

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ТРАНШЕЕ

*В. Я. Богатырев, Ю. Н. Дубнищев, В. А. Мухин,
В. Е. Накоряков, В. С. Соболев, Е. Н. Уткин, Н. Ф. Шмойлов*

(Новосибирск)

В работе проведено экспериментальное исследование течения вязкой несжимаемой жидкости в траншее квадратного поперечного сечения с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС).

Исследование выполнено при двух значениях числа Рейнольдса Re , соответствующих ламинарному и турбулентному режимам течения в канале. Экспериментальные данные показывают, что в траншее образуется ядро с постоянной завихренностью, вдоль стенок траншеи распространяется пристенная струя, а в углах траншеи имеются вторичные вихри.

Движение вязкой жидкости в траншее прямоугольного сечения является частью широкого класса устойчивых отрывных течений. Экспериментальных данных по исследованию течения в траншеях крайне мало. Большинство имеющейся информации ограничено визуальными наблюдениями [1—4]. В работах [2, 5, 6] обсуждался вопрос о неустойчивом характере течения в траншеях. Количественные измерения устойчивых вихревых течений в траншеях проведены [7—9] с помощью термоанемометра, в [7] измерены давления на дне и стенках траншеи, имеются данные о распределении скорости в средних сечениях траншеи. В работе [8] получили распределение средней скорости, интенсивности турбулентности и напряжения турбулентного трения в нескольких сечениях, параллельных боковым стенкам траншеи. В работе [9] выполнено измерение скоростей также в двух сечениях траншеи, в которых превалирует одна компонента скорости. Приведенный краткий анализ имеющихся экспериментальных результатов показывает, что этих данных недостаточно для детального представления о характере течения в траншее.

1. Описание экспериментальной установки и методики измерений.

Данная работа выполнена на гидродинамическом контуре, в котором для поддержания расхода воды служил бак постоянного уровня. Вода из нижнего бака с помощью насоса подается в верхний бак (постоянного уровня), затем она поступает в успокоительную камеру сечением 200×200 мм, где установлены выравнивающие сетки и далее через конфузор в плоский участок с сечением 100×10 мм, состоящий из трех секций. Опытная траншея с размерами поперечного сечения 40×40 мм расположена на нижней стенке третьей секции участка. Ширина траншеи равна ширине плоского участка (100 мм). Боковые стенки третьей секции выполнены из оптических стекол, которые установлены заподлицо с боковыми стенками предвключенного участка. Траншея расположена на расстоянии 1500 мм от начала плоского участка. Вода после опытного канала через регулировочный вентиль поступает в нижний бак, в котором установлен теплообменник.

Измерение скорости движения жидкости проведено с помощью ЛДИС [10]. Доплеровская частота связана с параметрами оптической схемы и вектором скорости соотношением (при условии $2\alpha \leq 15^\circ$)

$$f_g = i(\bar{U} \cos \gamma \cdot \cos \varphi) b / \lambda F,$$

где \bar{U} — вектор скорости, произвольно ориентированный в пространстве, м/с; γ — угол между проекцией вектора скорости на плоскости падающих пучков и нормалью к биссектрисе угла между пучками; φ — угол наклона вектора скорости к плоскости падающих пучков; 2α — угол

между падающими пучками; λ — длина волны излучения лазера; b — расстояние между центрами формирующих диафрагм; F — фокусное расстояние направляющего объектива; f_g — доплеровская частота, МГц.

В данной оптической схеме коэффициент пропорциональности между доплеровской частотой и измеряемой компонентой скорости получился равным 11,5, т. е.

$$f_g = 11,5 \bar{U}$$

$$(b = 4,40 \text{ мм}, F = 80 \text{ мм}, \gamma = F = 0, \lambda = 0,6328 \cdot 10^{-3} \text{ мм}).$$

В работе проведено последовательное измерение поперечной и продольной составляющих средней скорости потока. При измерении продольной составляющей \bar{U} плоскость падающих пучков устанавливается строго параллельно дну траншеи, а биссектриса угла между падающими пучками параллельно ребрам траншеи. Фокальная область находится на равном расстоянии от боковых стенок канала. Размеры фокальной области $100 \times 100 \times 800$ мкм. Нулевые значения координат определялись визуально по касанию стенок канала фокальной областью. Ширина канала по ходу луча 100 мм, толщина оптических стекол 10 мм. На расстоянии 50 мм от фокальной области диаметр лазерного пучка 0,5—0,6 мм. Минимальное расстояние от стенок, на котором было произведено измерение скорости, ~ 1 мм. Время осреднения при измерении одного значения скорости устанавливалось в пределах 3—5 с. На всех фигурах приведены значения скорости, являющиеся средними величинами 3—4 измерений. После измерений продольной составляющей вектора скорости оптическая схема ЛДИС перестраивалась на измерения поперечной составляющей скорости.

