

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА СЛЕДА ЗА СФЕРОЙ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Е. Я. Сысоева, Ю. Д. Чашечкин

(Москва)

Исследование пространственной структуры следа за сферой — одна из традиционных задач гидродинамики. Различные методы визуализации показывают, что картина слутного течения непосредственно за сферой в однородной жидкости обладает осевой симметрией в широком диапазоне значений числа Рейнольдса ( $Re < 10^5$ ). Даже при потере устойчивости основного течения формирование вихревых нитей и петель, нарушающих осевую симметрию течения, происходит на некотором удалении от тела [1—4]. Вихревая структура следа за сферой в стратифицированной среде визуализирована в [5—10]. Для выделения отдельных элементов течения растворяющаяся краска наносилась на поверхность сферы в окрестности передней точки торможения [5], вводилась в тонкие горизонтальные слои при заполнении бассейна [7] и в вертикальные столбики (метки) перед началом опытов. Традиционные методы подкраски, водородных пузырьков, введенных частиц, так же как и распространенные теневые (шлирен)методы [8, 9, 10], не позволяють регистрировать существенные элементы пространственной картины следа из-за затенения, интегрирования по длине луча, методически заданного направления наблюдения. Обычно предполагается, что слабая стратификация не влияет на картину течения, след в непосредственной окрестности сферы в неоднородной по плотности среде, так же как и в однородной жидкости, ограничен цилиндрической вихревой пленкой и структура стратифицированного течения вокруг сферы подобна структуре течения однородной жидкости.

Цель данной работы — исследование пространственной структуры слутного течения за сферой, движущейся горизонтально и равномерно в экспоненциально стратифицированной среде, и, в частности, визуализации линии отрыва течения.

Размерными параметрами данной задачи являются  $U$  — скорость движения,  $d$  — диаметр сферы,  $\rho(z)$  — плотность жидкости (ось  $z$  вертикальна),  $g$  — ускорение свободного падения,  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $k_s$  — коэффициент диффузии соли (фактора, создающего стратификацию),  $\Lambda = \left( \frac{1}{\rho} \left| \frac{d\rho}{dz} \right| \right)^{-1}$  — масштаб стратификации. Наряду с масштабом  $\Lambda$  для характеристики величины стратификации часто используют период (частоту  $N$ ) плавучести  $T_k = 2\pi/N = 2\pi \sqrt{\Lambda/g}$ , который в экспоненциально стратифицированной среде не зависит от глубины. Основные безразмерные параметры задачи — число Рейнольдса  $Re = Ud/\nu$ , внутреннее число Фруда  $Fr = U^2\Lambda/gd^2 = U^2/N^2d^2 = U^2\rho_0/gd\Delta\rho$ , отношение масштабов  $C = \rho_0/\Delta\rho = \Lambda/d$  и число Шмидта  $Sc = \nu/k_s$  ( $\rho_0$  — плотность на горизонте движения тела,  $\Delta\rho \approx \rho_0 d/\Lambda$  — вариации плотности на масштабе  $d$  в случае слабой стратификации). Обычно число Шмидта не включается в перечень определяющих параметров. Однако некоторые устойчивые особенности картины слутного стратифицированного течения показывают, что различие кинетических коэффициентов в жидкости ( $\nu \neq k_s$ ,  $Sc \gg 1$ ) существенно и обуславливает наличие важных элементов структуры течения, в принципе отсутствующих в однородной жидкости.

Эксперименты проведены в прямоугольных бассейнах размерами  $0,7 \times 0,25 \times 0,7$  м и  $2,4 \times 0,4 \times 0,6$  м, заполненных стратифицированным по глубине раствором поваренной соли. Для оценки степени влияния неоднородности исходной стратификации на картину обтекания тела использовались два способа заполнения — послойное и методом непрерывного вытеснения [11]. Распределение периода плавучести по глубине измерялось с погрешностью 5 % оптическими и зондовыми методами с помощью плотностной метки, образующейся за вертикально всплывающим газовым пузырьком [12]. Сфера буксировалась с постоянной скоростью по направляющей  $d_0 = 0,5$  мм, проходящей через ее центр. Вторая приводящая нить располагалась параллельно направляющей на расстоянии 1 мм. Контроль величины и стабильности скорости проводился по измерениям частоты вращения диска с отверстиями, установленного на приводном барабане. Погрешность измерения скорости не превышала

1 %. Использовались прозрачные полированные сферы диаметром 3,0 и 5,0 см, изготовленные из оргстекла. Интервал между отдельными опытами составлял не менее 3—4 ч. За это время затухали все динамические и плотностные возмущения, восстанавливался исходный градиент плотности.

