4. *Loeb J., Cahen G.* Extraction, à partir des enregistrements de mesures, des paramètres dynamiques d'un système. Automatisme. 1963, t. 8, № 12.
5. *Loeb J., Cahen G.* More about process identification. IEEE Trans. Automat. Control, 1965, vol. AC-10, № 3.
6. *Takaya Kunio.* The use of Hermite functions for system identification. IEEE Trans. Automat. Control, 1968, vol. AC-13, № 4.
7. *Буровой И. А., Предкин Н. И.* Идентификация гетерогенных каталитических процессов динамическими моделями с использованием модулирующих функций. Теор. основы хим. технологии, 1972, т. 6, № 2.
8. *Кущев Б. И., Лукашевский В. Н., Пустыльник Е. И.* О некоторых особенностях метода модулирующих функций. Тр. Воронежск. технол. ин-та, 1972, т. 19, вып. 1.
9. *Кущев Б. И., Лукашевский В. Н., Пустыльник Е. И.* Об оценке параметров химического реактора, определяемых по методу модулирующих функций. Тр. Воронежск. технол. ин-та, 1972, т. 19, вып. 1.
10. *Георгиевский В. Б.* Унифицированные алгоритмы для определения фильтрационных параметров. Киев, «Наукова думка», 1971.
11. *Булыгин В. Я.* Гидромеханика нефтяного пласта. М., «Недра», 1974.
12. *Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.* Методы решения некорректных задач. М., «Наука», 1974.

УДК 532.57

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ВХОДНОМ УЧАСТКЕ ПЛОСКОГО КАНАЛА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ДОППЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ

В. П. ИВАНОВ, В. П. КЛОЧКОВ, Л. Ф. КОЗЛОВ, В. И. ОРЛАНОВ

(Киев)

Приводятся результаты экспериментального исследования скоростной структуры течения Пуазейля на начальном участке плоского горизонтального канала с ударным профилем скорости на входе при Re=300 и 500. Дано описание экспериментальной установки и методики измерения поля скоростей в данном канале с помощью лазерного допплеровского измерителя скорости (*ЛДИС*). Получены профили скорости, которые имеют вогнутость на оси канала, что совпадает с результатами численных расчетов [1].

1. Математически задача о течении вязкой и несжимаемой жидкости в плоском горизонтальном канале сводится к решению системы уравнений с соответствующими граничными условиями, которые в безразмерной форме имеют вид

$$U_x\frac{\partial U_x}{\partial x}+U_y\frac{\partial U_x}{\partial y}=-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{4}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2}\right)$$

$$U_x\frac{\partial U_y}{\partial x}+U_y\frac{\partial U_y}{\partial y}=-\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{4}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2}\right)$$

$$\frac{\partial U_x}{\partial x}+\frac{\partial U_y}{\partial y}=0$$

$$U_x=U_y=0\ \ (y=1),\ \frac{\partial U_x}{\partial y}=0,\ U_y=0\ \ (y=0),\ U_x=1,\ U_y=0\ \ (x=0),$$

