

*Л.Н. Карлин, А.В. Даньшина*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ  
ДИПОЛЬНОГО ТИПА ПРИ УСЛОВИИ ТВЕРДОЙ КРЫШКИ**

*L.N. Karlin, A.V. Danshina*

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF DIPOLE TYPE CURRENTS  
UNDER THE HARD COVER CONDITIONS**

*Приведено описание лабораторной установки и опытов, воспроизводящих течения дипольного типа при условии твердой крышки. Рассмотрены характер изменения размера дипольной структуры и величины чисел Рейнольдса, при которых они образуются. В статье показано, что образование грибовидных течений за счет перекоса уровня является частным случаем формирования таких динамических структур.*

*A description of a laboratory plant and experiments is given that reproduce dipole type currents under hard cover conditions. The pattern of change in the size of the dipol structure and the values of Reynolds numbers is considered for the conditions when the currents form. The paper shows that the formation of mushroom-like currents at the expense of a level elevation is a special case of formation of such dynamic structures.*

Течения дипольного типа являются неотъемлемой частью динамики вод природных объектов. Такие течения в океане еще называют грибовидными [Федоров, 1991], поскольку, как видно из рис. 1, они имеют сходство с формой гриба в разрезе, представляя собой структуру из комбинации струи с парой вихрей противоположного знака в ее фронтальной области. Научный интерес, направленный на изучение течений дипольного типа, особенно возрос, когда эти структуры обнаружили на спутниковых изображениях поверхности Мирового океана. Эти довольно часто встречаемые формы движения вод в океанах и морях выявляются на изображениях поверхности водных объектов в видимом диапазоне спектра при наличии различных трассеров и в инфракрасном – распределении радиояркой температуры [Гинзбург, 1984а,б, 1992; Кузьмин, 1984; Ruijter, 2004].

Из анализа этих изображений на сегодняшний день известно, что такого типа течения имеют пространственные масштабы, варьирующие в пределах от  $\approx 10$  км до  $\approx 200$  км. При этом ширина струи составляет не более 10–25 % от ее длины, а для длины струи и размера вихревой части в основном характерен

один порядок. Течения дипольного типа образуются за счет эволюции локализованных импульсных воздействий различной природы, таких как сток рек, водообмен через проливы, струйные воздушные потоки, локальная динамическая неустойчивость течений и фронтов, разности уровня моря или атмосферного давления и так далее. Эти структуры имеют повышенную концентрацию завихренности по сравнению с фоновой и согласованное поле скорости, создавая значительный турбулентный обмен по горизонтали.

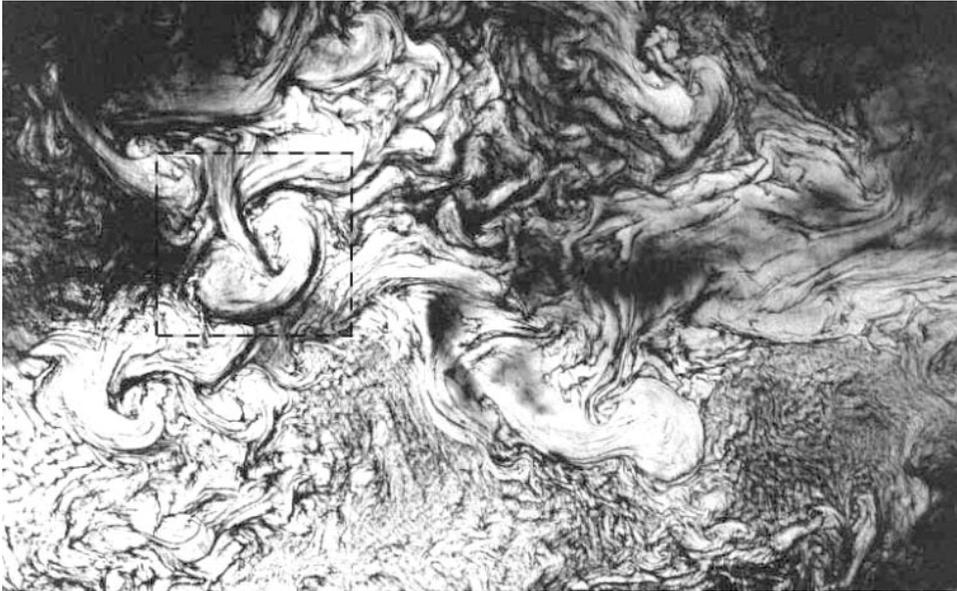


Рис. 1. Грибовидные структуры в Северном Каспии на радиолокационном снимке со спутника ERS-1