Проведенные опыты не выявили влияния на изучаемые элементы течения способа заполнения: послойного (с регулярным распределением возмущений плотности по глубине) и непрерывного (со случайным распределением). Картина течения сохранялась в обоих бассейнах и не зависела от ориентации траектории движения центра сферы относительно боковых стенок бассейна. Визуализация течения проводилась традиционным теневым методом (вертикальная щель — нож Фуко), методом наклонной щели, цветным теневым методом. Однако тело (прозрачное и непрозрачное) затеняет теневую картину и не позволяет выявить форму линий отрыва течения. В традиционной теневой методике луч света проходит в среде горизонтально, что исключает возможность наблюдения отдельных элементов и идентификации трехмерной структуры.

В дополнение к традиционным использован метод электролитической визуализации, с помощью которого в [13] изучалась структура течения в следе за сферой в однородной жидкости. Метод основан на анодном окислении олова, свинца и их сплавов под действием постоянного электрического тока. В растворе поваренной соли на поверхности анода образуются высокодисперсные продукты окисления олова — частицы размером  $\sim 1$  мкм, которые состоят из частиц монооксида и биоксида олова, дихлорида олова и оловянных кислот. Качественно этот метод подобен визуализации течений дымом в аэродинамических трубах. Образующаяся у поверхности анода суспензия («белый дым») фотоконтрастна и позволяет использовать традиционные методы фоторегистрации, и в то же время она достаточно прозрачна и дает возможность наблюдать одновременно переднюю и заднюю (по ходу луча зрения) границы течения. Меняя форму и относительное расположение анода, можно окрашивать те или иные элементы течения. Вторым электродом (катодом) является латунный стержень, установленный параллельно линии движения центра тела на расстоянии 15 см от нее. В проведенных экспериментах анод имел различную форму. На сферу заподлицо с основной поверхностью наносился кольцевой пояс шириной 3 мм, охватывающий ее по экватору, в вертикальной плоскости, перпендикулярной линии движения, вертикально расположенное полукольцо, проходящее через переднюю (заднюю) точку торможения, шаровой сегмент диаметром 15 мм, охватывающий линию движения. Наиболее наглядно пространственная картина течения визуализируется с помощью поперечного кольцевого электрода. Равномерно сходящий с кольца «белый дым» был отчетливо виден на поверхности прозрачной отполированной сферы из оргстекла и позволял регистрировать форму линий отрыва и границу следа как в непосредственной окрестности тела, так и на больших удалениях от него.

Следует отметить, что плотность частиц соединений олова выше, чем плотность солевого раствора на горизонте движения тела. В однородной жидкости цилиндрическая пелена за сферой равномерно медленно тонула и ее ось не совпадала с траекторией горизонтального движения центра тела. В стратифицированной жидкости на всех временах визуализирующая суспензия остается в жидкости на горизонте ее движения. Погружение частиц соединений олова наблюдалось только на поверхности сферы и приводило к более яркому окрашиванию нижней части следа. Картина течения регистрировалась с помощью фотоаппарата «Зенит-ТТЛ» (фокусное расстояние  $f = 58$  мм, относительное отверстие 1 : 2) с удлинительными кольцами рабочей длиной 7 и 14 мм. Съемка проводилась на темном фоне с боковой подсветкой осветителем «Фотон» (с электрической мощностью 500 Вт), угол зрения составлял  $40\text{—}50^\circ$  с вертикалью. Для уменьшения скорости растворения визуализирующего пояса и сохранения формы сферы электрический ток включался только при движении тела

в поле зрения регистрирующего фотоаппарата.

