

**О РАЗВИТИИ ОБЛАСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО СМЕШЕНИЯ  
В ЖИДКОСТИ**

**Ю. Н. Власов, В. Н. Некрасов, А. М. Трохан,  
Ю. Д. Чашечкин**

(Москва)

Методом подкраски и тепловой лазерной метки изучается развитие области турбулентного смешения, создаваемой линейным источником в плоской ячейке. Получено поле скорости вне области смешения. Показано совпадение размеров области, определенных по диффузии красителя и деформации тепловой метки.

Большое число наблюдений, измерений и теоретических работ [1, 2] посвящено изучению характеристик процессов турбулентного переноса и движения жидкости внутри и на границах свободных турбулентных потоков. Подобные исследования необходимы как для понимания механизма возникновения и распада турбулентности, динамики вовлечения жидкости в турбулентное движение, так и для разнообразных практических приложений. Изучение турбулентности и динамики взаимного проникновения жидкости, формы и характера движения граничной поверхности, разделяющей области турбулентного движения жидкости, обычно проводится с помощью термоанемометра или методом меченых частиц, переносимых только турбулентной жидкостью [1].

Первым способом легко определяется коэффициент перемежаемости, но для определения динамики движения границы области, в силу того что измерения производятся в одной точке потока, приходится совмещать результаты нескольких опытов. Кроме того, введение зонда в исследуемую область приводит к возмущению потока. Недостатком второго способа является невозможность исследования структуры течения вне области турбулентного смешения.

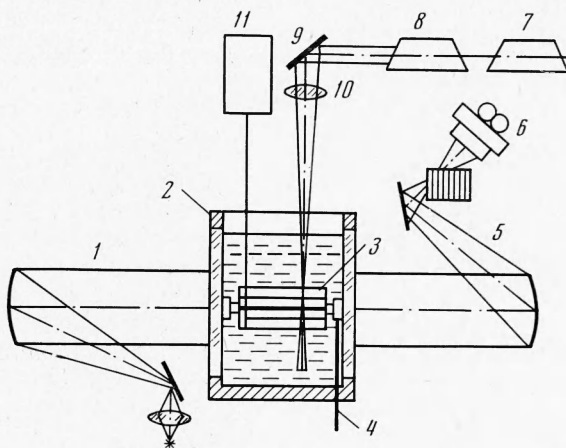
В данной работе размеры области смешения, создаваемой линейным источником, характеристики турбулентности и параметры движения жидкости вне области смешения изучались по диффузии красителя и деформации тепловой лазерной метки [1, 3, 4]. Схема установки приведена на фиг. 1.

В плоский лабораторный бассейн 2 длиной 600 мм, шириной 50 мм и высотой 250 мм, боковые стенки которого изготовлены из оптического стекла, помещался шестилопастной турбулизатор 3 диаметром 15 или 20 мм. Механизм привода 11 приводил турбулизатор в колебательное движение без вращения с углом поворота 120°. При этом в жидкости создавалась область турбулентного смешения, свободно диффундирующая после прекращения возбуждения. С изменением частоты колебаний и длительности работы турбулизатора менялась энергия, сообщаемая жидкости. Перед началом эксперимента для визуализации области турбулентного смешения пространство между лопастями турбулизатора заполнялось красителем (фиолетовые чернила), поступающим через отверстия в корпусе турбулизатора, полую ось и подводную трубку 4. Инфракрасное излучение импульсного неодимового лазера 8, направленное в заданное место бассейна при помощи поворотной призмы 9 и фокусирующей линзы 10, создавало в жидкости тепловую метку. Юстировка оптической системы, служащей для

создания метки, проводилась с помощью He — Ne лазера 7 типа ОКГ-13. Регистрация положения красителя и тепловой метки проводилась с помощью теневого прибора ИАБ-451 1, 5 кинокамерой «Конвас-автомат» 6 при частоте съемки 24 и 32 кадр./сек.

