

риалов, когда значение α сравнительно велико. Например, для жидких металлов при $R = 1$ см величина α имеет порядок $10-30$.

В заключение автор благодарит В. В. Пухначева, обратившего внимание на эту задачу, и В. И. Юдовича за ценные замечания.

Поступила 31 III 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабский В. Г., Копачевский Н. Д., Мышкис А. Д., Слобожанин Л. А., Тюпцов А. Д. Гидромеханика невесомости. М.: Наука, 1976.
2. Нго Зуй Кан. О вращательном движении твердого тела с полостью, заполненной вязкой жидкостью. — ЖВММФ, 1971, т. 11, № 6.
3. Reid W. H. The oscillations of a viscous liquid globe with a core. — Proc. London Math. Soc., 1959, vol. 9, N 35.
4. Reid W. H. The oscillations of a viscous liquid drop. — Quart. Appl. Math., 1960, vol. 18, N 1.
5. Копачевский Н. Д., Мышкис А. Д. О свободных колебаниях жидкого самогравитирующего шара с учетом вязких и капиллярных сил. — ЖВММФ, 1968, т. 8, № 6.

УДК 532.556.2; 532.574

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В МЕЛКОЙ И ГЛУБОКОЙ КАВЕРНАХ

В. Я. Богатырев, В. А. Мушин

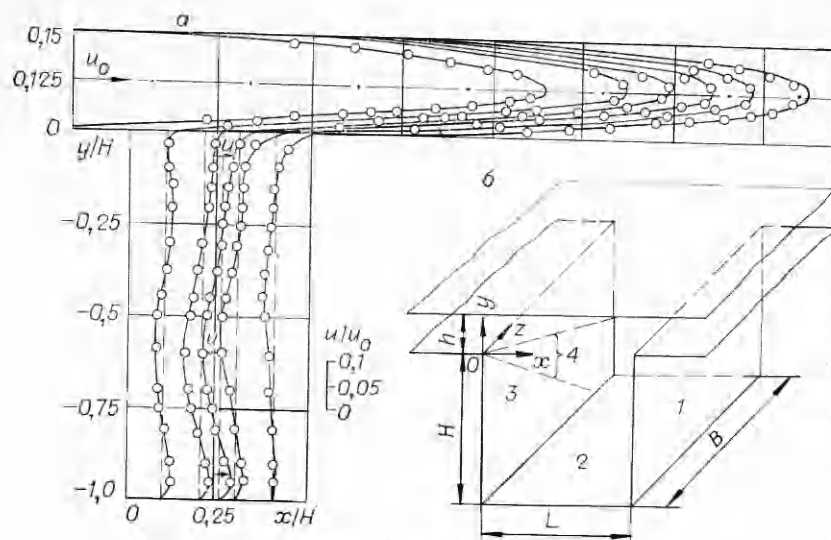
(Новосибирск)

В работе приводятся результаты экспериментального исследования течения несжимаемой жидкости в мелкой и глубокой кавернах прямоугольного поперечного сечения с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС). Опыты проведены при ламинарном режиме течения в канале перед каверной. Получено распределение продольной и поперечной составляющих скорости в центральном сечении каверны.

