

ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИ

УДК 532.522.2:532.527:532.525.2

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ© 2020 г. С. Ю. Крашенинников^{1,*}, А. К. Миронов¹, Л. А. Бендерский¹

Представлено академиком РАН В.А. Левиным 03.12.2019 г.

Поступило 11.12.2019 г.

После доработки 11.12.2019 г.

Принято к публикации 12.12.2019 г.

На основе результатов измерений и численного моделирования анализируется взаимодействие турбулентных струй (закрученных и без закрутки) с окружающей средой. Показано, что механизм воздействия струи на окружающую среду связан с понижением статического давления в струе, характер втекания в струю внешней среды не зависит от механизма появления пониженного давления и кинетическая энергия струи является источником энергии для индуцированного течения.

Ключевые слова: турбулентные струи, турбулентные пульсации, понижение давления в струе, подтекание к струе

DOI: 10.31857/S2686740020020157

При распространении турбулентной струи в неподвижной среде того же состава возникает течение, которое принято называть “затопленной турбулентной струей”. Под этим подразумевается возникающая область турбулентного движения среды, в которой происходит смешение вещества истекающей среды с окружающей средой. Общие представления о смешении струи заключаются в аналогии происходящего смешения обычному градиентному переносу. На этом представлении базируются модели турбулентного смешения в струях.

Однако результаты современных расчетных и экспериментальных исследований показывают, что смешение струи с окружающей средой происходит вследствие подтекания к струе, индуцируемого перепадом статического давления. При этом оказывается, что этот механизм подтекания аналогичен как для обычных турбулентных струй, где среднее значение разрежения в области смешения невелико, так и для струй с закруткой, в которых из-за вращения потока разрежение существенно больше.

Развитая в настоящее время так называемая LES-технология вычислительного моделирования на основе численного решения нестационарных уравнений Навье–Стокса позволяет получать “мгновенные” картины для нестационарных течений, в частности, в турбулентных струях.

На рис. 1 приведены результаты вычислительного моделирования течения в затопленной струе на основе LES-технологии ($Re \sim 10^6$, $u_0 \sim 300$ м/с). Используются подходы, описанные в [1].

Показана мгновенная картина течения в осевой плоскости струи, которая получена по рассчитанным значениям статического давления. Темные области соответствуют разрежению, светлые — превышению статического давления по сравнению с давлением во внешней среде. Эти области движутся со скоростью конвекции, составляющей $\sim 0.5u_0$, увеличиваясь пропорционально x . На рис. 1 также показаны линии тока втекания внешней среды.

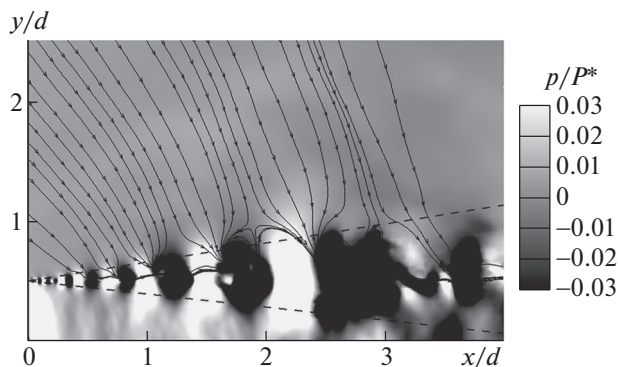


Рис. 1. Результаты расчета “мгновенного” распределения статического давления в слое смешения и линии тока в эжектируемом потоке. p — отличие статического давления в струе от атмосферного, P^* — скоростной напор на оси струи.

¹ Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, Россия

*E-mail: krashenin@ciam.ru

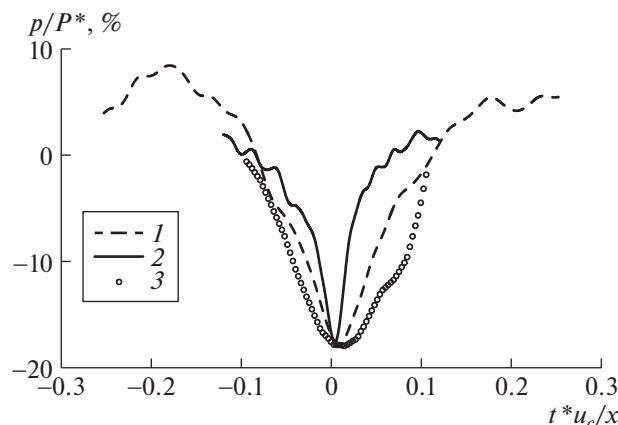


Рис. 2. Прохождение зоны пониженного давления мимо точки наблюдения (эксперимент: 1 – $x/d = 2$, 2 – $x/d = 4.2$; расчет: 3 – $x/d = 1.6$).