Неодимовый лазер (длина волны излучения 1.06 мкм) работал в режиме свободной генерации с частотой следования импульсов 2 гц и энергией излучения  $\sim 1$  дж/импульс. При этом вследствие поглощения лазерного излучения в жидкости по всей глубине бассейна возникала вертикальная тепловая метка диаметром  $0.5 \div 1$  мм и временем жизни несколько секунд.

Размеры области смешения, характеристики турбулентности определялись по измерениям деформации и смещения тепловой метки и переносу красителя на одних и тех же негативах, обработка которых проводилась



Фиг. 1

на микрофотометре ИФО-451. Поскольку тепловая метка образуется на большой длине, она позволяет изучать динамику движения жидкости одновременно внутри, на границе и вне области турбулентного смешения. Время формирования метки определяется длительностью импульса и может составлять  $10^{-8}$  сек, что позволяет определять характеристики как мелко, так и крупномасштабных пульсаций скорости, выбирая соответствующую скорость регистрации. Большое время жизни дает возможность изучать медленное движение жидкости (до  $10^{-1}$  см/сек) вне области турбулентного смешения и характер движения границы раздела.

Пульсации скорости с масштабами  $\lambda$ , большими диаметра тепловой метки  $d$ , приводят к деформации и смещению метки, а мелкомасштабные ( $\lambda < d$ ) вызывают уширение тепловой метки значительно более быстрое (при высоких уровнях турбулентности), чем уширение за счет молекулярной диффузии, определяющей время жизни метки в спокойной жидкости. Изучая характер поведения тепловых меток различного диаметра (диаметр метки зависит от фокусного расстояния собирающей линзы, углового расхождения излучения ОКГ, расстояния от лазера до линзы и аббераций фокусирующей системы), можно определить микромасштаб турбулентности  $\lambda_0$  и другие характеристики турбулентного движения.

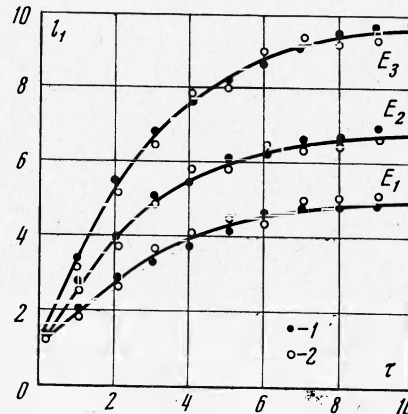
Анализ фильмов показывает, что во время и после прекращения работы турбулизатора вследствие симметричных условий возбуждения область смешения расширяется одинаково по всем направлениям. Измерение размеров области смешения в зависимости от времени при различных энергиях

начального возмущения ( $E$ ) приводится на фиг. 2. Здесь по оси ординат отложено отношение диаметра области турбулентного смешения к диаметру турбулизатора ( $l_1$ ), по оси абсцисс — отношение времени от начала опыта ко времени работы турбулизатора ( $\tau$ ). Энергия начального возмущения определялась в относительных единицах по продолжительности работы турбулизатора при фиксированной частоте колебаний. Экспериментальные значения ( $l$ ) соответствуют измерениям размера области по деформации метки,  $2$  — по диффузии красителя ( $E_3 > E_2 > E_1$ ). Границы области, определенные данными способами, совпадают между собой.

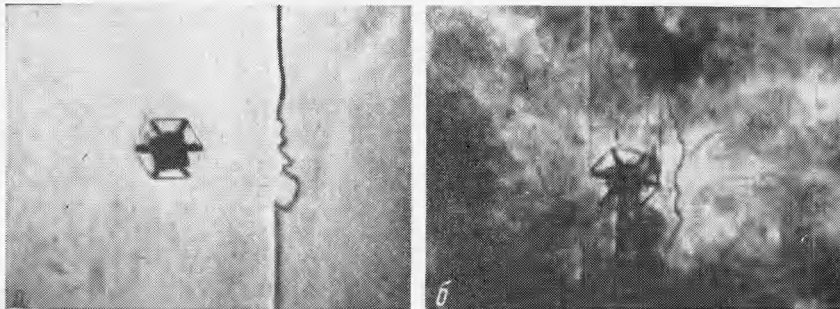
Поскольку деформация метки связана с диффузией импульса, а перенос красителя определяется диффузией массы, то ввиду совпадения размеров области можно считать, что в данном случае значения коэффициентов турбулентной диффузии импульса и массы совпадают.