Многие из особенностей течений дипольного типа были выявлены при помощи лабораторного моделирования, как в однородной, так и в стратифицированной жидкости, при задании источника импульса кратковременного и непрерывного действия. Эволюцию таких динамических структур рассматривали при задании различных условий [Воропаев, 1985; Афанасьев, 1989а,б, 1994; McWilliams, 1984; Flor, 1994; Sipp, 2000; Voropayev, 2001; Afanasyev, 2006]. Кроме того, были воспроизведены и более сложные динамические ситуации, например взаимодействия диполей друг с другом.

Некоторые из закономерностей развития грибовидных течений были получены и объяснены как теоретически, так и с помощью математического моделирования [Афанасьев, 1989а,б 1994; Баренблатт, 1989; Гурулев, 1991; Козлов, 1985; Cantwell, 1986; Praud, 2005; Afanasyev, 2004, 2006]. Тем не менее на сегодняшний день объяснить формирование грибовидного течения с помощью математической модели в условиях однородной и даже стратифицированной жидкости, учитывая все внутренние механизмы этой динамической структуры, пока

не удалось. Отечественной работой, где осуществлялась попытка воспроизвести грибовидное течение с помощью математической модели, была работа Воропаева С.И. и Неелова И.А. [Воропаев, 1991]. Авторы предлагали математическую модель, описывающую образование и эволюцию такого течения, основанную на использовании уравнений движения Навье–Стокса, гидростатики, неразрывности в приближении Буссинеска, переноса массы и пассивной примеси. Уравнения движения имели вид:

$$u_t + uu_x + vv_y + ww_z = -\frac{1}{\rho_0} p_x + \nu \nabla^2 u; \quad (1)$$

$$v_t + uv_x + vv_y + wv_z = -\frac{1}{\rho_0} p_y + \nu \nabla^2 v, \quad (2)$$

где  $(u, v, w)$  – компоненты вектора скорости по осям  $(x, y, z)$ ,  $p$  – давление,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\rho_0$  – отсчетное значение плотности.

Расчет отклонения свободной поверхности проводился с помощью уравнения:

$$\xi_t = -U_x - V_y, \quad (3)$$

где  $\xi$  – отклонение свободной поверхности от равновесного уровня.

Перекося уровня получается интегрированием уравнения неразрывности с учетом кинематического условия на свободной поверхности (4):

$$w^* = \xi_t + u^* \xi_x + v^* \xi_y, \quad (4)$$

где  $u^*, v^*, w^*$  представляют собой компоненты вектора скорости на поверхности, а  $U$  и  $V$  есть

$$U = \int_{-H}^{H+\xi} u dz \quad \text{и} \quad V = \int_{-H}^{H+\xi} v dz. \quad (5)$$

В моделируемой области  $(0 \leq x \leq L, -D \leq y \leq D, -H \leq z \leq H + \xi)$  на твердых границах принимались условия прилипания и непротекания. Располагаясь в точках малой области в окрестности начала координат, источник импульса в модели начинал работать в момент времени  $t = 0$ , испуская жидкость со скоростью  $u = U_*$ , плотностью  $\rho_0$  и с концентрацией пассивной примеси  $c_*$  в моделируемую область, имитирующую лабораторный бассейн с размерами  $L \times 2D \times 2H = 22 \times 8,8 \times 2,2$  см. На остальной части расчетной области начальные условия задавались следующим образом:

$$u = v = \xi = 0, \quad \rho = \rho_0 \exp(-N^2 z / g),$$

где  $N = \text{const}$  – частота Брента–Вайсяля.