Видно, что втекание происходит исключительно в те части потока, где давление понижено. Линии тока огибают области, где давление повышено.

Для обычных затопленных струй проведены непосредственные измерения и расчеты распределений статического давления. На рис. 2 результаты численных расчетов сопоставлены с экспериментом. Измерения проводились в средней части слоя смещения малоинерционным датчиком статического давления при $u_0 \sim 38$ м/с, $d \sim 200$ мм. Приведены результаты определения осредненного распределения статического давления в одной из областей пониженного давления, показанных на рис. 1. В расчете осреднение проводилось по ансамблю распределений, которые соответствуют разным, но близким временным координатам наблюдения при $\frac{x}{d} = 1.6$ –1.8. В эксперименте – по выборке из временных реализаций ($p(t)$), отличия давления от атмосферного, в которых хотя бы одно из значений статического давления было ниже атмосферного на 15% от скоростного напора струи. По оси абсцисс отложено характерное значение времени, рассчитанное по продольной координате и скорости потока. Относительная координата по оси абсцисс отсчитывается от точки, где наблюдается минимум статического давления.

Представленные данные показывают, что в слое смещения наблюдаются относительно долгоживущие движущиеся области пониженного давления с максимумом разрежения около 20% от скоростного напора на оси струи. Одновременно наблюдаются области повышенного давления (рис. 1). Именно области пониженного давления создают эффект эжекции и смешения.

Аналогичные данные получены для сильно закрученных струй с обратным током на оси. На рис. 3 приведены результаты визуализации мгновенной структуры течения в поперечном сечении

струи при интенсивности закрутки $W_0 = 1.7$ на удалении около $0.1R$ от среза сопла, полученные в эксперименте с использованием PIV-технологии [2]. Проведено определение значений скорости течения в разные моменты времени за один период прецессионного движения в струе. Видно, что линии тока внешнего течения так же, как и для обычной струи, “следят” за движением вращающегося поля давления.

Происходящее смешение турбулентной струи с окружающей средой обусловлено процессом втекания в струю. Это течение индуцировано пониженным уровнем статического давления в струе. Его интенсивность на удалении от струи определя-

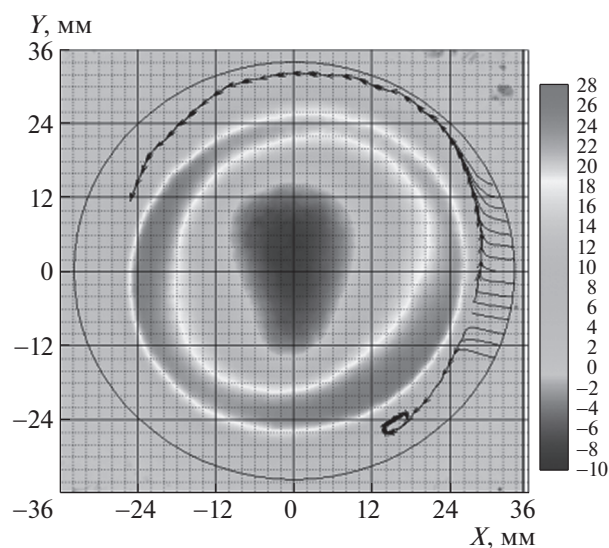


Рис. 3. Визуализация “мгновенной” картины течения в поперечном сечении закрученной струи по результатам измерений продольной скорости (м/с), обозначенных интенсивностью серого. Вблизи оси скорость отрицательна.