$$U_x={}^3/_2(1-y^2),\ \ U_y=0\ (x=\infty)$$

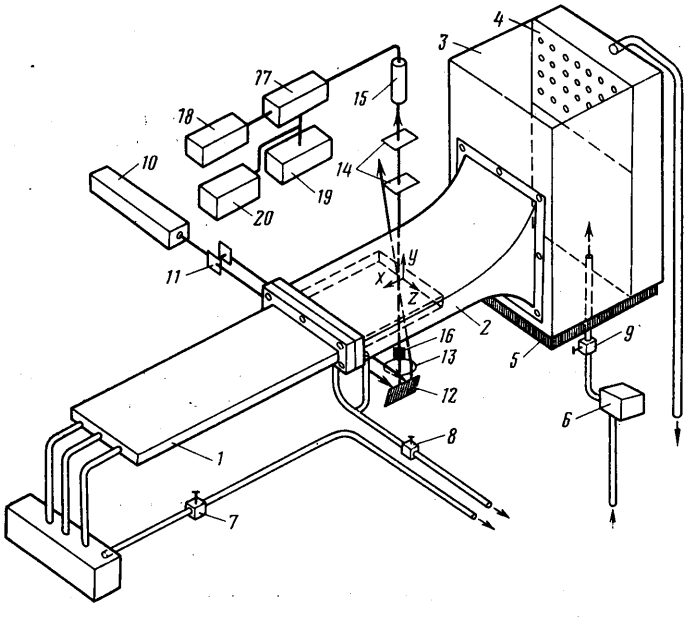
Здесь Re — число Рейнольдса, а P, U_x, U_y — безразмерные давление и составляющие скорости.

При решении этой системы методом конечно-разностных аппроксимаций в [1] получено распределение скоростей в плоском канале с ударным профилем скорости на входе в виде функций координат. Система координат выбрана таким образом,

что ось x была направлена вдоль канала, а ось y — перпендикулярно широким стенкам. Начало координат помещалось на входе в канал на равном расстоянии от его широких стенок. Аналогичная задача была решена также и в [2].

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование с помощью *ЛДИС* развития течения Пуазейля в плоском горизонтальном канале с ударным профилем скорости на входе и сравнение полученных результатов с теоретическими.

2. Для решения задачи был собран гидродинамический стенд (фиг. 1), состоящий из плоского горизонтального канала *1*, переходного конфузора *2*, бака постоянного напора *3* с успокоительной стенкой *4*, помещенных на координатник *5*, который обеспечивал перемещение по любой из трех координат с точностью 0.025 *мм*,



Фиг. 1

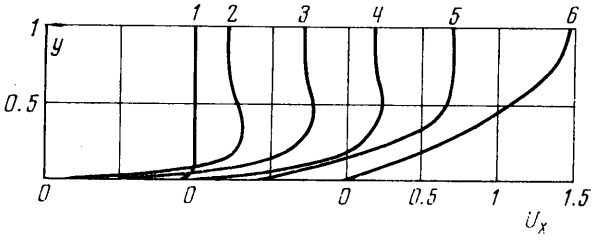
насоса *6* и соединительных шлангов с регулировочными кранами *7–9*. Соединение канала с конфузором выполнено подвижным с помощью резинового уплотнения и фланца, что позволяет перемещать канал относительно конфузора. В поперечном сечении канал с конфузором представляют собой конструкцию типа «труба в трубе», что обеспечивает достаточно плоский профиль скорости на входе в канал. Отношение сторон канала было выбрано таким, чтобы исключить влияние боковых стенок и ограниченной длины канала на развитие течения, и составляло $x:y:z=1:10:120$. Для уменьшения возмущений потока на входе в канал начальный участок последнего длиной 120 *мм* был изготовлен из оргстекла толщиной 0.8 *мм*, а передняя кромка заточена под углом 45° с внешней стороны.

Измерительная часть представляет собой лазерный допплеровский измеритель скорости с опорным лучом, собранный по схеме [3], и состоит из одномодового лазера *10* типа *ЛГ-38*, делителя лазерного луча *11*, зеркала *12*, фокусирующей линзы *13*, диафрагм *14*, блока фотоприемника *15* с фотоумножителем типа *ФЭУ-79* и приемным объективом, нейтральных фильтров *16* для ослабления прямого лазерного луча, широкополосного усилителя *17* типа *УЗ-7А*, анализатора спектра частот *18* типа *С4-12* и анализаторов гармоник *19* и *20* типов *С5-2* и *С5-3* соответственно.