Основным условием формирования грибовидного течения в рассматриваемой модели является наличие кинематического условия на свободной поверхности (3)–(4), которое позволяет, по всей видимости, перераспределить импульс на ортогональные оси струйного течения и сформировать симметричную дипольную структуру. Тогда при задании граничных условий на поверхности жидкости  $\xi = 0$  в этой модели Воропаева С.И. и Неелова И.А. невозможно было бы получить динамическую структуру грибовидной формы, поскольку дипольная вихревая структура во фронтальной области развивающегося струйного течения не может формироваться только за счет уравнений движения (1)–(2) и переноса массы, записанных в той форме, в какой традиционно принято их использовать.

В приведенном ниже экспериментальном исследовании будет показано, что формирование течений дипольного типа происходит и при условии отсутствия на поверхности жидкости перекоса уровня, т.е. лабораторный эксперимент воспроизводился в бассейне с твердой крышкой, не позволяющей на поверхности воды образовываться отклонениям свободной поверхности. Схема такой лабораторной установки приведена на рис. 2.

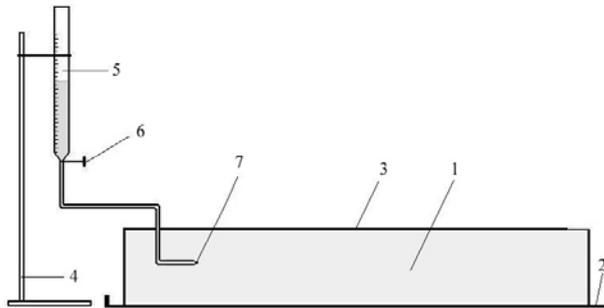


Рис. 2. Схема лабораторной установки. 1 – бассейн с жидкостью, 2 – поддон, 3 – твердая крышка, 4 – штатив, 5 – бюретка с окрашенной жидкостью, 6 – кран, 7 – сопло.

В прозрачный бассейн размером  $80 \times 60 \times 30 \text{ см}^3$  из органического стекла по самые края заливалась вода так, чтобы она полностью соприкасалась с прозрачной крышкой из того же материала. С одного конца бассейна в крышке было сделано отверстие точно под размер трубки с соплом, а с противоположной стороны между стенкой бассейна и крышкой оставался небольшой зазор для свободного вытекания жидкости из бассейна во время проведения эксперимента. Рядом с бассейном устанавливался штатив, на котором закреплялось устройство, обеспечивающее контролируемый расход жидкости, представляющее собой сочетание бюретки с ценой деления 1 мл, крана и трубки со сменными наконечниками, играющими роль сопел разного диаметра. Для исследования горизонтальных размеров грибовидных течений по краям крышки располагались шкалы с ценой деления 1 мм. Весь процесс зарождения, динамики и затухания дипольных структур фиксировался на цифровой фото- и видеокамере.

Эксперименты проводились с использованием подкрашенной индикаторами водопроводной воды в качестве выпускаемой из горизонтально расположенного сопла жидкости, придерживаясь известной методики [Воропаев, 1985]. Красителями выступали калия перманганат и феноловый красный водорастворимый индикатор. В воде в бассейне давали время успокоиться, чтобы проводить опыты в жидкости с затухшими движениями, а температура воды приблизительно равнялась температуре воздуха в лаборатории во время подготовки и проведения экспериментов, которую поддерживали около одного значения. Этим мы добивались того, чтобы в разных сериях опытов структуры дипольного типа были получены при одних и тех же внешних условиях и однородность водной среды не нарушалась термической стратификацией. После открытия крана из сопла поступал нужный объем окрашенной жидкости в бассейн до достижения стадии развитой грибовидной структуры, затем кран закрывался.