Измерение скорости проводилось в 2—3 сечениях канала перед траншеей, по всему сечению траншеи с шагом 1—2 мм (как по поперечной, так и по продольной координатам) и в 1—2 сечениях в канале за траншеей.

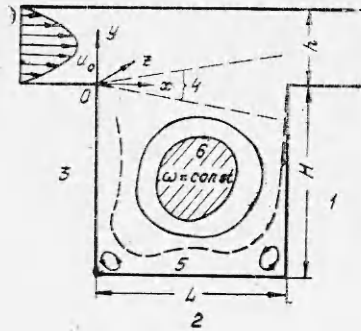
При $Re = 1500$ в траншее имеются зоны с очень малыми величинами средней скорости, выходящими за нижний предел измерения электронной части ЛДИС ($u < 1$ мм/с). Измерение скорости в этом случае производилось с помощью коррелятора. Доплеровский сигнал с выхода дифференциального усилителя поступал на вход коррелятора. На экране дисплея коррелятора получался график автокорреляционной функции, имеющей вид затухающей косинусоиды. Измеряя период автокорреляционной функции, определяли среднее значение периода доплеровской частоты.

Исследования течения в траншее проведены при двух значениях числа $Re = 1500$ (ламинарный режим) и $Re = 15000$ (турбулентный режим)

$$Re = u_0 2h/\nu,$$

где u_0 — скорость жидкости на оси канала в сечении, расположенном на расстоянии 10 мм от траншеи вверх по потоку; h — высота канала (фиг. 1, 1 — задняя стенка траншеи; 2 — дно; 3 — передняя стенка; 4 — область смещения; H — глубина траншеи; L — длина траншеи).

2. Ламинарное течение жидкости. Для случая ламинарного течения жидкости в канале на фиг. 2, а, б (v — поперечная составляющая скорости) приведено распределение продольной и поперечной составляющих средней скорости потока во всей исследованной области. На фиг. 3, а показано поле средней скорости в траншее. В канале перед траншеей экспериментальный профиль скорости полностью совпадает с теорети-



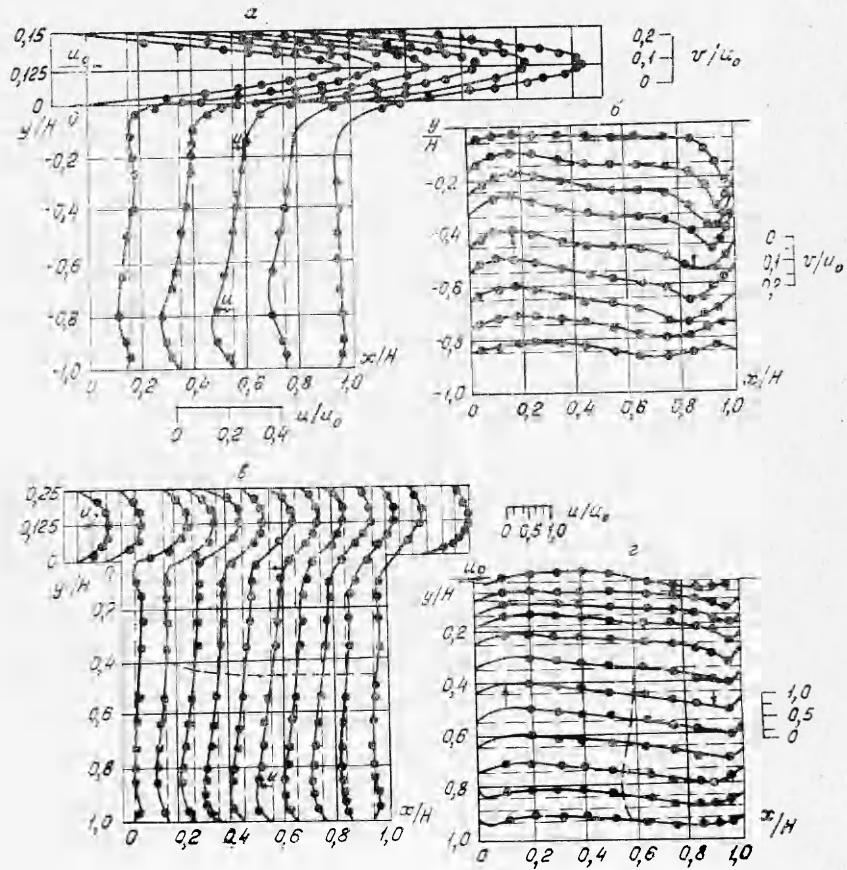
Фиг. 1

ческим распределением скорости Хагена-Пуазейля в зазоре между двумя параллельными пластинами