На начальном этапе развития размер области растет прямо пропорционально времени, в дальнейшем скорость роста размера убывает; и в области  $2 < \tau < 8$ ,  $l_1 = K\tau^{1/2}$  (здесь  $K$  — коэффициент, зависящий от энергии начального возбуждения).

Внутри области турбулентного смешения наблюдаются пульсации скорости различных масштабов. Минимальный зарегистрированный масштаб



Фиг. 2



Фиг. 3

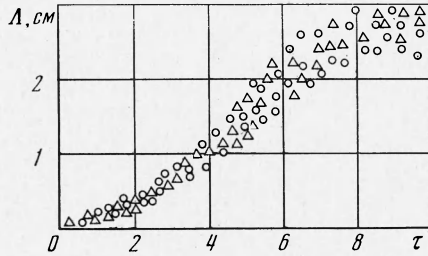
изменения скорости  $\lambda_0 = (5 \cdot 10^{-2} \pm 6 \cdot 10^{-3})$  см. Вихри такого же размера наблюдаются на границе области турбулентного движения по диффузии красителя.

По измеренному значению  $\lambda_0$  можно оценить величину диссипации энергии [5]  $\epsilon = \nu^3/\lambda_0^4 \sim 0.1$  см<sup>2</sup>/сек<sup>3</sup> при  $2 < \tau < 8$  (здесь  $\nu = 1.03 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/сек — кинематическая вязкость воды при температуре 18°С), что соответствует величине изменения скорости  $U_{\lambda_0} \approx \nu/\lambda_0 = 0.2$  см/сек на протяжении расстояний порядка  $\lambda_0$ .

Измеренное экспериментально значение скорости с характерным размером изменения порядка  $\lambda_0$  согласуется с этой величиной.

Пульсации скорости различных масштабов заметно деформируют тепловую метку через различные промежутки времени после ее образования

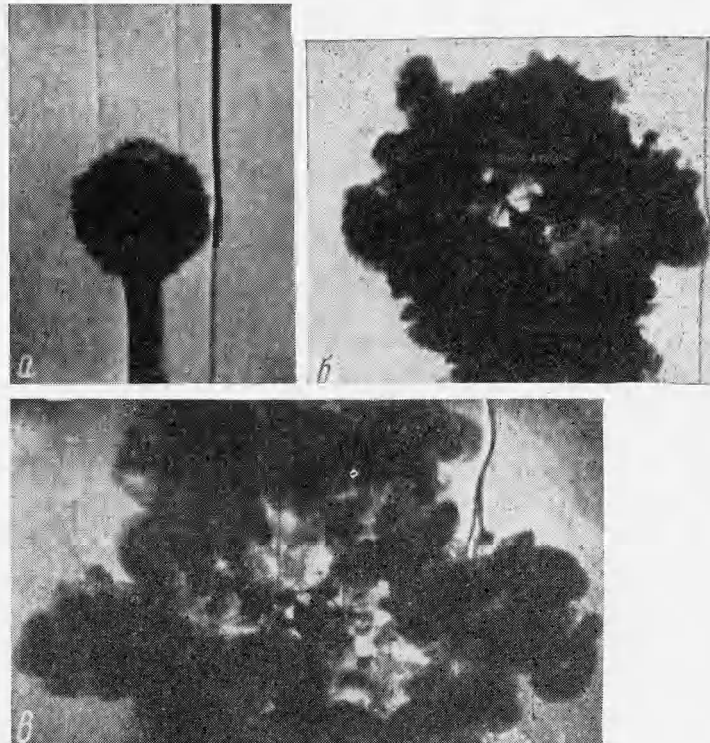
в зависимости от величины скорости, что позволяет определять масштабы и величину изменения скорости. На первых кадрах после формирования тепловой метки проявлялись пульсации с максимальными значениями скорости. На последующих кадрах форма метки становится более сложной и отражает весь энергетический спектр пульсаций скорости.



