}, \quad \frac{\sqrt{\langle v'^2 \rangle}}{u_0}$$

по оси струи. Для сравнения приведены данные других авторов (кривая 1 — из работы [11] — пунктир — кривая 2 — данная работа, кривые 3 и 4 — соответственно из работ [7] и [12]).

В целом полученные данные согласуются по порядку величины с результатами измерений в работах [7, 12], а также с данными по осесимметричной струе. В частности, профили интенсивности пульсаций в плоской [9] и в круглой [4] струях на протяжении первых 10—15 калибров сравнительно близки друг к другу, если не считать того, что плоская струя примерно в 1.5—2 раза шире (при сравнении в координатах  $y/h$  и  $y/n$  соответственно). То же самое относится к профилям касательного напряжения трения. В отличие от круглой струи в плоской нет смещения максимума пульсаций на ось струи в автомоделльном участке течения.

Из других результатов наблюдений отметим, что установление автомоделльного режима течения по пульсационным характеристикам в плоской струе (как, впрочем, и в круглой [13]) резко отстает по длине струи от автомоделльности по средней скорости. Например, при  $x/2h = 15$  профиль  $u/u_m$  практически автомоделлен, тогда как профили  $\epsilon_u$  и  $\epsilon_v$  все еще существенно меняются. Наряду с этим более детальное сопоставление экспериментальных кривых позволяет установить различие в интенсивности затухания (по длине струи и в ее сечениях) основных характеристик плоских и осесимметричных струйных турбулентных течений.



Фиг. 2

Поступило 29 VIII 1967

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Corrsin S., Uberoi M. Further experiments on the flow and heat transfer in a heated turbulent air jet. Rept 998, NACA, 1950.
2. Corrsin S., Kistler A. L. The free-stream boundaries of turbulent flows, NACA TN 3433, 1954.
3. Laurence J. C. Intensity scale and spectra of turbulence in behind region of free subsonic jet Rept 1292, NACA, 1955.
4. Gibson M. Spectra of turbulence in a round jet. J. Fluid. Mech., 1963, vol. 15, p. 2.
5. Гиневский А. С., Почкина К. А. Влияние начальной турбулентности потока на характеристики осесимметричной затопленной струи. Инж.-физ. ж., 1967, т. 12, № 1.
6. Sami S., Carmody T., Rouse H. Jet diffusion in the region of flow establishment. J. Fluid Mech., 1967, vol. 27, pt 2.
7. Bradbury L. J. S. The structure of a self-preserving turbulent plane jet. J. Fluid Mech., 1965, vol. 23, pt 1.
8. Heskestad G. Hot-wire measurements in a plane turbulent jet. Trans. ASME, Ser. E., J. Appl. Mech., 1965, vol. 32, No. 1. (Рус. перев. Прикл. механ., 1965, т. 32, № 4.)
9. Вулис Л. А., Кашкаров В. П. Теория струй вязкой жидкости. М., «Наука», 1965.
10. Вулис И. Л., Вулис Л. А. О расчете турбулентного трения и теплоотдачи в струях с помощью эквивалентной задачи теории теплопроводности. Изв. АН Каз ССР, Сер. энергетическая, 1962, вып. 2 (22).
11. Miller D., Comings E. Static pressure distribution in the free turbulent jet. J. Fluid Mech., 1957, vol. 3, pt 1.
12. v. d. Hegge Zijnen B. Measurements of turbulence in a plane jet of air by diffusion method and by the hot-wire method. Appl. Sci. Rec., Section A, 1958, vol. 7, p. 293.
13. Kobashi U. Experimental studies on a compound jets. (Measurements of turbulents characterisrics.) Proc. Japan National Congress for Appl. Mech., Tokio, 1952.