Варьируя разными по диаметру соплами (0,4 мм, 1,4 мм и 2,3 мм), глубиной их расположения, и выпуская разное количество воды, мы фиксировали визуализацию эволюции динамических структур. После каждого эксперимента выдерживалось время для успокоения жидкости, с целью проведения последующих опытов в одинаковых условиях. Для каждого из диаметров сопел была проведена своя серия экспериментов. В среднем в каждой серии было выполнено около 45 экспериментов.

Одна из таких структур дипольного типа приведена на рис.3 в момент ее развития во время действия источника импульса. Все серии экспериментов формирования грибовидного течения в бассейне с твердой верхней крышкой были обработаны и проанализированы. Так, на рис.4 показано, что размер дипольной структуры, независимо от скорости истекания жидкости из сопла, со временем увеличивался по степенному закону как  $\sim t^{0.5}$ . Исследованные динамические образования грибовидной формы образовывались стабильно при числах Рейнольдса порядка  $10^1-10^2$ , что соответствует данным, полученным другими исследователями [Воропаев, 1985, 1991].

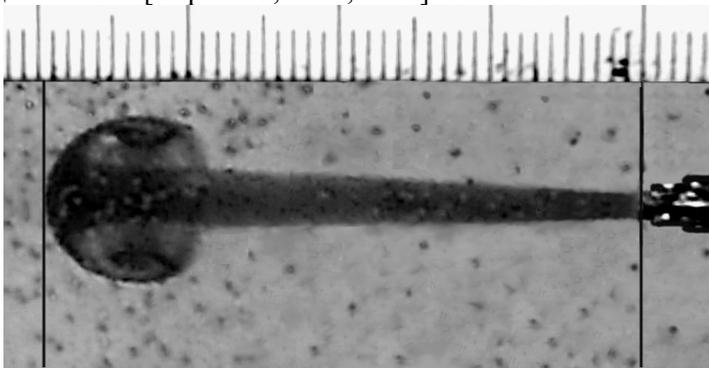


Рис. 3. Фотография грибовидного течения в бассейне с однородной жидкостью при задании условия твердой крышки на поверхности в момент времени  $t = 5,04$  с от начала действия источника импульса диаметром 2,3 мм и с расходом жидкости  $4,729 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/с при числе Рейнольдса  $Re = 21$

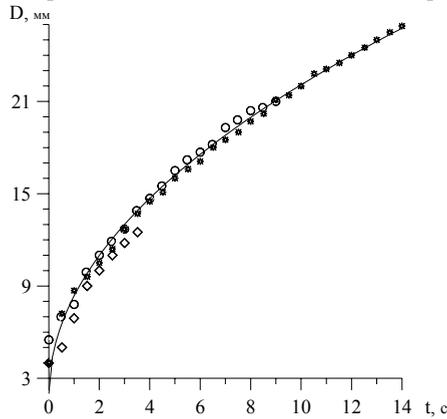


Рис. 4. Зависимость от времени  $t$  поперечного размера диполя  $D$  во время действия источника импульса при задании условия твердой крышки на поверхности бассейна:

◇ – при числе Рейнольдса  $Re = 107$ ; ○ – при  $Re = 55$ ; \* – при  $Re = 21$ .

Сплошная линия – аппроксимирующая экспериментальные данные зависимость  $D \sim t^{0,5}$

Проведенные исследования убедительно доказывают, что формирование грибовидных течений происходит и при условии задания твердой крышки на поверхности жидкости в лабораторном бассейне. Таким образом, с помощью экспериментальных исследований было показано, что перекоп уровня не является необходимым условием для образования динамических структур дипольного типа, а математическая модель такого плана [Воропаев, 1991] описывает только частный случай развития подобных структур. Поэтому для описания и изучения эволюции грибовидных течений с помощью математического моделирования, как в однородной, так и в стратифицированной жидкости, возможно, следует использовать модельные подходы, которые могли бы воспроизводить как общие, так и частные случаи возникновения таких динамических образований.

