

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОЛЕВЫХ МЕТОК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ ОПТИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

*В. А. Белогольский, Ю. Н. Власов,  
Д. Л. Зеликсон, А. М. Трохан*

*(Москва)*

При седиментации в неподвижной жидкости небольших кристаллов соли в ней образуются длинные цилиндрические солевые метки, которые предлагается использовать для изучения свободных потоков при импульсной турбулизации жидкости.

Применяемые методы визуализации [1] различают по виду и способу создания трассирующих меток.

Метки должны удовлетворять следующим требованиям: а) обладать нулевой плавучестью, б) иметь достаточное время жизни, в) быть фотогенными.

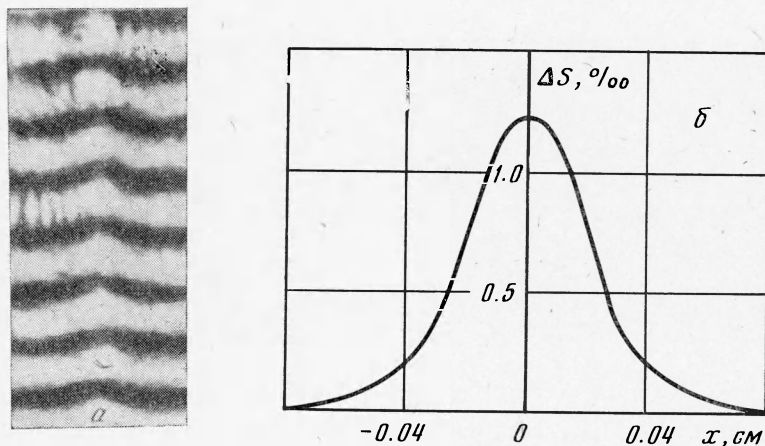
При количественных измерениях скоростей предъявляются дополнительные требования к форме и геометрическим размерам меток, определяющим пространственное разрешение поля визуализации, а также к времени образования меток в жидкости, определяющему тип гидродинамических задач, в которых они могут найти применение.

Перечисленным требованиям отвечают тепловые метки, создаваемые в жидкости лазерным импульсным излучением и регистрируемые теневыми приборами [2]. Формируясь в потоке практически мгновенно за счет изменения физических свойств жидкости, тепловые метки обладают малой скоростью всплытия и позволяют визуализировать ламинарные и турбулентные течения [2]. Это делает их надежным инструментом в изучении медленных и быстротекающих процессов в жидкости [3].

В экспериментах по изучению взрывных и ударных процессов в жидкости [4], развития области турбулентного смешения, явлений перемежаемости, процессов эжекции и т. п. в свободных потоках при импульсной турбулизации жидкости колеблющимися [3] или двигающимися [5] источниками возмущения и других, в которых возникает необходимость пространственной маркировки исследуемой зоны густым рядом длинных (несколько десятков сантиметров) цилиндрических меток, применение методики [2] наталкивается на сложность установки. Особенностью таких экспериментов является то, что жидкость в бассейне (кювете) перед началом опыта неподвижна, поэтому появляется возможность использования меток с конечным временем образования, получаемых более доступными средствами, чем лазерные. В качестве простого метода изучения явлений, сопровождающих импульсное возбуждение неподвижной жидкости [3-5], предлагается пространственная маркировка исследуемой области с помощью меток в виде солевого следа, который получается при растворении небольших (до  $0.1 \text{ мм}^3$ ) кристаллов поваренной соли, падающих в неподвижной жидкости. Визуализацию солевых меток следует проводить теневыми приборами.

Форма солевого следа в неподвижной жидкости имеет вид тонкого цилиндра с диаметром, не зависящим в определенных пределах от размеров кристалла, и однозначно определяется физической природой растворителя.

(При объемах кристалла, больших  $0.1-0.5 \text{ мм}^3$ , за движущейся частицей возникает кармановская дорожка). В дистиллированной воде комнатной температуры поперечный размер цилиндрических меток, наблюдаемых с помощью теневого прибора,  $1.5 \pm 0.1 \text{ мм}$  для кубических кристаллов поваренной соли объемом  $0.001 \div 0.1 \text{ мм}^3$ . Длина меток однозначно задается для каждого растворителя размерами кристаллов и в дистиллированной воде больше  $60 \text{ см}$ . Средняя скорость образования меток (средняя скорость седиментации кристалла объемом  $\sim 0.1 \text{ мм}^3$ )  $\sim 10 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$ .