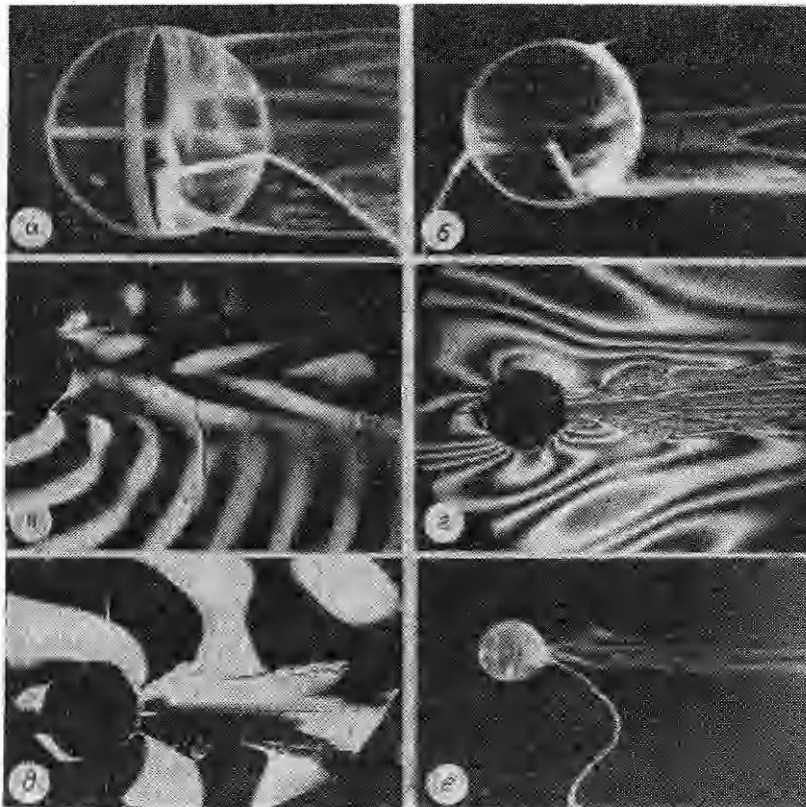
Для контроля методики первоначально была визуализирована картина спутного течения за равномерно движущейся сферой в однородной жидкости. Опыты проведены в растворе поваренной соли постоянной концентрации плотностью  $\rho_0 = 1,014 \text{ г/см}^3$ . Типичная картина течения показана на рис. 1 ( $d = 5 \text{ см}$ ,  $U = 0,7 \text{ см/с}$ ,  $Re = 350$ ).



