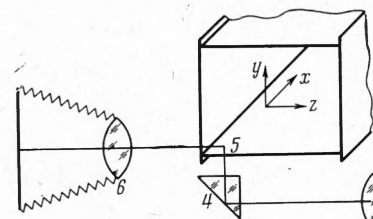


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРИСТЕНОЧНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КАНАЛЕ

В. В. Орлов (Новосибирск)

При помощи специально разработанного стробоскопического прибора проведены измерения мгновенных скоростей вблизи стенки (включая вязкий подслой) в турбулентном потоке воды в канале. Найдены значения средней скорости и турбулентных пульсаций в функции от расстояния от стенки. Примененная методика существенно проще, чем термоанемометрическая, хотя несколько уступает ей в точности.

Гидродинамика вязкого подслоя и переходного слоя в турбулентном потоке представляет, как известно, большой интерес для целого ряда теоретических и практических проблем. Однако даже для классического объекта такого рода — течения около плоской гладкой поверхности без градиента давления — в литературе имеется очень мало данных [1, 2]. Кроме того, все эти данные получены при помощи термоанемометра, применение которого к течениям вблизи твердой стенки сопряжено не только с большими техническими трудностями, но также и с некоторыми принципиальными ограничениями [3].



Фиг. 1. Оптическая схема установки: 1 — трубчатая импульсная лампа, 2 — щель, 3 — объектив, 4 — призма, 5 — канал с прозрачными стенками, 6 — фото- или кинокамера

Так, например, при большой относительной величине турбулентных пульсаций в показания термоанемометра необходимо вносить поправку, зависящую не только от величины измеряемой пульсационной компоненты, но также и от корреляции этой компоненты с другими. Большие технические трудности при изготовлении и эксплуатации термоане-

мометров с особо тонкими нитями (до 1 мк в диаметре) также налагают ряд ограничений: по разрешающей способности в пространстве, по скорости потока, чистоте газа и т. д.

От рассмотренных выше принципиальных недостатков свободен известный метод визуализации течения¹, заключающийся в том, что в движущиеся газ или жидкость тем или иным способом вводятся светящиеся «метки», которые затем фотографируются. В частности, можно получить такие метки, введя в поток жидкости или газа мелкие, хорошо рассеивающие или отражающие свет твердые частицы; фотографирование их при импульсном боковом освещении дает на неподвижной фотопленке прерывистый «трек». Измеряя такой трек на фотопленке, вычисляют две компоненты мгновенной скорости частицы; можно также вычислить и мгновенные ускорения данного элементарного объема жидкости.

Разумеется, для этого необходимо, чтобы введенные в поток твердые частицы достаточно точно следовали за жидкостью или газом. Расчет показывает, что для этого необходимо выполнить условие

$$w_0/g \ll 1/f$$

Здесь w_0 — скорость седиментации частицы в данной среде при ускорении силы тяжести g , f — характерная частота изучаемого течения.

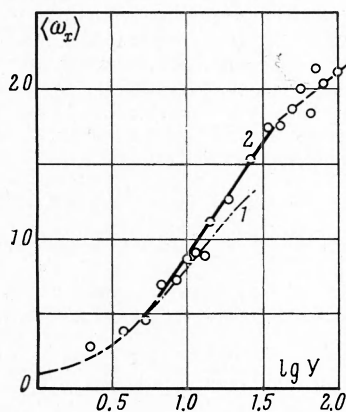
Это условие легче выполнить для жидкой среды; однако и в этом случае размер частиц получается порядка 10 мк, так что фотографирование необходимо вести с увеличением в 3—10 раз.

Экспериментальная установка состояла из циркуляционного контура со сменным рабочим участком и специальной электронной схемы, обеспечивавшей импульсное (стробоскопическое) освещение объекта; оптическая схема приведена на фиг. 1.