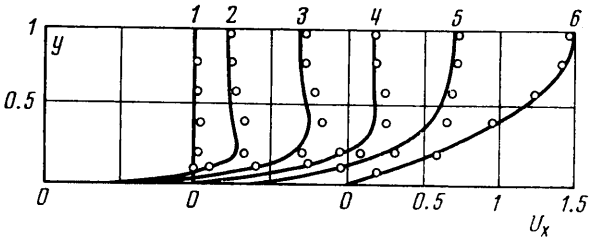
Включение и регулировка установки производятся следующим образом. После включения насоса и заполнения бака *3* водой в канале устанавливается течение с заданным числом Re, величина которого регулируется по расходу краном *7*. Расход воды измеряется мерным стаканом и секундомером. Затем настраивается оптическая и электронная схемы ЛДИС и производится пробный промер профиля скорости в 2–3 *мм* перед входом в канал. Регулируя расход воды по конфузору краном *8* и производя замеры скорости перед входом в канал добиваются того, чтобы профиль скорости в этой области имел в центральной части плоскую «полочку» более широкую, чем высота канала. После этого считается, что на входе в канал организован ударный профиль скорости.

Принцип работы ЛДИС подробно освещен во многих работах, например [4–6]. При измерениях, проводимых с помощью ЛДИС, величине скорости потока в измеряемой точке соответствует определенная частота электрического сигнала на выходе ФЭУ. Для выделения этого сигнала и измерения его частоты и других параметров используется различная электронная аппаратура. В данной работе для этой цели применяются широкополосный усилитель, анализатор спектра частот и анализаторы гармоник.

Измерения продольной составляющей скорости U_x как функции $U_x(y)$ производились при одиннадцати различных значениях x. Профиль скорости в каждом сечении строился по двадцати экспериментальным точкам. В качестве начала отсчета



Фиг. 2



Фиг. 3

при снятии эпюр скоростей использовалась одна из широких стенок канала. В этом случае точка пересечения лазерных лучей (пробный объем) попадала на стенку канала и выходной ток ФЭУ заметно возрастал. По максимуму этого фототока и фиксировалось начало отсчета. Затем, осуществляя перемещение гидростенда с необходимым шагом по оси y с помощью координатника относительно неподвижного пробного объема, производится замер профиля скорости потока в данном поперечном сечении канала. Переход к другому сечению осуществляется перемещением гидростенда с помощью того же координатника вдоль оси x. Погрешность при измерениях скорости не превышала 2%.

3. На фиг. 2 показано развитие профиля безразмерной осевой скорости U_x для числа Re=300, измеренное экспериментально. Кривые *1–6* на этих фигурах соответствуют значениям x=0, 0.1, 0.36, 0.83, 1.25, 100. В качестве масштабов для скорости выбрана среднерасходовая скорость, а для y – половина расстояния между широкими стенками канала. Как видно из фиг. 2, в центральной части профиля скорости отчетливо наблюдается вогнутость ($\partial^2 U_x/\partial y^2>0$) для нескольких первых величин x. Аналогичные результаты были получены и для числа Re=500. Обнаруженная вогнутость центральной части профиля уменьшается по мере увеличения x, но не исчезает полностью, пока x не превысит 1.25 для Re=300 и 1.9 для Re=500. Максимальная степень вогнутости достигает 7% при Re=300 и 9% при Re=500. На больших расстояниях от входа в канал вогнутость в конце концов исчезает и скорость достигает состояния полного развития.

Степень центральной вогнутости несколько увеличивается с ростом числа Re. Эта особенность развития профиля скорости наблюдалась и численно в [1, 7]. Аналогичная вогнутость наблюдалась экспериментально при исследовании развития ламинарного течения в вертикальной трубе с изотермическими стенками и при исследовании с помощью ЛДИС развития течения в круглой трубе для чисел Re в диапазоне 108÷340 [8]. Максимальная глубина провала достигала при этом 5.2%. В то время как в [7] степень центральной вогнутости профиля скорости возрастает, в [8] она уменьшается с ростом числа Re. Таким образом, эта вогнутость является реальным, экспериментально наблюдаемым фактом, который подтверждается и при численных расчетах.