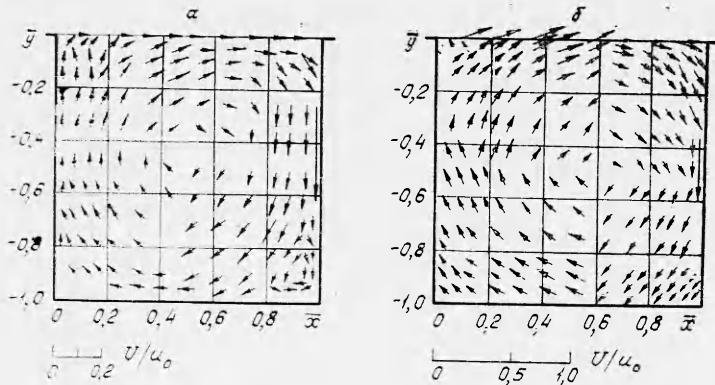
$$u/u_0 = 4(y/h) - 4(y/h)^2.$$

Из фиг. 2 а, б, 3, а видно, что в траншее возникает развитое циркуляционное движение. Область, примыкающую к верхнему срезу траншеи, можно рассматривать как зону смешения струи, образующейся после срыва потока в точке $x = 0, y = 0$ с потоком в траншее. После удара струи о заднюю стенку траншеи образуется пристенная струя, распространяющаяся вдоль всех стенок траншеи. В правом нижнем углу траншеи

образуется вторичный вихрь, вращающийся (в отличие от основного вихря) в другую сторону. Зона, занимаемая этим вихрем, составляет 6% от площади поперечного сечения траншеи. В левом нижнем углу образуется застойная зона. Площадь, занимаемая этой зоной, составляет 2% от площади поперечного сечения траншеи. Рассмотрим более детально течение в различных областях траншеи.



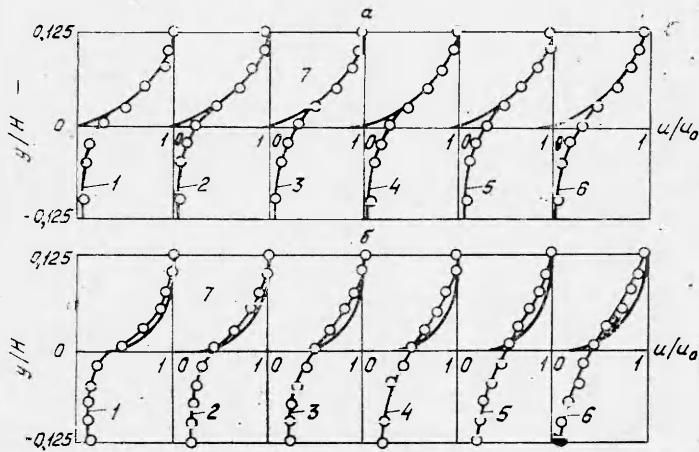
Фиг. 2



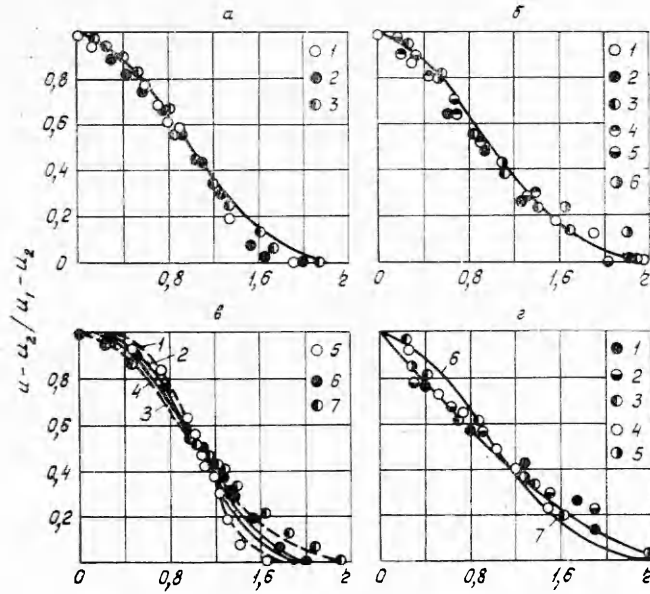
Фиг. 3

Зона смешения. Профили продольной составляющей средней скорости в области, примыкающей к плоскости zOx (см. фиг. 1), для нескольких сечений струи представлены на фиг. 4, а ($1 - \bar{x} = x/H = 0,25$; $2 - \bar{x} = 0,35$; $3 - \bar{x} = 0,55$; $4 - \bar{x} = 0,65$; $5 - \bar{x} = 0,75$; $6 - \bar{x} = 0,95$). Величина $\bar{y} = y/H = 0,125$ соответствует расположению осевой линии канала. Здесь же для сравнения нанесен параболический профиль 7. Экспериментальные профили скорости во всех сечениях струи, начиная с $\bar{x} = 0,25$, практически совпадают между собой, а в приосевой зоне — и с начальным параболическим профилем скорости в канале.