Рабочий участок № 2, на котором было проведено большинство опытов, выполнен из органического стекла прямоугольной в сечении формы; размеры его 17 × 16 мм. Фотографирование треков производилось в сечении, отстоящем от входа на 475 мм (т. е. около 30 калибров) около донной поверхности канала при числе Рейнольдса порядка 20 000. Рабочей средой служила вода при комнатной температуре; вводились мелкие частицы Al_2O_3 или Al (алюминиевая пудра). В последнем случае приходилось также вводить в небольших концентрациях смачивающий агент. Суспензия частиц предварительно подвергалась отмучиванию; в большей части опытов использовалась фракция частиц Al с $w_0 \leq 0.1$ см/сек.

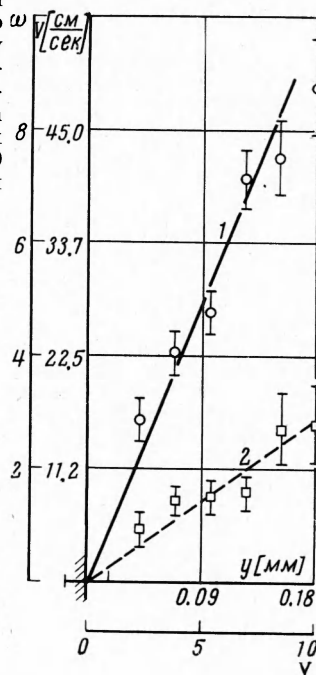
¹ По-видимому, первым автором, применившим метод визуализации к данному объекту, был Фейдж [4]; сравнительно недавно появилась статья [5], где получен профиль средней скорости при помощи специального стереоскопического микроскопа.

Электронная схема управления импульсной лампой была построена с таким расчетом, чтобы обеспечить одновременно возможно большую яркость вспышек и точность выдерживания временных интервалов между ними. Импульсный разряд конденсаторов через лампу-вспышку управлялся тиратронами ТГИ1-400/16 (импульсный разрядный ток до 400 а); строго равные интервалы времени между вспышками обеспечивались после соответствующего формирования синусоидальным напряжением задающего генератора, частота которого могла изменяться в широких пределах. При параметрах разряда 2 кВ, 2 мкФ-импульсная лампа ИФК-120 дает яркость свечения около 10^5 стильбов, время вспышки — порядка 20 мксек.



Фиг. 2

Фиг. 2. Средняя продольная скорость $\langle \omega_x \rangle$ в зависимости от $Y=y/v_*$; 1 — профиль, полученный в работе [9], 2 — результаты автора



Фиг. 3

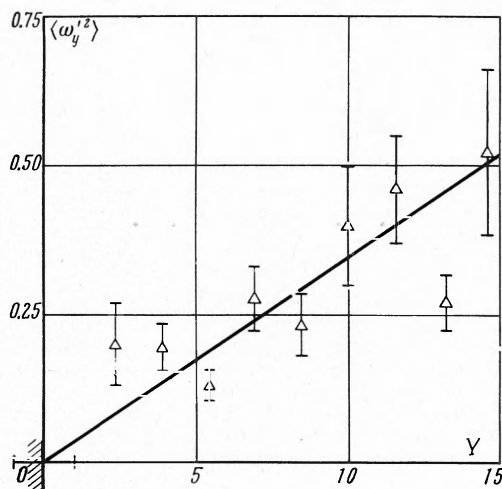
Фиг. 3. 1—средняя продольная скорость $\langle \omega_x \rangle$, 2—среднеквадратичная продольная пульсация $\langle \omega_x'^2 \rangle$

Изображение щели (фиг. 1) проектируется осветительным объективом через прозрачную донную поверхность рабочего участка внутрь его так, что внутри потока жидкости освещается узкая область («световой нож») глубиной по оси z в несколько десятых мм. На каждом кадре, кроме треков, экспонировалась световая метка, расположенная на плоскости дна, от которой производился отсчет y — координат треков.

Каждый кадр как совокупность некоторого количества треков характеризует поле мгновенных скоростей; усреднение мгновенных значений по разным кадрам дает возможность вычислить поля средних скоростей и пульсаций.

На фиг. 2—4 представлены результаты, полученные в одной из серий опытов. На фиг. 2 в полулогарифмических координатах нанесена средняя продольная скорость $\langle \omega_x \rangle$ (в безразмерной форме).