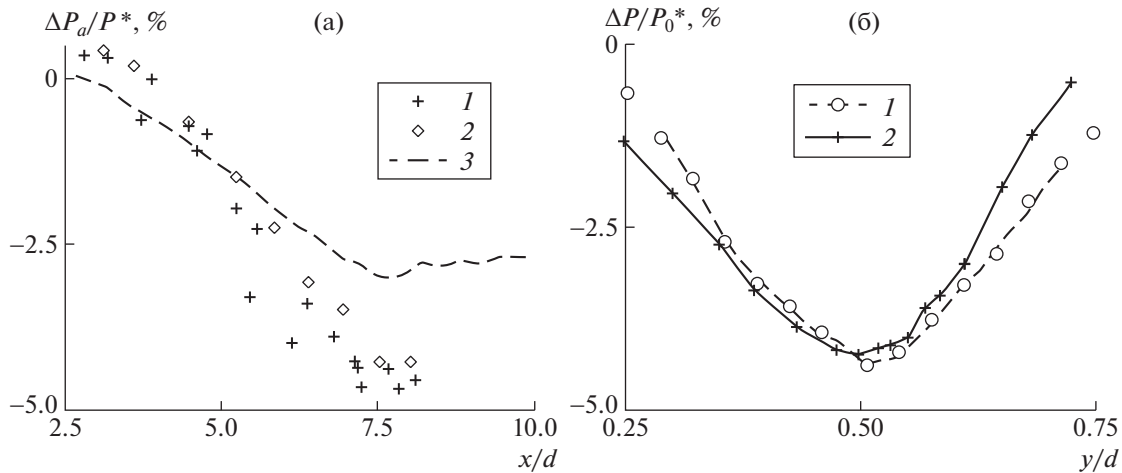


Рис. 4. а — Осевое распределение статического давления (эксперимент: 1 — коническое сопло, 2 — сопло с цилиндрическим насадком, расчет; 3 — коническое сопло), б — эксперимент: поперечное распределение статического давления (1) и рассчитанное по интенсивности пульсаций поперечной скорости (2) в сечении струи $x/d = 2$.

ется средним значением разрежения, возникающего в струе. Наличие этого разрежения определяет интенсивность втекания в струю, которую условно можно охарактеризовать средним значением скорости втекания на границе струи. Она определяется средним значением характерного значения разрежения в струе ΔP_a :

$$v_n = k \sqrt{\frac{\Delta P_a}{\rho}}. \quad (1)$$

В этом соотношении “ k ” коэффициент, который зависит от конкретной структуры течения в струе и ее окрестности. Поскольку внешнее течение в закрученной и незакрученной струях аналогичны, можно ожидать, что коэффициент “ k ” может иметь близкие значения для обоих случаев.

Разрежение в закрученной струе ΔP_w может быть вычислено с помощью соотношения

$$\Delta P_w(y) \approx \int_b^y \rho \frac{w^2}{y} dy.$$

Здесь y — поперечная координата, b — координата границы струи, $w = w(y)$ — значение вращательной компоненты скорости.

Для осредненного значения разрежения в обычной струе известно соотношение, достаточного строго полученное Таунсендом [3]:

$$\frac{dP}{dy} \approx \rho \frac{d\langle v'^2 \rangle}{dy} \quad (2)$$

или $P = P_0 - \rho \langle v'^2 \rangle$, где P — среднее значение давления, а $\langle v'^2 \rangle$ — среднее значение квадрата пульсационной скорости в данной точке течения.

На удалении от струи индуцированное течение возникает из-за воздействия средней разности давления в области турбулентного течения в обычной струе и вне ее. А в случае закрученной струи оно возникает из-за разрежения, связанного с закруткой потока.

По результатам вычислительного моделирования течения в струе, с использованием LES-технологии, были определены осредненные распределения статического давления. Они полностью соответствуют данным экспериментов. По данным опытов и расчетов подтверждены соотношения Таунсенда, связывающие среднее по времени значение разрежения и интенсивность пульсаций скорости. На рис. 4 приведены соответствующие результаты расчетов и измерений.

Окружающая среда приводится в движение перепадом давления, создаваемого крупномасштабным движением в струях. Определяющим является среднее по времени значение разрежения, оно вызывает приток массы в струю. По результатам экспериментальных исследований турбулентных струй можно определить закономерность нарастания потока массы в струе и сопоставить с результатами определения характерного значения разрежения в струе.

Поток массы определяется путем интегрирования профиля скорости:

$$G = \int_0^b \rho u y dy.$$

Его изменение:

$$\frac{dG}{dx} = \frac{d}{dx}(\rho u_m b^2 2\pi e_2), e_2 = \int_0^1 \frac{u}{u_m} \eta d\eta \approx 0.129,$$

где u_m — продольная скорость на оси струи, $\eta = y/b$.

Для основного участка струи, при учете условия сохранения импульса J , т.е. при $bu_m = \text{const}$, оно может быть выражено через скорость втекания в струю v_n :

$$\frac{dG}{dx} = \frac{d}{dx}(\rho J b 2\pi k_1) = 2\pi b \rho v_n = \frac{2\pi b \rho u_m v_n}{u_m},$$

$$\frac{v_n}{u_m} = k_1 \frac{db}{dx}.$$

Интенсивность расширения струи $\frac{db}{dx} \approx 0.21$.