Линию, являющуюся продолжением оси канала над траншеей, можно условно принять за осевую линию струи, образующейся в зоне смешения после отрыва потока в точке $x = 0, y = 0$. На фиг. 5, а эти же профили скорости представлены в координатах $\bar{u}, \eta_{1/2}$, где $\bar{u} = (u - u_2)/(u_1 - u_2)$; u_1 — скорость на оси струи ($\bar{y} = 0,125$); u_2 — скорость на внешней границе струи $\eta_{1/2} = y/\delta_{1/2}$; $\delta_{1/2}$ — условная толщина струи (расстояние от оси струи, где $\bar{u} = 1$, до точки, в которой $\bar{u} = 0,5$) ($1 - \bar{x} = 0,15$; $2 - \bar{x} = 0,45$; $3 - \bar{x} = 0,85$). За внешнюю границу струи принимается точка, в которой $\partial u/\partial y = (\partial u/\partial y)_{\text{ядра}} = \text{const}$. Здесь же нанесен (сплошной ли-



Фиг. 4



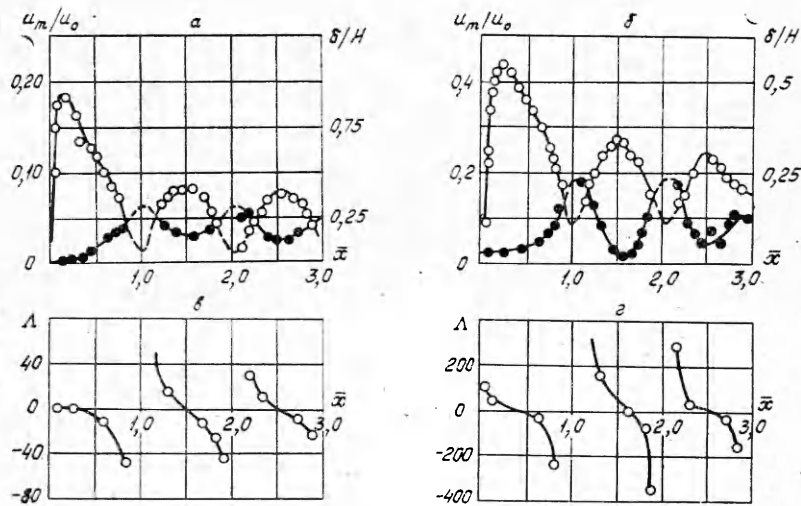
Фиг. 5

нией) универсальный профиль скорости в соответствии с формулой [11]

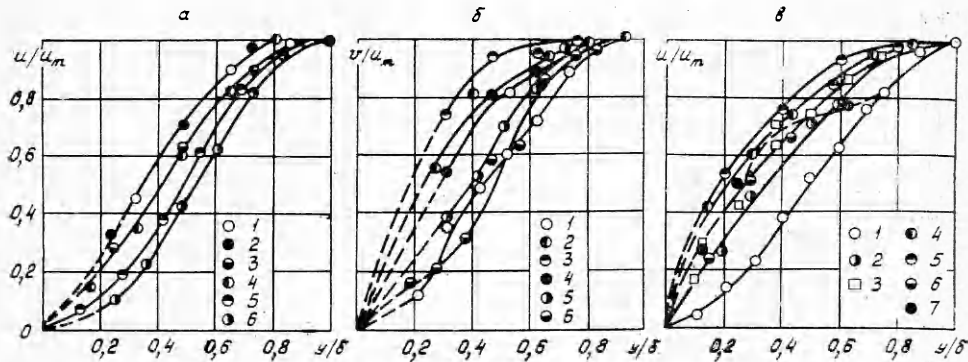
$$(2.1) \quad (u-u_2)/(u_1-u_2) = 1-6\eta^2 + 8\eta^3 - 3\eta^4,$$

где $\eta = y/\delta$, δ — полуширина струи. Экспериментальные профили скорости в струе практически совпадают с универсальным профилем скорости.

Пограничный слой. Как указано выше, вдоль стенок траншеи распространяется пристенная струя. Пристенную струю обычно разделяют на две части: пристенный пограничный слой и струйную область [11—14]. Положим, что пограничный слой жидкости простирается от стенки тран-



Фиг. 6



Фиг. 7

шей до точки, в которой скорость имеет максимум. Построим распределение скорости на границе пограничного слоя и толщины пограничного слоя (на фиг. 6, *a* обозначены светлыми и темными кружками соответственно) по продольной координате, условно развернув стенки траншеи на плоскости. Имея эту зависимость, можно построить распределение формпараметра Λ , характеризующего влияние продольного градиента скорости на ламинарный пограничный слой (фиг. 6, *в*). Значения формпараметра определялись по формуле