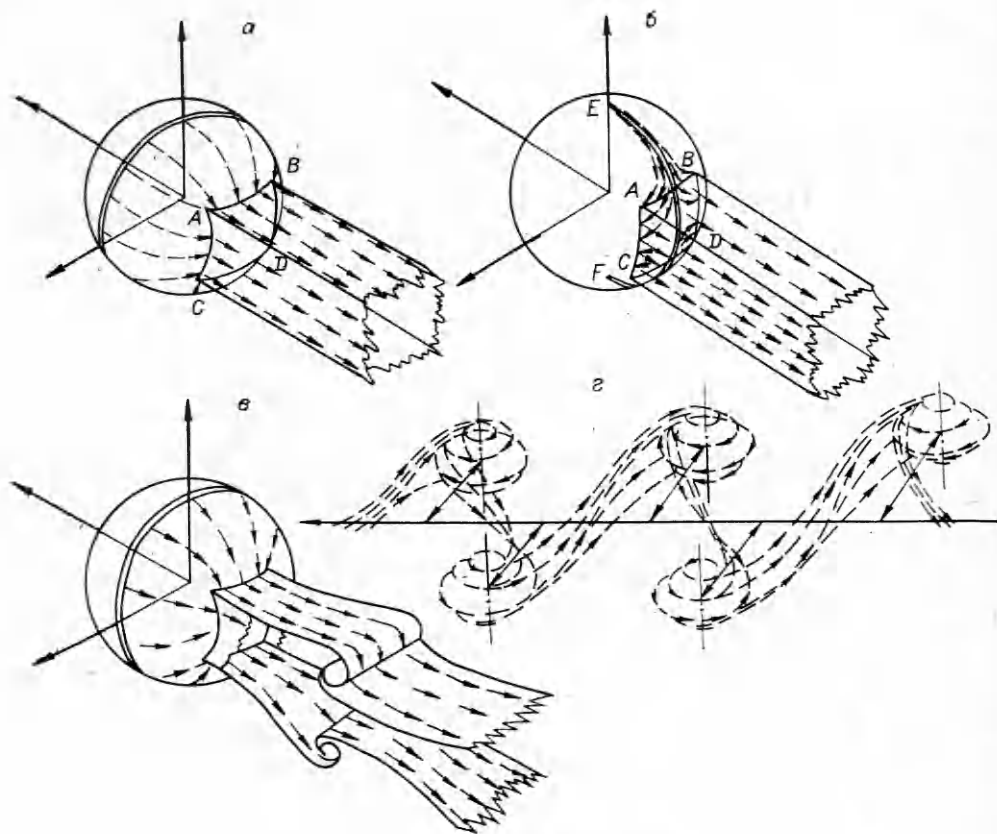
Р и с. 1

В этом режиме за телом формируется осесимметричный донный вихрь, и на фотографии отчетливо видна сходящая цилиндрическая осесимметричная пелена, задняя кромка которой свернута в кольцевой вихрь, порождающий вторичную пелену. При изменении  $Re$  вихревая пелена может сворачиваться в пару прямолинейных или скрученных в винтовую линию вихревых нитей [14] либо в трехмерные вихревые петли [3, 13]. Во всех случаях в непосредственной окрестности сферы до наступления неустойчивости спутного течения, приводящей к образованию вторичных вихревых жгутов и петель, пелена сохраняет осевую симметрию. Отчетливо видимая линия отрыва от сферы — окружность, положение которой на теле зависит от значений  $Re$ .

Сравнительно слабая стратификация ( $C = \Lambda/d = 125 \gg 1$ ,  $\Delta\rho/\rho_0 = 8 \cdot 10^{-3} \ll 1$ , где  $\Delta\rho$  — разность значений плотности среды на горизонтах, проходящих через верхнюю и нижнюю точки сферы,  $\rho_0$  — плотность на уровне центра сферы) приводит к качественной перестройке картины спутного течения — след теряет осевую симметрию. Типичная картина течения в стратифицированной жидкости приведена на рис. 2, а (сфера



Р и с. 2



Р и с. 3

$d = 5$  см движется слева направо,  $U = 0,7$  см/с,  $Re = 350$ ,  $Fr = 0,012$ ). Равномерно сходящая с оловянного кольца суспензия перераспределяется вдоль линии отрыва и четко выделяет четыре плоские дуги линии отрыва, две из которых лежат в горизонтальной плоскости и две — в вертикальной. Краска собирается в окрестности линий пересечения горизонтальных и вертикальных вихревых слоев, образующих оболочку следа (на фотографии также виден подводный провод, проходящий через каналы в теле сферы к визуализирующему электроду). На рис. 2, а сквозь прозрачную сферу видна и вторая вертикальная линия отрыва на дальней по отношению к наблюдателю стороне сферы.

Соответствующая схема течения, на которой стрелками указаны траектория движения отмеченных частиц, отходящих от кольца, линия отрыва и контур окрашенной оболочки следа, приведена на рис. 3, а. По данным многочисленных визуальных наблюдений и стереофотограммам суспензия равномерно распределяется по поверхности сферы между визуализирующим пояском и линией отрыва и концентрируется в окрестности трехмерной кусочно-непрерывной линии отрыва, состоящей из четырех дуг окружностей. Две дуги  $AB$  и  $CD$  лежат в горизонтальной плоскости, а  $AC$  и  $BD$  — в вертикальной. Ширина наклонной переходной области в окрестности точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  зависит от степени однородности исходного градиента плотности. Смена симметрии при отрыве течения наблюдалась в экспериментах с различной конфигурацией визуализирующего пояса. Указанные особенности структуры следа отражают взаимодействие вихревого движения внутри следа и внешнего течения. Наиболее наглядно они выявляются при наблюдении суспензии, образующейся на вертикальном полукольце в донной части сферы (рис. 2, б).

