

# О законе расширения турбулентного следа за надводным судном

С.А. Ермаков, И.А. Капустин

*Институт прикладной физики РАН  
E-mail: [stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru),  
[kia@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:kia@hydro.appl.sci-nnov.ru)*

В натурном эксперименте исследована временная динамика турбулентной области, возбуждаемой надводным судном. По экспериментальным данным восстановлены геометрические размеры турбулентной области и показано, что зависимость ширины турбулентного следа от времени на начальном этапе описывается степенной функцией с показателем 0,4. Данная зависимость получена и лабораторном эксперименте по моделированию расширения плоского слоя турбулентности, возбуждаемой импульсным источником. Предложена качественная модель, описывающая процесс начального расширения корабельного следа.

**Ключевые слова:** морская поверхность, корабельные следы, слики, турбулентность, турбулентная диффузия.

## Введение

Для задач дистанционного зондирования морской поверхности исследование турбулентных следов связано с необходимостью идентификации различных неоднородностей поверхностного волнения [1-3]. Известно, что воздействие турбулентности в следах на морскую поверхность приводит к «выглаживанию» ветрового волнения и образованию сликов, различимых на РСА-изображениях [4, 5] наряду с неоднородностями иной природы, вызванными, в частности, внутренними волнами, пленками ПАВ и неоднородными течениями (см., например, [6-12]). Для однозначного различения этих неоднородностей между собой на спутниковых изображениях необходимо знание особенностей присущих тому или иному явлению. На рис.1. показано радиолокационное изображение (см. [4]) корабельного следа, отличие которого от других неоднородностей определяется, в частности, законом его расширения и наличием сложной внутренней структуры, включающей сликовые полосы вдоль его границ [5]. В работе [5], посвященной экспериментальному исследованию сликов в корабельных следах, были получены степенные законы расхождения последних при больших возрастах следа. В то же время, поскольку полосы формируются не сразу после прохождения судна, изучение законов расширения следа по геометрии сликов на начальной стадии развития следа представляется затруднительным. Что касается теоретического анализа динамики следа, то здесь с

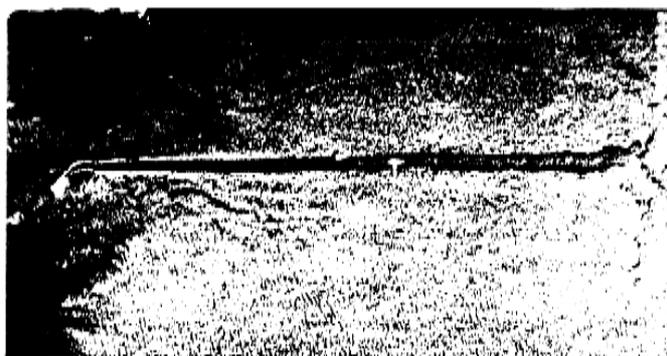


Рис. 1. Радиолокационное изображение корабельного следа

использованием полуэмпирических моделей, либо прямого численного моделирования [13] удается рассчитывать характеристики следа лишь на малых (порядка размера судна) масштабах, данные расчеты, проводящиеся обычно для изучения поля обтекания и оценки коэффициентов сопротивления судов (см. например [14]), не представляют значительного интереса для задач дистанционного зондирования морской поверхности.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований временной динамики турбулентного следа за надводным судном. Проведен анализ полученных зависимостей ширины и глубины следа от времени, дано сопоставление с результатами ранее выполненных наблюдений. Предложена качественная модель, позволяющая рассматривать начальную стадию расширения корабельного следа как диффузию одномерного слоя турбулентности от импульсного источника турбулентной энергии. Движение турбулентного слоя от импульсного источника турбулентности промоделировано в ходе лабораторного эксперимента и получено хорошее согласие с результатами предложенной модели.

### Натурный эксперимент

Натурные эксперименты по изучению корабельного следа проводились в прибрежной зоне Черного моря, в районе г. Геленджик в 2006-2008 годах. Объектом исследования являлся турбулентный след за надводным пассажирским судном. Прогулочное судно (рис. 2а), снабженное двумя винтами, вращающимися в противоположных направлениях, имеет ширину 6 м, и длину 20 м. В бухту, где проводились исследования, теплоход приходил дважды в день, что позволило провести большое число измерений в ходе ежегодных экспедиций.