При использовании экспериментальных данных о профиле средней скорости получается:

$$v_n = (0.04-0.05)u_m.$$

По известным данным измерений [4] интенсивность пульсаций скорости на оси струи $\varepsilon_v \approx 0.23$.

Отсюда по формуле Таунсенда: $\frac{\Delta P_a}{\rho u_m^2} \approx 0.053$, что

соответствует данным, полученным при экспериментах и в расчетах (рис. 4). Определенная по этим данным связь значений разрежения и скорости втекания, выраженная соотношением (1), соответствует $k \approx 0.2$.

Единообразие этой связи эффекта эжекции с характерным значением разрежения (максимальным средним) подтверждается аналогичным анализом, который можно провести для закрученной струи. В [5] изложены результаты экспериментов по определению параметров течения в закрученных струях. В этом случае анализ осложнен, поскольку интенсивность закрутки изменяется вдоль струи и значение разрежения в струе изменяется быстрее, чем в обычной затопленной струе. По изменению характерной толщины струи определялось значение v_n , разрежение по оси струи вычислялось по профилю w . Результаты этого сопоставления течения показывают значение $k \approx 0.2$.

Для большой интенсивности закрутки при наличии зоны обратных токов эта связь подтверждена непосредственным измерением при $W_0 = 1.7$ [2].

Разрежение в струе создает эффект втекания внешней среды, струя совершает работу, приводя в движение окружающую среду. Это проявляется в балансе потока кинетической энергии в струе.

Относительная величина потока кинетической энергии затопленной струи

$$E^0 = \frac{E}{E_0} = \frac{2\pi \rho \int_0^b u^3 y dy}{\pi R^2 \rho u_0^2}$$

уменьшается вдоль течения. По данным экспери-

ментов $e_3 = \int_0^1 \left(\frac{u}{u_m}\right)^3 \eta d\eta \approx 0.09$.

В основном участке струи, где закономерность изменения осевой скорости $\frac{u_m}{u_0} \approx \frac{10}{x/R}$, а $b \approx 0.21x$ [4], получается $E^0 \approx \frac{8}{x/R}$.

То есть на удалении 10 диаметров сопла поток массы в струе возрастает в 4 раза, а поток кинетической энергии уменьшается: $\frac{E}{E_0} \approx 0.4$.

Струя теряет энергию, совершая работу, вовлекая окружающую среду. Окружающая среда приводится в движение перепадом давления, создаваемого крупномасштабным движением в струях. Этот механизм обусловлен появлением значительного разрежения при взаимодействии струи с окружающей средой. Проведенный анализ иллюстрирует свойства процесса взаимодействия струи с окружающей средой и показывает его универсальность. Этот процесс не моделируется при использовании моделей турбулентного переноса градиентного типа.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-01-00213а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бендерский Л.А., Крашенинников С.Ю. Исследование шумообразования в турбулентных струях на основе вычислительного моделирования нестационарного течения в слое смешения // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 4. С. 149–162.
2. Захаров Д.Л., Крашенинников С.Ю., Маслов В.П., Миронов А.К., Токталиев П.Д. Исследование нестационарных процессов, свойств течения и тонального акустического излучения закрученной струи // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 1. С. 59–72.
3. Таунсенд А.А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 399 с.
4. Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Турбулентное смешение газовых струй / Под ред. Г.Н. Абрамовича. М.: Наука, 1974. 272 с.
5. Крашенинников С.Ю. К расчету осесимметричных закрученных и незакрученных турбулентных струй // Изв. АН СССР. МЖГ. 1972. № 3. С. 71–80.

DYNAMIC IMPACT OF A TURBULENT JET ON THE ENVIRONMENT

S. Yu. Krashennnikov^a, L. A. Benderskii^a, and A. K. Mironov^a

^a Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS V.A. Levin

Based on the results of measurements and numerical modeling, the interaction of turbulent jets (swirling and without swirling) with the environment is analyzed. It is shown that the mechanism of the impact of the jet on the environing medium is associated with a decrease in the static pressure in the jet. The nature of the inflow of the external medium into the jet not depend on the mechanism of the appearance of reduced pressure and the kinetic energy of the jet is an energy source for the induced flow.

Keywords: turbulent jets, turbulent pulsations, depression within jet, inflow to jet