Фиг. 1

Время жизни солевого следа в неподвижной воде  $t_s$  определяется коэффициентом диффузии соли ( $D \approx 10^{-5} \text{ см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$  [6]) и составляет величину, большую двух минут при регистрации метки теньевым прибором с вертикальной ориентацией шпирного ножа. Величина  $t_s$  на один-два порядка превышает время образования солевых меток. Это дает возможность использовать их для пространственной маркировки гидродинамических полей. Малостью коэффициента диффузии  $D$  по сравнению с коэффициентом температуропроводности воды,  $\alpha \approx 10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$  [6], объясняется значительно большее время жизни солевой метки по сравнению с тепловой [2].

При исследовании способности солевых меток следовать за потоком интерференционным прибором (интерферограмма на фиг. 1, а) определялись плотность и соленость жидкости в метке по сравнению с фоном с использованием известных зависимостей [7, 8]

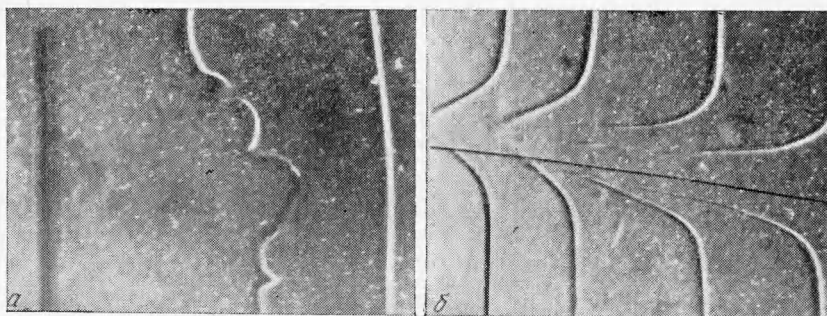
$$\Delta n \approx 0.23 \Delta \rho \approx 3.33 \cdot 10^{-4} \Delta S$$

Здесь  $\Delta \rho$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta n$  — разности плотности ( $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$ ), солености ( $\text{‰}$ ) и оптического показателя преломления метки и фона (дистиллированная вода). Интерферограмма на фиг. 1, а получена спустя некоторое время после образования метки. Восстановленное по ней распределение солености по радиусу поперечного сечения (фиг. 1, б) имеет симметричную форму с максимумом  $1.23 \text{ ‰}$ . Изменение солености  $S$  на один промилле ( $\text{‰}$ ) оказывает на  $n$  такое же влияние, как изменение температуры  $T$  на  $3.3^\circ$  (для воды  $\Delta n \approx 10^{-4} \Delta T$  [9]).

Из полученных параметров солевых меток можно оценить точность и пространственное разрешение, которые получаются при измерении полей скорости течения жидкости предлагаемым методом.

Плотность жидкости в следе отличается от плотности окружающей воды ( $\Delta \rho \approx 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ ), поэтому метка не будет точно следовать за потоком,

опускаясь под действием гравитационных сил вниз. Замеренная в экспериментах средняя скорость седиментации различных частей солевых меток составила несколько десятых долей  $\text{мм}\cdot\text{сек}^{-1}$ . Это совпадает со значением скорости седиментации, рассчитанной по формуле Стокса [10] для шара, падающего в вязкой жидкости. Учитывая, что сечение следа, определяющее пространственное разрешение, не поддается регулировке, солевые метки эффективнее применять для визуализации крупномасштабных процессов со скоростями движения жидкости, большими  $3 \div 5 \text{ см}\cdot\text{сек}^{-1}$ . В этих случаях систематическая погрешность измерения скорости, определяемая седимен-



Фиг. 2

тацией метки,  $\sim 1\%$ . При седиментации кристалла пограничные слои жидкости приходят в движение. Это также может быть источником погрешностей при измерении поля скорости потоков. Как показали измерения с помощью лазерных меток, эти движения прекращаются через несколько секунд после образования солевой метки.