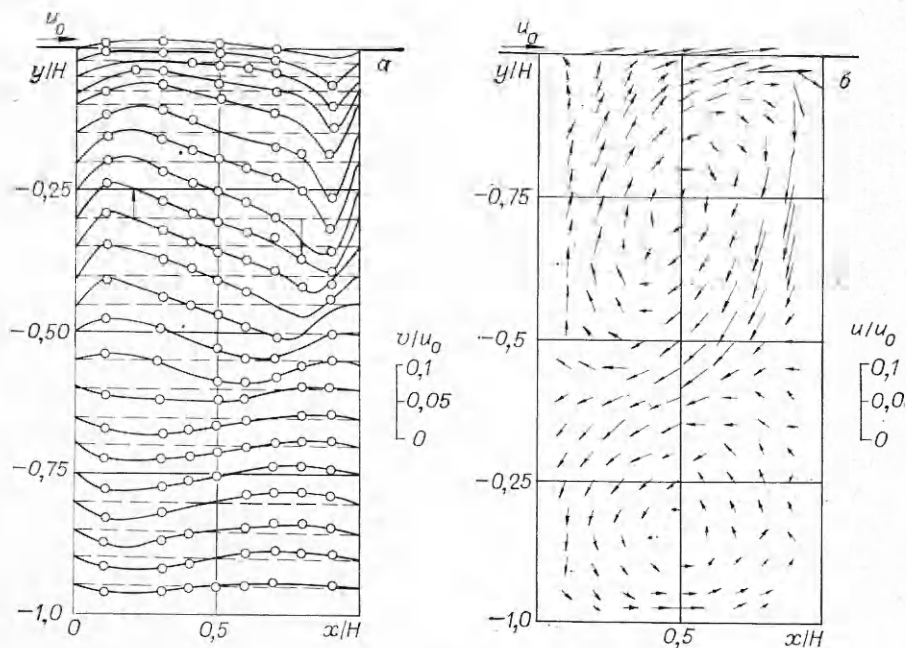
Экспериментальных данных по исследованию структуры течения в кавернах крайне мало. Исследования ограничивались в основном визуальными наблюдениями [1]. Известны работы, в которых проводилось измерение статического давления, касательного напряжения на стенках каверн. В [2] измерены профили скорости и касательное напряжение на дне мелких каверн (когда отношение длины каверны к ее глубине $L/H > 1,75$). На основании имеющихся работ невозможно составить детальное представление о характере течения в кавернах различной конфигурации.

Подробное описание экспериментальной установки и методики измерений приведено в [3]. Здесь приведем лишь некоторые сведения об опытном участке. Опытные каверны имели следующие размеры: мелкая — $L = 40$ мм, $H = 20$ мм; глубокая — $L = 20$ мм, $H = 40$ мм. Ширина каверны равнялась ширине плоского участка (100 мм). Каверны расположены на расстоянии 1500 мм от плоского участка. Во время измерений фокальная область находилась в плоскости, расположенной на равном расстоянии от боковых стенок каверны. Размеры фокальной области $100 \times 100 \times 800$ мкм. Толщина оптических стекол 10 мм. На расстоянии 60 мм от фокальной области диаметр лазерного пучка составлял 0,5—0,6 мм. Минимальное расстояние от стенок, на котором были произведены поочередные измерения продольной и поперечной составляющих скорости, ~ 1 мм. Так как оптическая схема ЛДИС не позволяла определять направление скорости, то течение в кавернах подробно исследовалось в том случае, когда в канале и каверне устанавливался ламинарный режим движения жидкости. При турбулентном режиме течения исследовалась только зона смешения (область, примыкающую к верхнему срезу каверны, можно рассматривать как зону смешения струи, образующейся после срыва потока в точке $x = 0, y = 0$ с потоком в каверне (фиг. 1, б) и пристенная струя, распространяющаяся вдоль задней стенки каверны, где известно направление движения).

В случае ламинарного течения жидкости в канале при значении $Re = 1,5 \cdot 10^3$ в каверне $L/H = 0,5$ наблюдалось течение с одним вихрем в



Ф и г. 1



Ф и г. 2

верхней части и застойной зоной в нижней половине каверны. Спустя некоторое время устанавливалось течение с двумя вихрями, вращающимися в противоположные стороны. Картины течения сменяли одна другую. С увеличением числа Re течение с двумя вихрями становилось все более устойчивым и при $Re = 4 \cdot 10^3$ удалось получить стационарное двухвихревое движение жидкости. Число Re подсчитывалось по формуле $Re = u_0 2h/\nu$, где u_0 — скорость жидкости на оси канала в сечении, расположенном на расстоянии 10 мм от каверны вверх по потоку; h — высота канала (фиг. 1, б, 1 — задняя стенка, 2 — дно, 3 — передняя стенка, 4 — область смешения). На фиг. 1, а, 2, а представлены распределения продольной и поперечной составляющих скорости, отнесенной к скорости на оси канала в сечении $x/H = -0,25$, а на фиг. 2, б — поле скоростей во всей исследованной области, построенной по данным фиг. 1, а, 2, а.