На фиг. 3 приводится сравнение измеренных с помощью ЛДИС и теоретически рассчитанных [1] профилей безразмерной скорости при Re=300. Кривые *1–6* соответствуют рассчитанным профилям, скорости для значений x=0, 0.046, 0.357, 0.0833, 1.94, ∞. Аналогичное сравнение было проведено при Re=500 с результатами [2]. Как видно из фиг. 3, экспериментальные точки хорошо совпадают с расчетными значениями, что подтверждает общую справедливость математической модели, методики расчета и адэкватность метода ЛДИС при решении задач в экспериментальной гидродинамике.

4. Приведенные выше данные противоречат результатам, полученным при допущениях теории пограничного слоя [9], которая предполагает плоское распределение скорости в центральной части потока вблизи от входа. На больших расстояниях от входа результаты совпадают.

Вблизи от входа в канал компонента скорости U_y может быть значительна, т. е. градиент скорости вблизи передней кромки канала велик. Это подтверждается расчетами градиента давления [1], который оказывается наибольшим в окрестностях передней кромки канала в направлении y. Высокие радиальные градиенты скорости и давления и возможность образования вихревых колец на входе могут привести к затормаживанию развития профиля скорости, что и приводит к образованию вогнутости в центральной части профиля. Появление этой вогнутости является интересным фактом, так как она может быть связана с неустойчивостью [10–12]. Вопросы эволюции вогнутости с увеличением числа Re и возможности использования ее для предсказания перехода от ламинарного течения к турбулентному требуют дальнейшего экспериментального исследования.

Поступила 4 IX 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wang Y. L., Longwell P. A.* Laminar Flow in the Inlet Section of Parallel Plates. A. J. Ch. E. Journal, 1964, vol. 10, No. 3.
2. *Булеев Н. И., Тимухин Г. И.* Течение вязкой несжимаемой жидкости на входном участке плоского канала. ПМТФ, 1967, № 3.
3. *Goldstein R. J., Kreid D. K.* Measurement of Laminar Flow Development in a Square Duct Using a Laser-Doppler Flowmeter, Trans. ASME, Ser. E., J. Appl. Mechn., 1967, vol. 34, No. 4.
4. *Лебедев И. В., Ринкевичюс Б. С., Ястребова Е. В.* Измерение локальных скоростей мелкомасштабных потоков с помощью ОКГ. ПМТФ, 1969, № 5.
5. *Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П., Соболев В. С., Столповский А. А., Уткин Е. Н., Шмойлов Н. Ф.* Измерение скорости в потоке жидкости с использованием оптического эффекта Допплера. Автометрия, 1969, № 6.
6. *Foreman J. W. et al.* Laser Doppler Velocimeter for Measurement of Localized Flow Velocities in Liquids. Pros. IEEE, 1966, vol. 54, No. 3.
7. *Vrentas J. S., Duba J. L., Borgeron K. G.* Effect of Axial Diffusion of Vorticity on Flow Development in Circular Conduits: Part I. Numerical Solutions. A. J. Ch. E. Journal, 1966, vol. 12, No. 5.
8. *Зельдин, Шмидт.* Развитие течения в условиях смешанной конвекции в вертикальных трубах с изотермическими стенками. Теплопередача, 1972, т. 94, № 2.
9. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М., «Наука», 1974.
10. *Rayleigh.* On the stability or instability of certain fluid motions. In: Rayleigh Sci. Papers. Cambridge Univ. Press., 1899, vol. 1.
11. *Rayleigh.* On the stability or instability of certain fluid motions, 2. In: Rayleigh Sci. Papers, Cambridge Univ. Press., 1902, vol. 3.
12. *Rayleigh.* On the stability or instability of certain fluid motions, 3. In: Rayleigh Sci. Papers. Cambridge Univ. Press., 1903, vol. 4.