Полученные экспериментальные точки лежат в основном в вязком подслое ($Y=yV_*/\nu < 5$) и в промежуточном слое ($5 < Y < 30$). Из графика видно, что в промежуточном слое профиль скорости



Фиг. 4. Поперечная пульсация $\langle \omega_y'^2 \rangle$ в зависимости от $Y=yV_*/\nu$

Из графика видно, что в промежуточном слое профиль скорости

может быть аппроксимирован формулой

$$\langle \omega_* \rangle = -5.7 + 14 \lg Y$$

Динамическая скорость $V_* = \sqrt{\tau/\rho}$ вычислялась по перепаду давления вдоль канала.

В пределах точности настоящего эксперимента (основная погрешность связана с неточностью в определении местного значения динамической скорости) это совпадает с данными, полученными Лауфером [1] и Рейхардтом [2] термоанемометрическим методом. Данные этих авторов могут быть выражены формулой

$$\langle \omega_x \rangle = -3.5 + 12.0 \lg Y_*$$

На фиг. 3 представлены профили $\langle \omega_x \rangle$ и продольной среднеквадратичной пульсации $\langle \omega_x'^2 \rangle$ в интервале $Y < 10$, а на фиг. 4 — поперечная пульсация $\langle \omega_y'^2 \rangle$. Вероятные статистические ошибки, нанесенные на этих графиках, вычислялись по числу осредняемых значений мгновенной скорости в каждом интервале по Y . Эти данные также в пределах точности эксперимента согласуются с данными Лауфера.

Здесь важно подчеркнуть, что в вязком подслое имеется весьма высокий уровень продольных пульсаций $\alpha_x \equiv \omega_x^{-1} \langle \omega_x'^2 \rangle$, из наших опытов получено $\alpha_x = (30 \pm 10)\%$. Таким образом, вязкий подслой состоит из хаотически чередующихся областей с переменными значениями локального мгновенного напряжения сдвига τ_m . Пространственную протяженность этих областей в продольном направлении можно оценить из измерений мгновенных ускорений жидкого моля. К настоящему времени получена лишь грубая оценка, что протяженность самых малых элементов таких областей в изученном режиме не менее нескольких десятых мм.

Статистический анализ пульсаций в вязком подслое указывает на асимметрию в распределении пульсаций по величине и знаку.

Автор благодарит В. М. Карстена и Е. С. Михайлову, участвовавших в выполнении этой работы, и Е. М. Хабахпашеву — за весьма полезные советы и обсуждения.

Поступила 10 II 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. La u f e r J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. *NACA Tech. Rep. N1174*, 1954.
2. R e i c h a r d t H. Die Wärmeübertragung in turbulenten Reibungsschichten. *Z. angew. Math. und Mech.*, 1940, B. 20, 297.
3. Х и н ц е И. О. Турбулентность. *Физматгиз*, 1963.
4. F a g e A., T o w n e n d H. C. H. An examination of turbulent flow with an ultramicroscope. *Proc. Roy. Soc. A*, 1932, vol. 135, p. 656.
5. N e d d e r m a n R. M. The measurement of velocities in the wall region of turbulent liquid pipe flow. *Chem. Engng Sci.*, 1961, vol. 16, p. 120.

О ВЛИЯНИИ СЖИМАЕМОСТИ И НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ ГАЗА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАГРАДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Э. П. Волчков, С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев

(Новосибирск)

В большинстве работ по заградительному охлаждению анализируется эффективность тепловой защиты при течении несжимаемой среды с постоянными физическими свойствами. В технике же заградительное охлаждение используется при обтекании элементов машин высокотемпературным потоком газа с большими скоростями.

Однако исследования в таких условиях ограничены [1-3].

Для анализа влияния этих факторов на эффективность тепловой завесы используется метод, предложенный в работе [4]. Показано, что влияние сжимаемости и неизотермичности на эффективность тепловой завесы несущественно.

Из уравнения энергии пограничного слоя на теплоизолированной части плоской стенки

$$\frac{dR_{T^{**}}}{dX} + \frac{R_{T^{**}}}{\Delta T} \frac{d(\Delta T)}{dX} = 0 \quad (1)$$