Соответствующая схема течения представлена на рис. 3, б. Здесь

EF — экваториальное полукольцо в донной части сферы, стрелками показаны траектории отмеченных частиц. Суспензия в верхней и нижней частях сферы в области безотрывного течения стекает (поднимается) вдоль полукольца по ее поверхности, растекается в окрестности горизонтальных линий отрыва  $AB$  и  $CD$  и концентрируется на их концах в области контакта с вихревыми линиями, в углах контура сечения следа. Пелена, образующаяся внутри области отрыва в зоне возвратного течения (на части полукольца, находящегося между линиями  $AB$  и  $CD$ ), растекается в стороны вдоль горизонтальных изоэпикнических поверхностей и не отделяется от поверхности сферы до тех пор, пока не достигнет лежащих в вертикальной плоскости линий отрыва  $AC$  и  $BD$ .

Как горизонтальные, так и вертикальные вихревые слои, сходящие с линий отрыва (линий конвергенции внешнего и внутреннего возвратного течения внутри следа), являются **фронтами** — тонкими слоями с резкими градиентами плотности. Они разделяют обтекающую жидкость и жидкость внутри следа, в которой распределение плотности существенно отличается от исходного. Конвергенция течения приводит к увеличению концентрации суспензии в окрестности линии отрыва. Отмеченные частицы жидкости, контактирующие с поверхностью сферы в областях отрывного и безотрывного течений, концентрируются на внешней оболочке плотностного следа. Из-за проскальзывания тяжелой суспензии вдоль поверхности тела нижняя горизонтальная часть оболочки следа на рис. 2, б окрашена более ярко, чем верхняя. Неравномерность распределения краски вдоль нижней границы следа свидетельствует о вихревом характере течения внутри него.

Из всех проведенных опытов с электролитической визуализацией вытекает, что относительно слабая стратификация приводит к качественному изменению структуры и симметрии спутного течения за сферой. Непрерывная осевая симметрия течения в однородной жидкости сменяется на дискретную. След в стратифицированной среде симметричен относительно вертикальных и горизонтальных плоскостей, проходящих через линию движения тела. Изменение характера симметрии свидетельствует о сильном влиянии слабой стратификации на картину течения. Эти особенности спутного стратифицированного течения связаны с образованием у поверхности сферы тонкого высокоградиентного **плотностного пограничного слоя**, усиливающего влияние слабой стратификации [15]. Формирование плотностного пограничного слоя и расщепление внутренних масштабов движения (различие толщин скоростного и плотностного пограничных слоев) зависят от пространственной дисперсии — несовпадения молекулярных коэффициентов переноса импульса (кинематической вязкости) и вещества (коэффициента диффузии соли) — и указывают на необходимость использования полной системы уравнений, включающих члены с молекулярной диффузией при теоретическом анализе картины обтекания тела слабо стратифицированной жидкостью.

На рис. 2, в, г приведены традиционная теневая картина стратифицированного течения в следе за сферой и черно-белая фотография цветного теневого изображения. Вариации плотности почернения на рис. 2, в ( $d = 5$  см,  $U = 0,78$  см/с,  $T_h = 3,5$  с,  $Re = 384$ ,  $Fr = 0,0075$ ) обусловлены горизонтальной компонентой коэффициента преломления (плотности), а на рис. 2, г ( $d = 4$  см,  $T_h = 3$  с,  $U = 1,96$  см/с,  $Re = 784$ ,  $Fr = 0,055$ ) — вертикальной. Большую часть изображения заполняют присоединенные внутренние волны (светлые и темные полуокружности на рис. 2, в). Перед телом выделяется заблокированная жидкость, в которой существует медленное вихревое движение. Вследствие эффекта «сгребания» в область блокировки попадает жидкость с горизонта движения тела, градиент плотности внутри нее более слабый, чем в невозмущенной среде. На рис. 2, г область блокировки лежит между горизонтальными изофотами перед телом. Вблизи верхнего и нижнего полюсов сферы на рис. 2, г наблюдаются интенсивные мелкомасштабные флуктуации плотности почернения, свя-



занные с высокоградиентным плотностным пограничным слоем. Стекающий плотностный пограничный слой формирует резкую тонкую высокоградиентную оболочку плотностного следа.