$$\lambda = (\delta^2/\nu) \cdot du_{\max}/dx.$$

На фиг. 7 показаны экспериментальные профили продольной составляющей средней скорости в пограничном слое на задней стенке, дне и передней стенке траншеи. На задней стенке траншеи (фиг. 7, *a*, 1 — $\bar{x} = 0,35$; 2 — $\bar{x} = 0,45$; 3 — $\bar{x} = 0,5$; 4 — $\bar{x} = 0,6$; 5 — $\bar{x} = 0,7$; 6 — $\bar{x} = 0,75$) профиль скорости с уменьшением формпараметра Λ от 0 до 40 перестраивался от заполненного до отрывного, что качественно согласуется с результатами расчета Польгаузена для плоского пограничного слоя при наличии градиента давления. Формпараметр Λ для обычного ламинарного пограничного слоя изменяется в пределах $-12 \leq \Lambda \leq 12$. В нашем случае (см. фиг. 6, *в*) отрыв пограничного слоя наступал значительно позже, что, по-видимому, связано с наличием отрицательной завихренности потока на внешней границе пограничного слоя. При переходе от задней стенки на дно траншеи (фиг. 7, *б*, 1 — $\bar{x} = 1,25$; 2 — $\bar{x} = 1,35$; 3 — $\bar{x} = 1,45$; 4 — $\bar{x} = 1,65$; 5 — $\bar{x} = 1,8$; 6 — $\bar{x} = 1,85$) знак формпараметра Λ скачком изменяется на противоположный, но отрывной профиль при этом переносится с задней стенки на дно траншеи, вследствие чего характер распределения скорости по сечению пограничного слоя не соответствует величине и знаку формпараметра Λ . Далее поток развивался таким образом, что при уменьшении Λ до нуля профиль скорости заполнялся, а при дальнейшем уменьшении Λ ($\Lambda < 0$) он перестраивался до отрывного. Аналогичный характер изменения профиля скорости наблюдается и на передней стенке траншеи (фиг. 7, *в*, 1 — $\bar{x} = 2,15$; 2 — $\bar{x} = 2,2$; 3 — $\bar{x} = 2,25$; 4 — $\bar{x} = 2,3$; 5 — $\bar{x} = 2,5$; 6 — $\bar{x} = 2,75$; 7 — $\bar{x} = 2,9$). Это говорит о том, что при расчете такого своеобразного пограничного слоя, развивающегося на дне и передней стенке траншеи, нельзя применять методы расчета для обычного ламинарного пограничного слоя при нали-

чи градиента давления. Аномальный характер имеет профиль скорости на передней стенке траншеи вблизи точки срыва потока ($x = 0, y = 0$).

Внешняя часть пристенной струи. Под внешней частью струи будем понимать область течения, лежащую между ядром потока и пограничным слоем. Известно [11, 14], что во внешней (струйной) части пристенной струи в точке максимальной скорости касательное напряжение не равно нулю и линия максимальных скоростей не является линией тока. Прямые измерения [15], однако, показывают, что смещение точки нулевого касательного напряжения относительно точки максимальной скорости незначительное, и поэтому можно считать, что векторы максимальных скоростей лежат на линии тока. Рассмотрим сечения струи, перпендикулярные к векторам максимальных скоростей. Значение продольной составляющей скорости найдем проектированием вектора скорости в каждой точке сечения на направление вектора максимальной скорости. На фиг. 5, 6 ($1 - \bar{x} = 0,20$; $2 - \bar{x} = 0,35$; $3 - \bar{x} = 0,50$; $4 - \bar{x} = 0,65$; $5 - \bar{x} = 0,95$, \bar{x} отсчитывается вдоль линии тока) видно, что профили продольной составляющей скорости во внешней части пристенной струи совпадают с универсальным профилем скорости для плоской струи [11].

Обработка экспериментальных данных показала, что кинематический импульс части струи в зоне смещения (ниже линии $y = 0$) равен импульсу пристенной струи в сечении, расположенном сразу после поворота струи в траншею. Изменение максимальной скорости в пристенной струе вдоль линии тока в траншее практически совпадает с зависимостью, полученной для плоской свободной ламинарной струи [16]

$$u_{\max} = 0,454(K^2/\nu x)^{1/3},$$

где K — кинематический импульс струи. Начальное значение продольной координаты x_0 определялось по этой же формуле по измеренным величинам u_{\max} и K в начальном сечении струи.

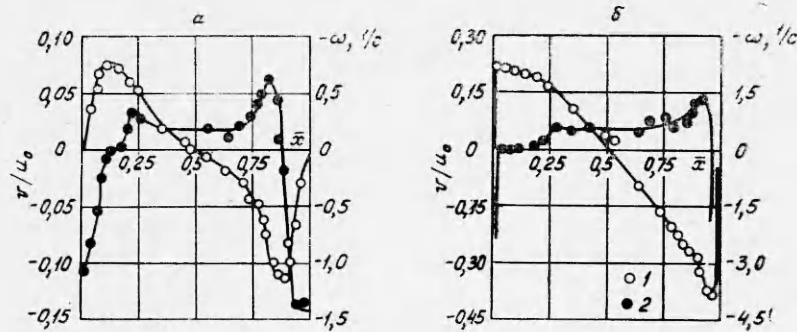
Ядро. Имея значения продольной поперечной составляющей скорости по всему сечению траншеи, можно рассчитать распределение вихревой напряженности ω

$$[\omega = 1/2 \{(\partial v/\partial x) - (\partial u/\partial y)\},$$

где u — составляющая скорости, направленная вдоль оси x ; v — составляющая скорости, направленная вдоль оси y .