(а)



(б)

Рис. 2. Надводное судно (а). ADCP, установленный на борту лодки (б)

Для изучения временной эволюции следа использовался акустический профилограф скорости течений – ADCP Workhorse Sentinel 600 (рис. 2б), позволяющий измерять три компоненты скорости в зависимости от глубины и величину сигнала обратного акустического рассеяния. Данное оборудование устанавливалось на борт моторной лодки (рис. 2б) и подключалось к компьютеру. Сразу после прохождения судна, моторная лодка несколько раз пересекала турбулентный след приблизительно по одному и тому же направлению, при этом производились измерения ADCP. Траектория лодки при двух последовательных пересечениях следа и полученные при этом профили акустического рассеяния показаны на рис. 3а, б.

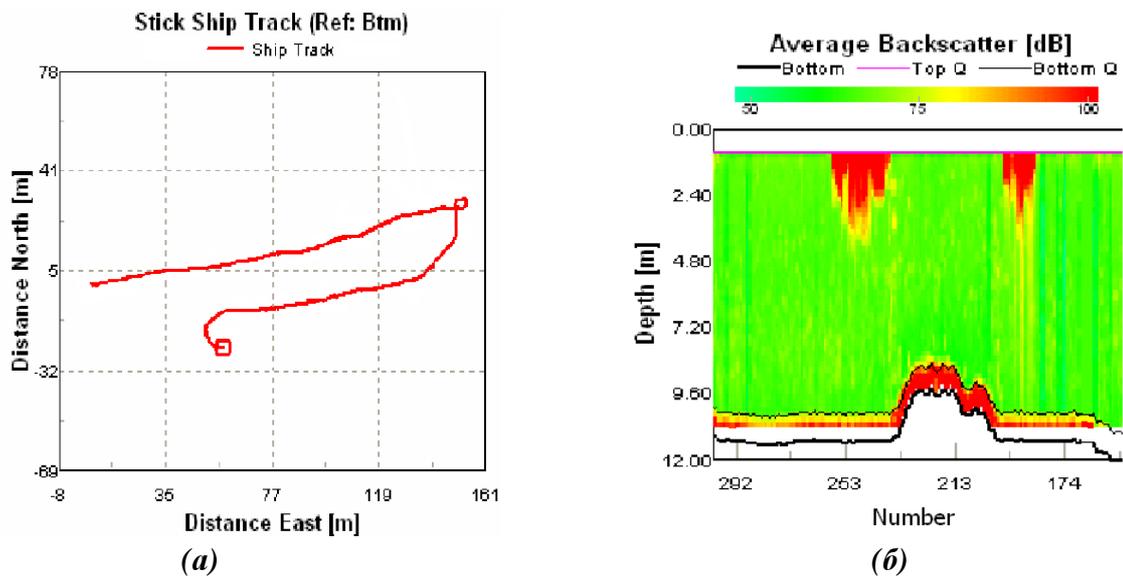


Рис. 3. Примеры записей траектории лодки при двух последовательных пересечениях следа (а) и соответствующих профилей мощности обратного рассеяния как функции номера отсчета сигнала ADCP при этих пересечениях (б)

Многочисленное пересечение следа дает картину временной эволюции турбулентной области (рис. 4).