В силу малости толщины этой оболочки для ее уверенной регистрации необходимо использовать оптические методы с высоким пространственным разрешением. В методах щель — нож, нить в фокусе устанавливается минимальная для данной задачи ширина осветительной щели (0,2—0,3 мм). Для выделения плотностного пограничного слоя особенно удобны теневые методы, не визуализирующие внутренние волны, например наклонная щель — нить в фокусе. Анализ теневых кинограмм опытов с одновременной электролитической визуализацией показывает, что суспензия концентрируется преимущественно в высокоградиентной оболочке следа — в горизонтальных слоях и (по другим наблюдениям) в вертикальных фронтах. Две последовательные плотностные метки на рис. 2, *в* визуализируют профиль распределения горизонтальной компоненты скорости и иллюстрируют различие толщин слоев со сдвигом скорости и с большим градиентом плотности.

Поскольку вертикальные распределения плотности вне и внутри следа различаются между собой, размеры и конфигурации следа могут меняться под действием сил плавучести. В ряде режимов след периодически пульсирует по вертикали и растекается в горизонтальном направлении. Первый максимум вертикального размера следа находится на гребне (впадине в нижнем полупространстве) присоединенной внутренней волны на расстоянии  $x \approx 0,5UT_h$  от тела. При увеличении скорости тела именно в этой области начинает развиваться волновихревая неустойчивость (или неустойчивость Кельвина — Гельмгольца). Теневая кинограмма течения с характерным внутренним буруном, свидетельствующим о развитии неустойчивости Кельвина — Гельмгольца в области максимальных градиентов плотности, приведена на рис. 2, *д* ( $d = 5$  см,  $T_h = 3,5$  с,  $U = 1,09$  см/с,  $Fr = 0,049$ ,  $Re = 983$ ). Картина данной формы спутного течения, полученная методом электролитической визуализации, показана на рис. 2, *е* ( $d = 3$  см,  $T_h = 11$  с,  $U = 0,6$  см/с,  $Re = 180$ ,  $Fr = 0,023$ ). Различия в контурах границ следа на рис. 2, *д*, *е* также связано с расщеплением масштабов, приводящих к более плавному распределению скоростей в зоне неустойчивости и более резкому изменению плотности и ее градиента. Соответствующая схема течения дана на рис. 3, *в*. Как и в предыдущих, в этом режиме краска преимущественно концентрируется в окрестности узловых линий, образованных пересечением вертикальных и горизонтальных высокоградиентных слоев на границе следа.

Основной механизм потери устойчивости спутного течения в однородной жидкости связан с накоплением завихренности в донной части сферы и ее сбросом в след в виде вихревой пелены, вихревых нитей, нерегулярных вихревых петель. В дополнение к этой форме потери устойчивости в стратифицированной жидкости также может развиваться неустойчивость течения в горизонтальных высокоградиентных слоях (сдвиговая или волновихревая) и неустойчивость вертикальных вихревых слоев. Эти формы неустойчивости характеризуются разными временными и пространственными масштабами. Наиболее долгоживущими оказываются вихревые структуры, порожденные вертикальными вихревыми слоями. Взаимодействие течений в вертикальных вихревых слоях приводит к их меандрированию в горизонтальном направлении и к образованию периодических пространственных вихревых структур с вертикальной осью, внешнюю оболочку которых образует жидкость, окрашенная соединениями олова. Соответствующая схема течения приведена на рис. 3, *г*. Траектории всех окрашенных частиц на верхней (нижней) границе вихрей лежат в одной плоскости, в вырождающихся горизонтальных слоях с максимальным градиентом плотности. Внутри вихрей течение существенно трехмерное, частицы движутся от периферии к центру вихря, от верхних и нижних границ к его середине. Трехмерные окрашенные вихревые слои,

соединяющие отдельные вихри между собой, медленно эволюционируют, образуя произвольно ориентированные поверхности сложной формы.