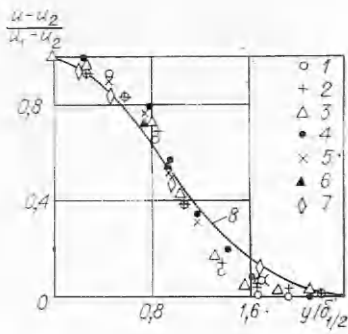
Видно, что в среднем сечении каверны существуют два вихря, вращающихся в противоположные стороны. Вдоль верхней части задней стенки распространяется вниз пристенная струя, которая затем меняет направление и у передней стенки разделяется на две части: одна часть движется вверх вдоль передней, другая — вниз вдоль передней стенки. На фиг. 1, а, 2, а, б видно, что течение в глубокой каверне имеет явно трехмерный характер, так как в горизонтальных сечениях расходы жидкостей в нисходящем и восходящем потоках неодинаковы. Так, для горизонтального сечения $y/H = -0,25$, проходящего через центр верхнего вихря, отношение расхода жидкости в нисходящем потоке к расходу в восходящем $\beta = G_1/G_2 = 1,6$. В горизонтальном сечении $y/H = -0,85$, проходящем через центр нижнего вихря, $\beta = 1,5$. Вихрь в верхней части каверны имеет эллиптическую форму с соотношением длин осей 2 : 1. Большая ось эллипса расположена под углом $\sim 30^\circ$ к вертикальной оси каверны. Так как векторы скорости, касательные к линиям тока, имеют одинаковые величины, а линии тока не являются окружностями, то можно сделать вывод о непостоянстве завихренности в каверне данной геометрии.

Нижний вихрь имеет эллиптическую форму с соотношением длин осей 4 : 3. Завихренность в нем также непостоянна. Следует отметить сложности, которые возникают при экспериментальном изучении распределения скорости в вихревых течениях и особенно в центральной части вихрей. При приближении к центру вихрей уменьшается величина скорости, увеличиваются относительные колебания скорости и соответственно возрастают погрешности измерений. Картина течения в центральной части вихрей поэтому пока не ясна. В [5] показано, что в «плоском» вихревом течении в каверне квадратного сечения возникает трехмерная ячеистая структура, осложненная наличием вторичных течений в торцевых областях и вихрей Тэйлора — Гертлера, развивающихся вдоль стенок каверны. Вихревые образования несколько изменяют во времени свои очертания и положение в пространстве. Естественно, что в глубокой каверне, где взаимодействуют два вихря, картина еще более усложняется. В пользу этого говорит весьма существенное несоответствие расходов в восходящем и нисходящем течениях (в каждом из вихрей). Результаты, полученные в данной работе, по существу, свидетельствуют о необходимости трехкомпонентных измерений скорости в «плоских» вихревых течениях по всему объему каверны. Профили продольной составляющей средней скорости в области, примыкающей к плоскости $z=0x$ (см. фиг. 1, б), для нескольких сечений струи представлены на фиг. 3 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 $\bar{u} = 0,5$). Точки 1—3 соответствуют $\bar{x} = x/H = 0,2; 0,3; 0,4$. За внешнюю границу струи принимается точка, в которой $du/dy = (\partial u/\partial y)_{\text{ядра-const}}$. Здесь же нанесен (сплошная линия) универсальный профиль скорости в соответствии с формулой [4]

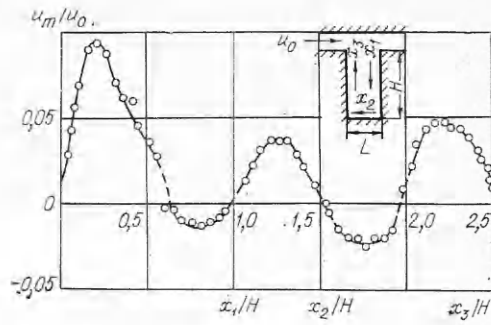
$$(1) \quad (u - u_2)/(u_1 - u_2) = 1 - 6\eta^2 + 8\eta^3 - 3\eta^4,$$

где $\eta = y/\delta$; δ — полуширина струи. Экспериментальные профили скорости в струе практически совпадают с универсальным профилем скорости. Профиль скоростей в зоне смешения в этой каверне имеет такой же характер изменения вдоль x , как и при $Re = 1,5 \cdot 10^3$ в квадратной каверне [3].