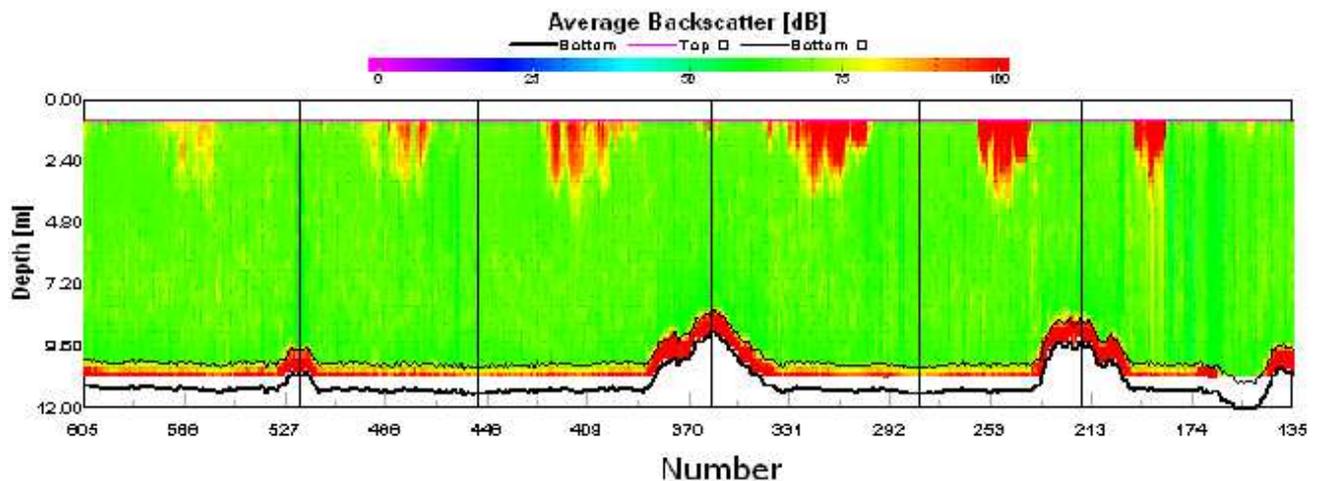


Рис. 4. Временная эволюция турбулентного следа по обратному акустическому рассеянию. По горизонтали отложены номера отсчетов ADCP. Вертикальными линиями обозначены точки разворота лодки

Турбулентный след характеризуется большой концентрацией пузырьков воздуха различных размеров, которые интенсивно рассеивают акустический сигнал [15]. Различие в уровнях сигнала обратного акустического рассеяния в следе и вне следа составляет значительную величину, в наших экспериментах - порядка 20 дБ. Пузырьки малого размера (диаметром  $d \ll 0.1$  см) увлекаются жидкостью и могут длительное время маркировать турбулентную область, не всплывая и не растворяясь [15].

Геометрия следа определялась не только по акустическому рассеянию, но и по структуре поля скорости в следе. Сильно переменные в пространстве течения интерпретируются прибором как ошибочные и поэтому не удается определить количественные характеристики турбулентности, но отсутствие данных о скоростях в

пределах турбулентного следа позволяет восстановить его границу. На рис. 5. изображены профили модуля горизонтальной скорости в поперечном сечении следа, на которые жирными линиями нанесены границы турбулентной области, определяемые максимальным градиентом уровня обратного рассеяния (1) и отсутствием данных о скоростях (2). На график нанесены координаты сликовых полос (■), формирующихся вдоль границ следа (см. фото на рис. 6). Положение полос фиксировалось с помощью GPS навигатора каждый раз при пересечении следа. Графики показывают, что границы области следа, определенные различными способами практически совпадают между собой, а сликовые полосы маркируют турбулентную область на поверхности и по их положению можно оценить ширину следа. Отметим, что полосы формировались не сразу за судном, а на расстоянии нескольких размеров судна.

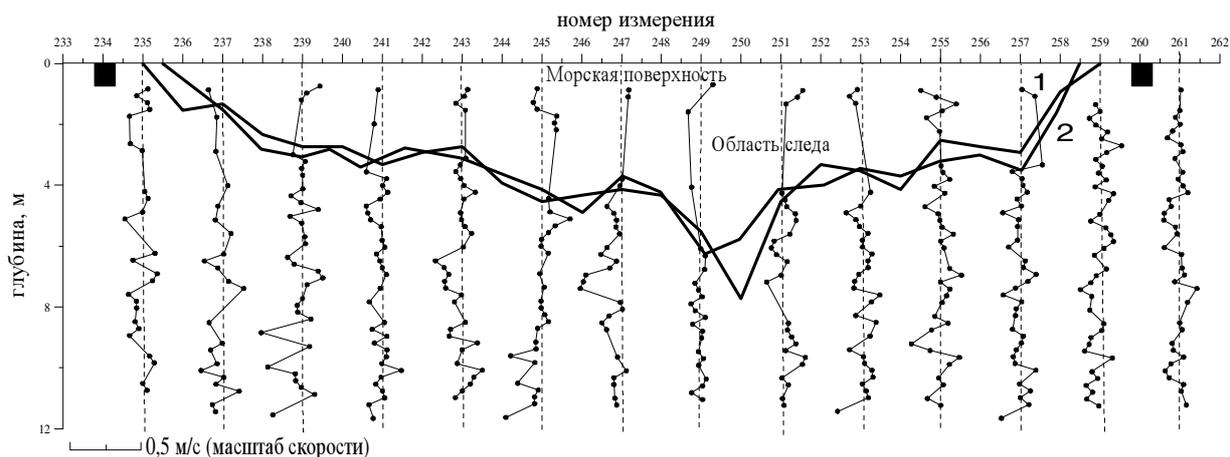


Рис. 5. Профили модуля горизонтальной скорости в поперечном сечении следа. (1) – граница области следа по акустическому рассеянию, (2) – граница по отсутствию данных о скоростях.