Фиг. 4

зависимость от времени макромасштаба турбулентности, полученная при статистической обработке  $\sim 1500$  кадров. В начальный момент ( $\tau \approx 1$ )  $\Lambda \approx 0.3$  см, в дальнейшем растет и достигает 3 см. При  $2 < \tau < 8$  значе-

Как видно из полученных негативов, в динамике турбулентного движения принимают участие пульсации с масштабами от  $\lambda_0$  до макромасштаба турбулентности  $\Lambda$  (масштаба максимального изменения скорости). Это можно наблюдать на тепловых снимках деформации тепловой метки без красителя (фиг. 3, а) и с красителем (фиг. 3, б). На фиг. 4 приводится



Фиг. 5

ние коэффициента турбулентной диффузии остается постоянным и равно  $D = \Lambda U_{\Lambda} \approx 20$  см<sup>2</sup>/сек при энергии начального возбуждения  $E = E_3$  (здесь  $U_{\Lambda}$  — величина изменения скорости на расстояниях порядка  $\Lambda$ ). Размеры области турбулентного смешения  $l$ , вычисленные для данного значения  $D$ ,  $l \approx (Dt)^{1/2}$ , совпадают с наблюдаемыми ( $t$  — время).

Интенсивность турбулентности в области смешения убывает как вследствие передачи энергии покоящейся жидкости при движении границы области, так и вследствие вязкой диссипации и трения на боковых стенках. Вырождение мелкомасштабной турбулентности начинается вблизи турбулизатора и распространяется от центра к периферии, что можно объяснить потерей энергии за счет трения о турбулизатор.

Граница области турбулентного смешения, отчетливо видимая на приводимых фотографиях (фиг. 5), продвигается в окружающую жидкость вследствие диффузии завихренности и имеет различную форму в зависимости от времени. При  $\tau \lesssim 1$ , когда интенсивность турбулентности велика, сечение границы — круг с неоднородностями порядка  $\lambda_0$ , что определяется как по размеру вихрей окрашенной жидкости (фиг. 5, а), так и по деформации метки. В дальнейшем с ростом размера области смешения и уменьшения интенсивности турбулентности форма границы становится более сложной, наблюдаются неоднородности с масштабами от  $\lambda_0$  до  $\lambda$  (фиг. 5, б), на последних стадиях развития наблюдаются неоднородности масштаба  $\Lambda$  (фиг. 5, в).

Движение жидкости вне области турбулентного смешения вызывается перемещением граничной поверхности жидкости, причем заметную роль играют лишь самые крупномасштабные пульсации.

Перемещение границы происходит с конвективной скоростью. Понятие конвективной скорости используется для описания отношения пространственного смещения к временному при максимальной пространственно-временной корреляции. Для неизменной структуры конвективная скорость есть скорость движения структуры [1] и может заметно отличаться от скорости жидкости. Как видно из фиг. 5, а, б, в, скорость движения жидкости вне области турбулентного смешения близка по значению к конвективной скорости (скорости движения границы).

Поступила 17 XI 1972

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Townsend A. A. The mechanism of entrainment in free turbulent flows. *J. Fluid Mech.*, 1966, vol. 26, pt 4, pp. 689—715. (Рус. перев.: Механизм проникания в свободных турбулентных потоках. *Механика*, Период. сб. перев. иностр. статей, 1968, № 4).
2. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
3. Власов Ю. Н., Трохан А. М. О применении оптических меток для измерения полей скорости течения жидкости. *Теплофизика высоких температур*, 1971, т. 9, № 3.
4. Iribarne A. P., Hummel A. P., Smith J. W., Grantisak F. Transition and turbulent flow parameters in a smooth pipe by direct flow visualization. *Chem. Eng. Progr. Sympos. Ser.*, 1969, vol. 65, No. 31, pp. 60—70.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Механика сплошных сред*. М., Гостехиздат, 1954.