На фиг. 8, а ($1 - v/u_0$; $2 - \omega$) показано распределение завихренности в плоскости, параллельной дну траншеи, расположенной от него на расстоянии $H/2$. В центре траншеи имеется зона с постоянной завихренностью. Во внешней части пристенной струи, распространяющейся вдоль стенок траншеи наблюдается повышение завихренности. Это увеличение наиболее заметно на задней стенке траншеи. В области пограничного слоя завихренность изменяет знак на противоположный.

3. Турбулентное течение. В траншее возможны самые различные сочетания режимов течения. При ламинарном течении в канале перед траншеей в зоне смешения могут реализоваться как ламинарное, так и турбулентное течения. При турбулентном течении в зоне смешения на стенках траншеи могут развиваться ламинарный или турбулентный пограничные слои. Обсудим экспериментальные результаты исследования течения жидкости в канале и в траншее при $Re = 15000$. При этом в канале осуществляется турбулентный режим течения с профилем скорости, близким к степенному ($n = 1/7$). На фиг. 2, в, г приведено распределение продоль-



Фиг. 8

ной составляющей средней скорости потока по всему сечению траншеи. На фиг. 3, б приведено поле скоростей в траншее. После удара основной струи, образующейся в зоне смешения, о заднюю стенку в траншее распространяется пристенная струя. Причем значительная часть начального импульса струи теряется при распространении ее вдоль задней стенки. Как и при ламинарном течении, в центре траншеи имеется область с постоянной завихренностью. Вторичный вихрь в правом нижнем углу и застойная зона в левом нижнем углу траншеи занимают площадь, в несколько раз меньшую по сравнению с ламинарным течением. В углах траншеи и в центральной части зоны с постоянной завихренностью наблюдались большие флуктуации вектора скорости, что значительно увеличивало погрешность измерений в этих областях.

Зона смешения. На фиг. 4, б (1 — $\bar{x} = 0,25$; 2 — $\bar{x} = 0,35$; 3 — $\bar{x} = 0,5$; 4 — $\bar{x} = 0,65$; 5 — $\bar{x} = 0,75$; 6 — $\bar{x} = 0,95$; 7 — $\bar{x} = 1/7$) представлено распределение скорости в зоне смешения на различных расстояниях от точки срыва потока. Скорость на оси струи и на ее внешней границе мало изменяется по продольной координате. Относительная величина скорости на внешней границе струи значительно выше соответствующей скорости при ламинарном течении. Здесь же для сравнения нанесен степенной профиль скорости в канале перед траншеей. Видно, то профиль скорости в струе по сравнению с ламинарным струйным течением перестраивается значительно быстрее. На фиг. 5, в (1 — $\Pi = 0$; 2 — $\Pi = -2$; 3 — $\Pi = -5$; 4 — $\Pi = -12$; 5 — $\bar{x} = 0,25$; 6 — $\bar{x} = 0,5$; 7 — $\bar{x} = 0,75$) те же скорости в струе представлены в безразмерных координатах

$$\bar{u} = (u - u_2)/(u_1 - u_2); \eta = y/\delta_{1/2}.$$

3 такой обработке экспериментальные профили совпадают с теоретическими профилями скорости в переходном участке турбулентной струи [11] при различных значениях параметра

$$\Pi = (\partial^2 \bar{u} / \partial \eta^2)_{\eta=0},$$

характеризующего градиент скорости на оси струи, где

$$\begin{aligned} \bar{u} &= (u - u_2)/(u_1 - u_2); \eta = y/\delta; \bar{u} = (1 - 60f_2) + \\ &+ \Pi(f_1 - 12f_2); f_1 = (1/2)\eta^2 - (4/5)\eta^5 + (1/2)\eta^6; \\ f_2 &= (1/4)\eta^4 - (2/5)\eta^5 + (1/6)\eta^6. \end{aligned}$$