■ – координаты сликовых полос

В ходе обработки экспериментальных данных определялись средняя ширина и глубина следа в зависимости от времени, на рис. 7 представлены полученные в экспериментах зависимости указанных величин. Началу отсчета времени соответствует момент нахождения кормы судна на траектории лодки.



Рис. 6. Сливковые полосы вдоль границ следа

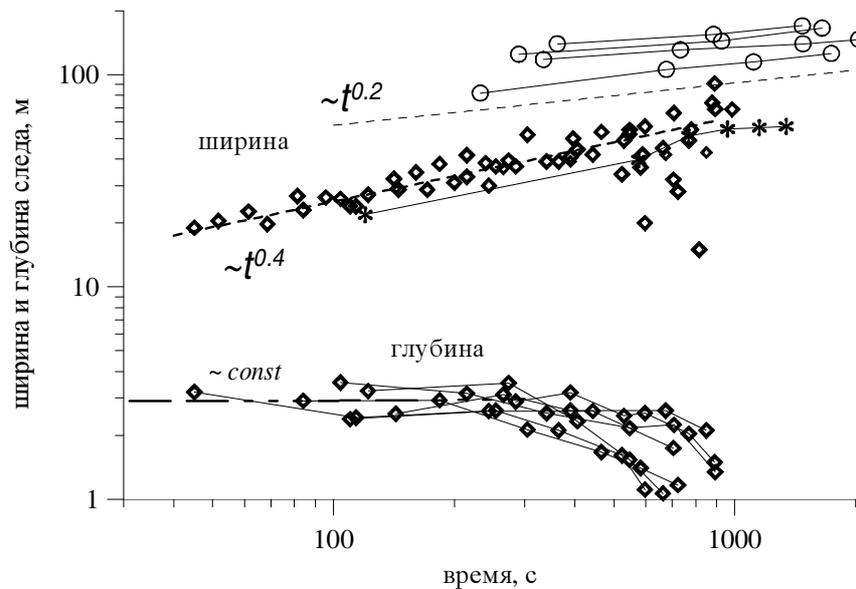


Рис. 7. Экспериментальные зависимости ширины и глубины следа в зависимости от времени. Настоящая работа -  $\diamond$ .  $O$  – по данным [5], \* – по данным экспериментов [16]. Степенные зависимости с показателями 0,4 и 0,2 (нанесены пунктиром)

Наряду с данными описанных экспериментов, нами был проведен анализ выполненных ранее натуральных наблюдений следов надводных кораблей, выполнявшихся в [16]. Зависимости [5] отвечают более позднему этапу расширения следа и близки к степенным функциям с показателем 0,15 - 0,2.

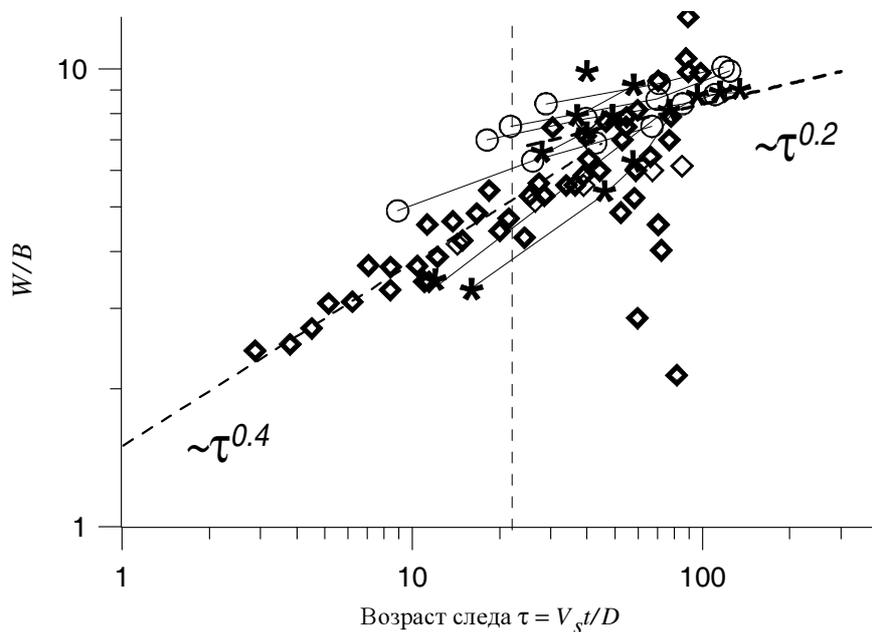


Рис. 8. Нормированные зависимости ширины следа от возраста.  $\diamond$  - настоящая работа, кружочки и звездочки по данным [5, 16]