### Литература

1. Афанасьев Я.Д., Воропаев С.И. Модель грибовидных течений в стратифицированной жидкости при непрерывном действии источника импульса // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1989а, Т. 25, № 7, с. 741–749.
2. Афанасьев Я.Д., Воропаев С.И. Модель грибовидных течений в стратифицированной жидкости при кратковременном действии источника импульса // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1989б, Т. 25, № 8, с. 843–851.
3. Афанасьев Я.Д., Воропаев С.И., Потылицин П.Г. Взаимодействие вихревых диполей: теория, лабораторный эксперимент. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1994, Т. 30, № 5, с. 696–703.
4. Баренблатт Г.И., Воропаев С.И., Филиппов И.А. Модель федоровских когерентных структур в верхнем слое океана // Доклады Академии наук СССР, 1989, Т. 307, № 3, с. 720–724.

5. Воронаев С.И., Филиппов И.А. Развитие горизонтальной струи в однородной по плотности и стратифицированной жидкостях. Лабораторный эксперимент // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1985, Т. 21, № 9, с. 964–972.
6. Воронаев С.И., Неллов И.А. Лабораторное и математическое моделирование течений дипольного типа (грибовидных течений) в стратифицированной жидкости // Океанология, 1991, т. 31, вып. 1, с. 68–75.
7. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Грибовидные течения в океане (по данным спутниковых изображений) // Исследование Земли из космоса, 1984а, № 3, с. 18–25.
8. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Некоторые закономерности развития грибовидных течений в океане, выявленные путем анализа спутниковых изображений // Исследование Земли из космоса, 1984б, № 6, с. 3–12.
9. Гинзбург А.И. Нестационарные вихревые движения в океане // Океанология, 1992, Т. 32, вып. 6, с. 997–1003.
10. Гурулев А.Ю. Численное моделирование взаимодействия дипольных вихревых структур со сдвиговым течением // Океанология, 1991, т. 31, вып. 1, с. 28–33.
11. Козлов В.Ф., Макаров В.Г. Гидродинамическая модель формирования грибовидных течений в океане, выявленные путем анализа спутниковых изображений // Доклады Академии наук СССР, 1985, т. 300, № 3, с. 1213–1215.
12. Кузьмин Н.П., Скляр В.Е. Дрейфующий лед как трассер при исследовании особенностей циркуляции вод окраинных морей // Исследование Земли из космоса, 1984, № 1, с. 16–25.
13. Федоров К.Н. Избранные труды по физической океанологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 310 с.
14. Afanasyev Y.D., Korabel V.N. Starting vortex dipoles in a viscous fluid: Asymptotic theory, numerical simulations, and laboratory experiments // Physics of fluids, 2004, vol. 16, № 11, pp. 3850 – 3858.
15. Afanasyev Y. D. Formation of vortex dipoles // Physics of fluids, 2006, V. 18, № 3, 037103, 8 p.
16. Cantwell B.J. Viscous starting jets. // J. Fluid Mech., 1986, vol. 173, pp. 159 – 189.
17. Flor J.B., van Heijst G.J.F. An experimental study of dipolar vortex structures in a stratified fluid // J. Fluid Mech., 1994, vol. 279, pp. 101–103.
18. McWilliams J.C. The emergence of isolated coherent vortices in turbulent flow // J. Fluid Mech., 1984, vol. 146, pp. 21–43.
19. Praud O., Fincham A.M. The structure and dynamics of dipolar vortices in a stratified fluid // J. Fluid Mech., 2005, vol. 544, pp. 1–22.
20. Ruijter W.P.M., van Aken H.M., Beier E.J., Lutjeharms J.R.E., Matano R.P., Schouten M.W. Eddies and dipoles around South Madagascar: formation, pathways and large-scale impact // Deep Sea Research, 2004, vol. I, № 51, pp. 383–400.
21. Sipp D., Jacquin L., Cossette C. Self-adaptation and viscous selection in concentrated two-dimensional vortex dipoles // Physics of fluids, 2000, vol. 12, № 2, pp. 245–248.
22. Voropayev S.I., Smirnov S.A. Dipolar eddies in a stratified shear flow // Phys. Fluids, 2001, vol. 13, № 12, pp. 3820–3823.

**Ключевые слова:** течения диагонального типа лабораторное и математическое моделирование.