В некоторых режимах на боковых границах следа образуются вихревые диполи — пары вихрей противоположного знака с вертикальной осью вращения, соединенные общей оболочкой. Такая конфигурация медленно дрейфует, отдельные вихревые элементы данной пары могут расходиться и создавать общий вихревой диполь с вихрем из другого диполя. После вырождения движения в жидкости «застывает» вихреобразная структура распределения визуализирующей суспензии, чрезвычайно медленно перемещающаяся по бассейну и еще более медленно исчезающая под действием молекулярной диффузии. Именно эта форма движения, визуально подобная вихревой дорожке в следе за вертикальным цилиндром, неоднократно наблюдалась ранее [5—7]. В других режимах часть вертикально ориентированной оболочки отслаивается и продвигается в сторону движения тела в форме двух плоских клиньев, смыкающихся к оси следа.

Из-за различия характерных времен формирования и существования вихревых структур картина спутного течения за сферой в стратифицированной среде может существенно перестраиваться по мере удаления от тела. Степень выраженности отдельных элементов структуры течения зависит от соотношения определяющих параметров —  $Re$ ,  $Fr$ ,  $C$ ,  $Sc$ . На умеренных расстояниях от тела более выражены вихри с горизонтальной осью симметрии, а на больших — вихри с вертикальной осью. Тонкий плотностный пограничный слой, образующий высокоградиентную оболочку следа, существует во всех рассмотренных режимах стратифицированного течения около сферы.

Авторы благодарны В. В. Тихомирову за помощь в подготовке экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости.— М.: Мир, 1973.
2. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа.— М.: Мир, 1986.
3. Achenbach E. Vortex shedding from spheres // J. Fluid Mech.— 1974.— V. 62, pt 2.
4. Taneda S. Experimental investigation of the wake behind a sphere at low Reynolds numbers // Repts/Res. Inst. Appl. Mech. (Jap.).— 1956.— V. 4, N 16.
5. Pao H. D., Kao T. W. Vortex structure on the wake of a sphere // Phys. Fluids.— 1977.— V. 20, N 2.
6. Воропаев С. И., Филиппов И. А. Вихревая дорожка за трехмерным телом, движущимся в стратифицированной жидкости // Мор. гидрофиз. журн.— 1985.— № 6.
7. Debler W. The towing of bodies in a stratified fluid // IAHR Intern. Symp. on stratified flows.— Novosibirsk, 1972.
8. Lofquist K., Purtell L. Drag on a sphere moving horizontally through a stratified liquid // J. Fluid Mech.— 1984.— V. 148.— P. 271.
9. Чашечкин Ю. Д., Макаров С. А., Беляев В. С. Присоединенные внутренние волны.— М., 1983.— (Препринт/ИПМ АН СССР; № 214).
10. Сысоева Е. Я., Чашечкин Ю. Д. Вихревая структура следа за сферой в стратифицированной жидкости // ПМТФ.— 1986.— № 2.
11. Fortuin J. N. Theory and application of two supplementary methods of constructing density gradient columns // J. Polym. Sci.— 1960.— V. 44.— P. 505.
12. Некрасов В. Н., Чашечкин Ю. Д. Измерение скорости и периода внутренних колебаний жидкости методом плотностных меток // Метрология.— 1974.— № 11.
13. Asaka S., Oshima Y. Shedding vortices from spheres // Natural Sci. Rep.— 1977.— V. 28, N 1.
14. Taneda S. Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between  $10^4$  and  $10^6$  // J. Fluid Mech.— 1978.— Pt 1.
15. Чашечкин Ю. Д. Внутренние волны и дискретные вихревые структуры свободных стратифицированных течений // VI Всесоюз. съезд по теор. и прикл. механике: Тез. докл.— Ташкент: Наука, 1976.

Поступила 4/VI 1987 г.