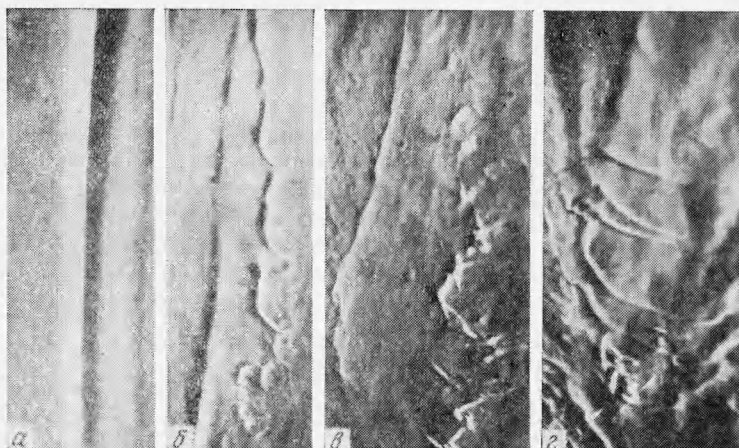
Для проверки возможностей метода в плоской стеклянной ячейке были поставлены эксперименты, аналогичные [3, 5], но с маркировкой исследуемого пространства серией вертикальных (ось  $z$ ) солевых меток, которые создавались в однородной жидкости перед началом опыта с помощью простого дозирующего устройства. Расстояние между метками выбиралось таким, чтобы обеспечивалось необходимое пространственное разрешение, но не затруднялась интерпретация получаемых результатов из-за наложения соседних меток при турбулентных движениях жидкости. В случае пространственных потоков в прямоугольных кюветах маркировку исследуемого пространства можно проводить параллельными рядами солевых меток, располагаемых в вертикальных плоскостях  $yz$  и  $xz$ , а регистрацию процессов проводить одновременно в двух направлениях ( $x$  и  $y$ ).

В эксперименте с помощью импульсного турбулизатора в середине кюветы создавалась область турбулентного смешения, распространяющаяся от центра к периферии, которая регистрировалась с помощью теневого прибора и кинокамеры. По полученным кинонегативам проведен анализ развития области смешения во времени, процесс вовлечения в движение покоящейся жидкости, измерена скорость переноса импульса движения. На фиг. 2, *a* приведен пример визуализации области смешения солевой меткой. На фотографии отчетливо видны границы турбулентной зоны, пространственный масштаб вихрей, заметен процесс вовлечения в движение неподвижной жидкости. С помощью солевых меток можно одновременно исследовать динамику жидкости внутри, на границе и вне области турбулентного смешения.

В другом эксперименте визуализировался ламинарный затопленный поток, возникающий при движении в однородной жидкости небольшого

(несколько  $мм^3$ ) тела (фиг. 2, б). С помощью меток по кинонегативам определяются режим, граница течения и профиль скорости потока.

Недостатком предлагаемого метода визуализации является невозможность изучения с его помощью динамики жидкости, находящейся в состоянии движения. Солевыми метками можно исследовать только начальную стадию процессов, связанных с импульсным возбуждением неподвижной жидкости. Вторым недостатком является невозможность создания длинных цилиндрических меток с произвольной начальной ориентацией (отличной от направления оси  $z$ ). С помощью вертикальных меток можно из-



Фиг. 3

мерять две составляющих трехмерного вектора скорости —  $V_x$  и  $V_y$ , регистрируя поток в двух направлениях —  $x$  и  $y$ , но нельзя получить информацию о движении жидкости вдоль оси  $z$ . Вектор скорости определяется с помощью меток, ортогональных друг другу (в случае солевых — вертикальных и горизонтальных).

Короткие горизонтальные метки (до 10 см) можно создать в неподвижной диэлектрической жидкости с помощью электрического поля. Для этого в заданную область необходимо опустить два плоских электрода, поместить между ними струю или каплю солевого раствора и подать постоянное напряжение в несколько сот вольт. Капля солевого раствора получается при седиментации кристаллов соли объемом порядка  $10^{-5} мм^3$  при их полном растворении в жидкости. Под действием электрического тока происходит постепенное растекание солевой струи вдоль линий электрического поля. Фиг. 3, а, б, в, г иллюстрирует последовательные стадии этого процесса (направление электрического тока перпендикулярно струе). Получаемые при этом на разных уровнях горизонтальные солевые метки (фиг. 3, г) можно использовать для визуализации потоков (после остановки струи и выключения электрического поля), но общий неоднородный фон будет мешать расшифровке результатов измерений.