В начале переходного участка струи производная от скорости по продольной координате равна нулю. Отсюда вытекает условие, характеризующее начальный профиль скорости $\Pi = 0$. При больших отрицательных значениях Π ($|\Pi| > 0$) формула (3.1) дает отрицательное значение скорости вблизи внешней границы струи, что физически невозможно. Следовательно, для переходного участка струи выполняется условие

$$-10 < \Pi < 0.$$

Пограничный слой. При турбулентном режиме течения в канале перед траншеей толщина пограничного слоя на стенках траншеи мала, поэтому невозможно провести измерения скорости в пограничном слое. Некоторые качественные выводы о структуре пограничного слоя сделать можно, проанализировав изменение скорости на границе пограничного слоя и его толщины вдоль стенок траншеи (см. фиг. 6, б). Характер изменения скорости на границе пограничного слоя приблизительно такой же, как и при ламинарном течении (см. фиг. 6, а). Однако наибольшая величина безразмерной скорости достигает значения 0,4 на задней стенке, 0,27 — на дне, 0,23 — на передней стенке траншеи, что выше соответствующих значений скорости при $Re = 1500$. Эти значения приблизительно равны величинам максимальных скоростей в пограничном слое, полученных в работе [7]. Отрыв пограничного слоя от стенки (см. фиг. 6, з) происходит при значениях формпараметра Польшаузена Λ , на порядок превышающих отрывное значение для ламинарного пограничного слоя. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что пограничный слой в данном случае турбулентный.

Внешняя часть пристенной струи. На фиг. 5, з (1 — $\bar{x} = 0,20$; 2 — $\bar{x} = 0,35$; 3 — $\bar{x} = 0,50$; 4 — $\bar{x} = 0,65$; 5 — $\bar{x} = 0,95$; \bar{x} отсчитывается вдоль линии максимальных скоростей) приведены экспериментальные профили скорости, обработанные по той же методике, что и внешняя часть ламинарной пристенной струи. Здесь же для сравнения приведен профиль скоростей в зоне смешения (кривая 7) на расстоянии $\bar{x} = 0,7$ (рассматривается только внешняя часть профиля скорости, расположенная ниже линии $y = 0$). Кривая 6 — универсальный профиль скорости в соответствии с формулой (2.1). Это сравнение показывает, что профили скорости во внешней части турбулентной струи сохраняют вид начального распределения скорости в той части струи, которая затем поворачивает в траншею и распространяется вдоль ее стенок. Кинематический импульс этой части струи в зоне смешения (ниже линии $y = 0$) на 20% больше импульса пристенной струи сразу после поворота струи в траншею ($\bar{y} = 0,2$). Изменение максимальной скорости в пристенной струе вдоль линии тока в траншее практически совпадает с кривой, рассчитанной по уравнению [16] $u_{\max} = 2,40 \sqrt{K/x}$. Начальное значение продольной координаты x_0 определялось так же, как и при $Re = 1500$.

Ядро. Распределение вихревой напряженности ω в плоскости, параллельной дну траншеи, показано на фиг. 8, б (1 — \bar{v} ; 2 — ω), где участок с постоянной завихренностью имеет большую протяженность по сравнению с соответствующим участком при ламинарном течении. Увеличение завихренности в пристенной струе наблюдается только на задней стенке траншеи, и это повышение меньше, чем при $Re = 1500$.

В опытах наблюдалось некоторое несоответствие в расходах для двух симметричных половинок сечения траншеи, например для горизонтального сечения при $y/H = 0,5$ ($Re = 1500$) втекает жидкости на 12% боль-

ше, чем вытекает. При $Re = 15000$ это несоответствие меньше, но все же имеет место. Такое явление, конечно, не связано с точностью измерений скорости, которая должна обеспечивать сведение баланса с погрешностью не более 1—2%.

Возможное объяснение эффекта может быть связано с возникновением некоторой несимметрии в плоскости измерений за счет трехмерности течения, вызванного трением центрального вихря о торцевые стенки траншеи.

В работе [17] проведена приближенная оценка систематических и случайных ошибок, возникающих при измерении составляющих вектора средней скорости. Систематические ошибки, обусловленные неточностью юстировки оптической схемы ЛДИС, могут быть сведены до долей процента. Такой же порядок ошибки определения масштабного коэффициента оптической схемы. При обезразмеривании результатов эксперимента ошибки систематического характера исключаются. Более существенный вклад вносят ошибки, связанные с характером самого доплеровского сигнала и с процедурой его обработки электронной схемой ЛДИС.

Известно, что даже при отсутствии турбулентных пульсаций и градиента скорости в пределах измерительного объема ЛДИС спектр доплеровского сигнала имеет конечную ширину, обратно пропорциональную времени пролета рассеивающих частиц через измерительный объем. Это уширение спектра, получившее в литературе название доплеровской неопределенности, является причиной дисперсии измерений, величина которой может быть оценена по формулам, приведенным в работе [18]. Дисперсия проявляется в виде вариации показаний цифрового частотомера ЛДИС и в виде шума на выходе частотного детектора, уровень которого ограничивает нижний предел измерения параметров турбулентности. Ошибка, рассчитанная по теоретической формуле работы [18] для $Re = 1500$ и времени осреднения 1 с, получается равной 0,1%.