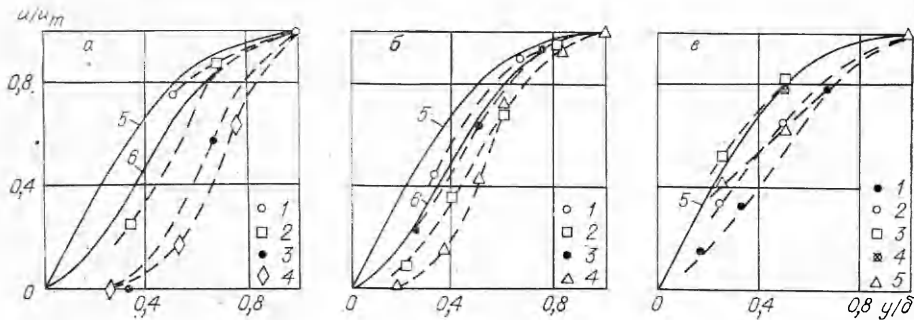
Распределение скорости на границе пограничного слоя вдоль стенок каверны показано на фиг. 4. Положим, что пограничный слой жидкости простирается от стенки каверны до точки, в которой скорость имеет максимум. Построим распределение скорости на границе пограничного слоя по продольной координате, условно развернув стенки каверны на плоскости (см. фиг. 4). Имея эту зависимость, можно вычислить значения форм-параметра Польгаузена Λ , характеризующего влияние продольного гра-



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

диента скорости на ламинарный пограничный слой по формуле $\Lambda = (\delta^2/\nu) du_m/\partial x$, где δ — толщина пограничного слоя; ν — кинематический коэффициент вязкости.

На фиг. 5, а показаны экспериментальные профили продольной составляющей средней скорости в пограничном слое в верхней части задней стенки (1 — $\bar{x} = 0,35$; 2 — $\bar{x} = 0,45$; 3 — $\bar{x} = 0,5$; 4 — $\bar{x} = 0,55$; 5 — $\Lambda = 0$; 6 — $\Lambda = -12$).

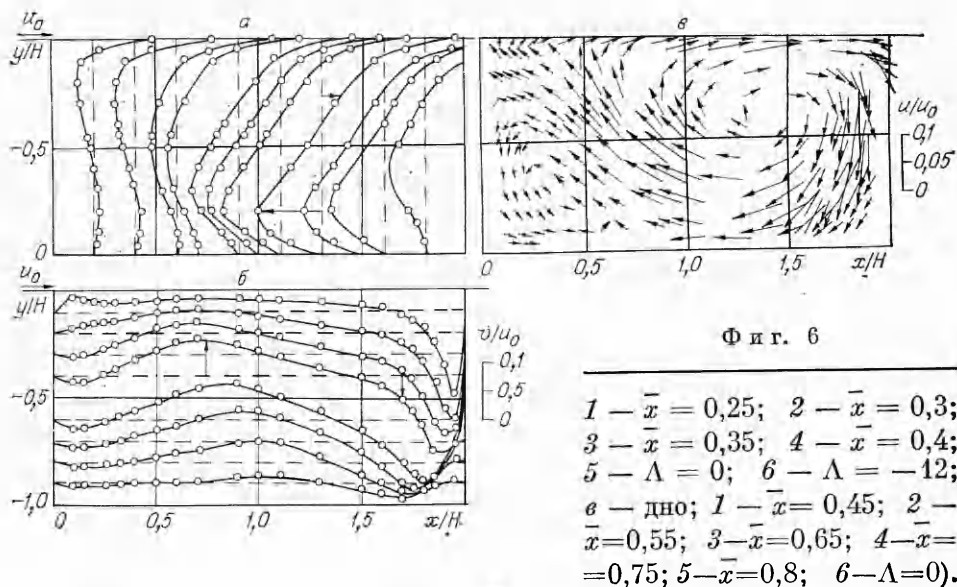
Отрыв пограничного слоя, как и при ламинарном течении в квадратной каверне [3], происходит при значениях формпараметра Λ , намного превышающих отрывное значение $\Lambda(\Lambda_{отр} = -12)$. Отрывной профиль скорости на задней стенке ($\bar{x} = 0,55$) также существенно отличается от отрывного профиля на плоской пластине.