Четкая горизонтальная метка получается из капли солевого раствора, помещенной в электрическое поле непосредственно в заданной области неподвижной жидкости. Капля, как и струя, растекается вдоль линии электрического поля со скоростью, определяемой плотностью тока, но при этом окружающий ее фон получается однородным.

Если между электродами создать солевые капли на разных уровнях жидкости, то при включении электрического поля можно получить серию

параллельных горизонтальных меток с заданным шагом. Дополнив такие метки вертикальными (при выключенном поле), можно проводить визуализацию трехмерных потоков. На фиг. 4 приводится пример визуализации пространственного затопленного потока солевыми метками.



Фиг. 4

Ортогональные друг другу метки были созданы в прямоугольной кювете с неподвижной водой: горизонтальные (ось  $x$ ) — при воздействии электрического поля на каплю солевого раствора, вертикальные (ось  $z$ ) — при седиментации кристалла соли в отсутствие поля. Визуализация потока осуществлялась теневой системой, расположенной вдоль оси  $y$  при горизонтальной ориентации шлирного ножа. Одновременной регистрации течения по оси  $x$  или  $z$  не проводилось. Затопленный поток возник в жидкости при движении в ней в произвольном направлении шара объемом  $\sim 1 \text{ см}^3$ .

Экспериментальная проверка точности предлагаемого метода проводилась в горизонтальном прямоугольном гидроканале с прозрачным участком с помощью лазерных меток такого же диаметра, следующих с малой погрешностью за потоком жидкости [2, 3]. Вертикальные цилиндрические солевые и тепловые метки создавались при закрытом выходном кране гидроканала в непосредственной близости одна от другой. При открывании крана возникало неустановившееся течение, которое визуализировалось метками. Метки обоих видов неизменно следовали одна за другой без отставания и опережения на всем участке прозрачной части гидроканала ( $\sim 15 \text{ см}$ ) при скоростях потока, больших  $3 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$ . Диаметр тепловой метки значительно быстрее увеличивался во времени, чем у солевой. Это связано с разными коэффициентами диффузии тепла и соли в воде.

Поступила 16 IV 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Holmes D. B. Visualization techniques for studying laminar flows. *Ingenieur* (Nederl. 1967, vol. 79, No. 50, pp. 105—116.
2. Власов Ю. Н., Латышев В. М., Савагов В. И., Трохан А. М. Оптический визуальный метод исследования течений жидкости. *Теплофизика высоких температур*, 1972, т. 10, № 5, стр. 1135—1137.
3. Власов Ю. Н., Некрасов В. Н., Трохан А. М., Чашечкин Ю. Д. О развитии области турбулентного смешения в жидкости. *ПМТФ*, 1973, № 2, стр. 91—95.
4. Замышляев Б. В., Яковлев Ю. С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л., «Судостроение», 1967.
5. Schooley A. H., Stewart R. W. Experiments with a self-propelled body submerged in a fluid with a vertical density gradient. *J. Fluid Mech.*, 1963, vol. 15, pt 1, pp. 83—96.
6. Лоуренс Л. *Электроника в океанографии*. М., Воениздат, 1969.
7. Mowbray D. E. The use of schlieren and shadowgraph techniques in the study of flow patterns in density stratified liquids. *J. Fluid Mech.*, 1967, vol. 27, pt 3, pp. 595—608.
8. Woods J. D. On designing a probe to measure ocean microstructure. *Underwater Sci. and Technol. Journal*, 1969, vol. 1, No. 1, pp. 6—12.
9. Narsingh Dass. Temperature dependence of refractive index of water in the region 0—40°. *Indian J. Pure and Appl. Phys.*, 1970, No. 1, pp. 55, 56.
10. Ламб Г. *Гидродинамика*, М.—Л., Гостехиздат, 1947.