По результатам экспериментов были оценены относительные среднеквадратичные ошибки определения средней скорости в ламинарном и турбулентном режимах течения в различных зонах канала и траншеи (ошибка рассчитывалась как коэффициент вариации по десяти показаниям цифрового частотомера при времени осреднения 1 с). В центре канала при $Re = 1500$ значение ошибки составило 0,2%, а у стенок канала — 1,2%. Возрастание дисперсии показаний в пристенной зоне объясняется дополнительным уширением спектра доплеровского сигнала за счет градиента скорости. В турбулентном режиме дисперсия показаний также выше. Расчетные значения ошибок в центре канала и у стенок в турбулентном режиме ($Re = 15000$) составили 0,5 и 2,5% соответственно. В траншее вблизи стенок и у дна ошибка измерения вектора средней скорости в ламинарном режиме была в пределах 2—3%, а в турбулентном режиме вследствие больших флуктуаций вектора средней скорости вариация показаний достигла 10%. В углах траншеи и центральной части ядра вихря, где компоненты вектора скорости были переменными по знаку, измерения не производились. Следует также учитывать смещение оценки средней скорости, которое вносится электронной схемой фильтрации доплеровского сигнала. Предварительные расчеты показали, что если среднее значение частоты спектра доплеровского сигнала (для ламинарного безградиентного потока) не совпадает с центральной частотой фильтра, то максимальное смещение оценки средней скорости составляет 1,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wieghardt K.** Erhöhung des turbulenten Reibungswiderstandes durch Oberflächenstörungen. *Forscheft, Schiffstech*, 1953, N 2, S. 65—81.
2. **Townes H. W., Sabersky R. H.** Experiments on the Flow over a rough Surface.—*«Int. J. Heat Mass Transfer»*, 1966, vol. 9, N 8, p. 729—738.
3. **Pan F., Acrivos A.** Steady Flos in rectangular cavities.—*«J. of Fluid Mech.»*, 1967, vol. 28, pt. 4, p. 643—655.
4. **Божков В. М.** Экспериментальное изучение рециркуляционных течений в прямоугольных канавках.—*«Учен. зап. ЦАГИ»*, т. IV, № 1, с. 1073.
5. **Fox J.** Heat Transfer and Air Flow in Trasverse rectangular Notch.—*«Int. J. Heat Mass Transfer»*, 1965, vol. 8, p. 269—270.
6. **Fox J.** A Criterion for the Transition between Flow Regimes in Turbulent Cavity Flow.—*«AIAA J.»*, 1966, vol. 4, N 2.
7. **Roshko A.** Some measurements of Flow in a rectangular cut out. NACA TN 3488, 1956.
8. **Tani I., Iuchi M., Komoda H.** Experimental Investigation of Flow Separation associated with a Step or a Groove Aeronautical Research Institute. University of Tokyo, Rept. N 364, 1961.
9. **Mills R. D.** On the closed Motion of Fluid in a square Cavity.—*«J. of the Royal Aero. Soc.»*, 1965, vol. 69, N 650, p. 116—118.
10. **Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. П., Коронкевич В. Н.** и др. Лазерный доплеровский измеритель скорости с параллельной фильтрацией.— В кн.: Когерентно-оптические доплеровские устройства в гидродинамическом эксперименте. Новосибирск, изд. ИАЭ СО АН СССР, 1974.
11. **Гиневский А. С.** Теория турбулентных струй и следов. М., «Машиностроение», 1969.
12. **Волячков Э. П., Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И.** Взаимодействие затопленной турбулентной струи с твердой стенкой.— ИМТФ, № 2, 1965.
13. **Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И.** Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М., «Энергия», 1972.
14. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. М., «Наука», 1970.
15. **Гиневский А. С.** Расчет переходного участка турбулентной струи.—*«Изв. АН СССР. МЖГ»*, № 3, 1966.
16. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М., «Наука», 1969.
17. **Богатырев В. Я., Дубнищев Ю. И., Мухин В. А.** и др. Исследование течения в траншее прямоугольного сечения лазерным доплеровским измерителем скорости.— В кн.: Когерентно-оптические доплеровские устройства в гидродинамическом эксперименте. Новосибирск, изд. ИАЭ СО АН СССР, 1974.
18. **Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. П., Коронкевич В. П., Соболев В. С., Столповский А. А., Уткин Е. И.** Лазерные доплеровские измерители скорости. Новосибирск, «Наука», 1975.

УДК 533. 697. 4

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕЧЕНИЙ СМЕСЕЙ
ЧАСТИЦ ЛЕГКОПЛАВКОГО МЕТАЛЛА
И ГАЗОВ В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ**

И. И. Иванов, Р. А. Иванова

(Москва)

Имеется ряд работ [1—11] по определению параметров частиц конденсированной окиси, образующейся при горении металлизированных топлив. Неоднозначность, а иногда и противоречивость полученных опытных результатов [3—5, 9—11] свидетельствуют о трудности проведения корректных эксперимен-