В наших экспериментах на начальном этапе (на временах менее 400 с), наблюдается степенной (с показателем близким к 0,4) рост ширины следа, для всех экспериментов. Как видно из графика изменение усредненной глубины следа при этом незначительно, что можно объяснить несколькими факторами. Во-первых, в приповерхностном слое всегда присутствует слабая стратификация, которая может ограничивать расширение

турбулентности вниз. Во-вторых, за счет повышенной концентрации пузырьков воздуха в следе, он оказывается эффективно легче окружающей жидкости, что также затрудняет заглубление турбулентной области. В третьих, заглубление турбулентности может ограничиваться наличием спутной струи, которая создает дополнительный подток жидкости снизу в пределах следа.

По-видимому, противодействие расширения следа вниз и указанных выше возможных факторов приводит к постоянству глубины, которое в свою очередь позволяет рассматривать расширение турбулентного следа как увеличение толщины одномерного слоя турбулизованной жидкости. Определим возраст следа как  $\tau = (V_s t) / D$ , где  $t$  – время, а  $D$  – длина судна. На рис. 8 представлены зависимости ширины следа нормированной на поперечный размер ( $B$ ) судна от возраста  $\tau$ .

Как видно из рис. 8, зависимости ширины следа для разных судов, движущихся с различными скоростями после нормировки близки, что говорит о независимости законов расширения следа от особенностей конкретного судна. Возраст следа соответствующий начальной стадии расширения составляет  $\tau \sim 20$ .

### Анализ результатов эксперимента

Поскольку из эксперимента следует, что на начальном этапе глубина следа остается практически постоянной, то расширение турбулентной области можно рассматривать как расширение одномерного слоя турбулентности. На основе этого можно предложить следующую простую модель следа, которую иллюстрирует рис. 8.

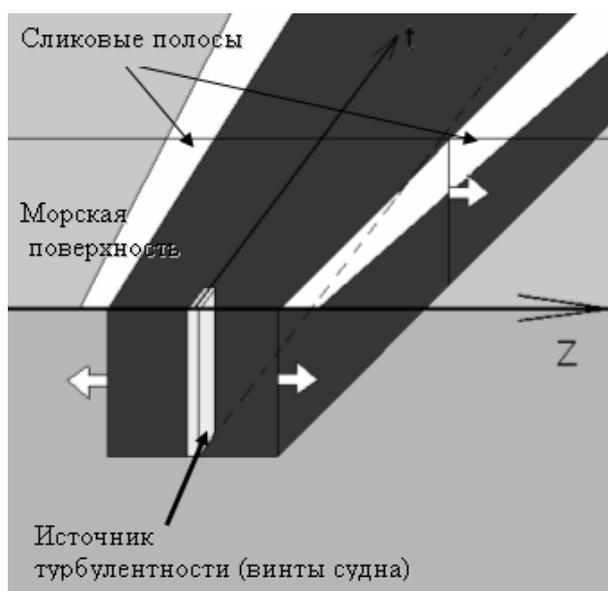


Рис. 9. Схематическое изображение расширения следа

Будем полагать, что источник турбулентности сосредоточен в тонком вертикальном слое, который расположен на центральной оси следа (см. рис. 9) и в котором имеет место интенсивное перемешивание жидкости винтами судна. Поскольку смещение судна на расстояние порядка характерного размера винтов происходит за малое (менее 1 с) по сравнению с рассматриваемыми временами эволюции следа время, то источник турбулентности можно считать импульсным. После прекращения действия источника расширение слоя определяется турбулентной диффузией, при этом не учитывается влияние спутного сдвигового течения, формирующегося в следе, на динамику расширения слоя. Это

предположение оправдано, если генерация турбулентности на сдвиговом потоке значительно слабее, чем ее возбуждение винтами судна, что, по-видимому, отвечает начальному этапу расширения следа.

Для описания начального расширения следа в рамках данной физической модели используется одномерное уравнение баланса турбулентной энергии [17]. На небольших временах развития турбулентного слоя будем пренебрегать, аналогично [18], диссипацией, поскольку из оценки величин входящих в уравнение характерное время диссипации на порядок превосходит время диффузии [17, 18]. Тогда уравнение баланса переходит в диффузионное уравнение с нелинейным коэффициентом диффузии (см. [19]):

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( L\sqrt{b} \frac{\partial b}{\partial z} \right) \quad (1)$$

где  $b$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций,  $z$  – горизонтальная координата в сечении следа.  $L$  – масштаб турбулентности, предполагаем, что  $L = const$ .