На фиг. 6, а, б показаны распределения продольной и поперечной составляющих скорости в каверне с отношением сторон $L/H = 2$ ($L = 40$ мм, $H = 20$ мм), а на фиг. 6, в — поле скорости в мелкой каверне при $Re = 1,5 \cdot 10^3$.

В такой каверне образуется один основной вихрь, центральная часть которого имеет приблизительно эллиптическую форму с отношением длин осей $\sim 2 : 1$. Большая ось вихря расположена горизонтально, центр вихря имеет координаты $\bar{x} = 1,4$; $\bar{y} = -0,4$. Завихренность в нем непостоянна. В нижнем левом углу каверны образуется вторичный вихрь, вращающийся в противоположную сторону. Площадь, занимаемая вторичным вихрем, составляет 20% от площади поперечного сечения каверны.

Из фиг. 6 следует, что на большей части верхнего сечения каверны (вдоль линии $\bar{y} = 0$) наблюдается вынос жидкости из каверны и только при $\bar{x} = 1,7$ поток поворачивает в каверну. Отношение расходов нисходящего и восходящего потоков при $\bar{y} = -0,2$ $\beta = 0,825$, при $\bar{y} = -0,5$ $\beta = 0,9$.

Профили скорости в пограничном слое на задней стенке и дне каверны в области основного вихря показаны на фиг. 5 (б — задняя стенка;



Начальный профиль скорости ($\bar{x} = 0,25$) удовлетворительно совпадает с ламинарным профилем Польгаузена. Отрывной профиль весьма существенно отличается от отрывного профиля Польгаузена ($\Lambda = -12$). Начальный профиль на дне каверны ($\bar{x} = 0,45$) близок к отрывному профилю на задней стенке каверны. При увеличении \bar{x} профиль вначале заполняется, а затем снова становится отрывным.

В мелкой каверне получено также распределение скорости в зоне смешения и во внешней части пристенной струи (область течения, лежащая между ядром потока и пограничным слоем) при турбулентном режиме течения ($Re = 1,5 \cdot 10^4$). Профиль скорости в зоне смешения хорошо согласуется с универсальным струйным профилем скорости (1) (см. фиг. 3, 4 — $\bar{x} = 0,45$; 5 — $\bar{x} = 0,5$; 6 — $\bar{x} = 0,55$; 7 — $\bar{x} = 0,65$), а распределение скорости в струйной части пристенной струи (в работе не приведено) сохраняет вид профиля скорости той части струи в зоне смешения, которая после удара о заднюю стенку поворачивает в каверну (ниже линии $y = 0$), т. е. наблюдается точно такая же картина, как в квадратной каверне (фиг. 3 [3]).

Поступила 13 IV 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. Pan F., Acrivos A. Steady flows in rectangular cavities. — J. Fluid Mech., 1967, vol. 28, pt 4.
2. Oka S. N. Flow field between two roughness elements in developed turbulent channel flow — In: Intern. Seminar «Heat and Mass Transfer in Flows with Separated Regions and Measurement Techniques.» Herceg-Noví, 1969.
3. Богатырев В. Я., Дубнищев Ю. Н. и др. Экспериментальное исследование течения в траншее. — ПМТФ, 1976, № 2.
4. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. М.: Машиностроение, 1969.
5. Жак В. Д., Мухин В. А., Накоряков В. Е. Трехмерные вихревые структуры в каверне. — ПМТФ, 1981, № 2.