Для локализованного импульсного источника турбулентной энергии с начальным условием на оси следа

$$b = b_0 \delta(t), \quad z = 0, \quad b_0 = const \quad (2)$$

решение уравнения (1) дает зависимость ширины следа от времени в виде степенной функции [19]:

$$z(t) \sim t^{0.4} \quad (3)$$

Зависимость (3) удовлетворительно описывает экспериментальные зависимости ширины турбулентного следа от времени на начальном этапе (при возрастах следа  $\tau < 20$ ).

Подчеркнем еще раз, что такое грубое описание возможно лишь при малом возрасте следа и при постоянстве его глубины. При описании более поздней стадии принципиально необходим учет диссипации турбулентности, кроме того, эта стадия роста оказывается зависящей от метеоусловий: продолжительность стадии роста ширины следа увеличивается с ростом скорости приводного ветра. Данный эффект весьма важен при интерпретации радиолокационных изображений корабельных следов и будет более детально исследоваться в дальнейшем.

### Лабораторное моделирование расширения турбулентного слоя

Для проверки предложенной гипотезы о расширении турбулентного следа как диффузии плоского турбулизованного слоя было выполнено лабораторное моделирование динамики такого слоя. Эксперименты проводились в заполненной водой прозрачной кювете ( $260 \times 63 \times 230$  мм), в которой турбулентность генерировалась горизонтально осциллирующей вблизи дна ребристой пластинкой. При обтекании ребер на пластинке возникали отдельные вихри, которые на небольшом расстоянии от пластины сливались, образуя однородно турбулизованный слой. Исследовался кратковременный (“импульсный”) режим возбуждения турбулентности решеткой, при котором пластина совершала 3-4 колебания. Движение фронта визуализировалось при помощи краски, заливаемой на дно кюветы, и записывалось на видеокамеру. Характерные стадии движения слоя показаны на рис. 10а, б.

В результате обработки данных были определены зависимости средней толщины слоя от времени, результаты измерений представлены на рис. 11.

На рис. 11  $t_b$  – характерное время (оцененное в работе), по истечении которого существенной становится диссипация турбулентности. Нормировка толщины слоя использовалась в [18] для определения связи параметров турбулентности с параметрами источника ( $l$  – масштаб пластинки,  $a$  – амплитуда колебаний).

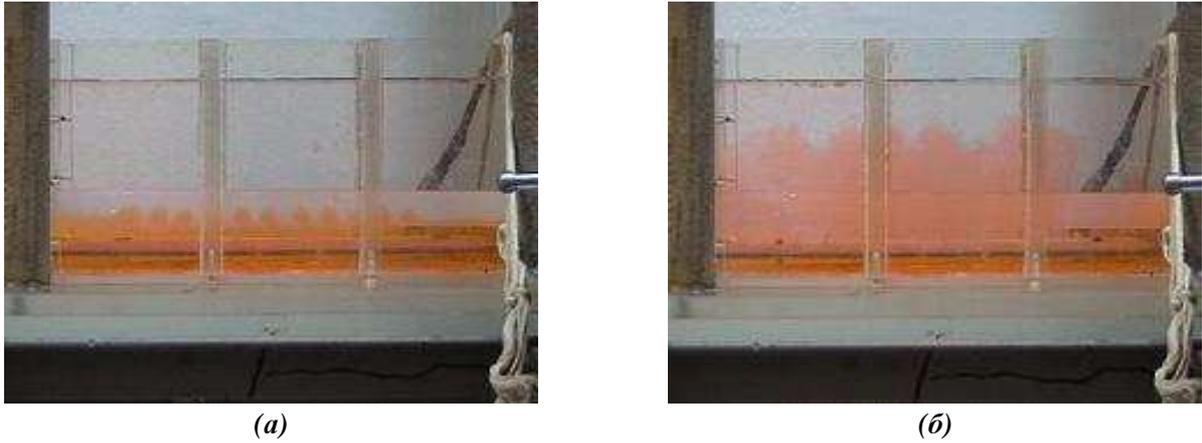


Рис. 10. Формирование отдельных вихрей (а). Однородно-турбулизированный слой (б)

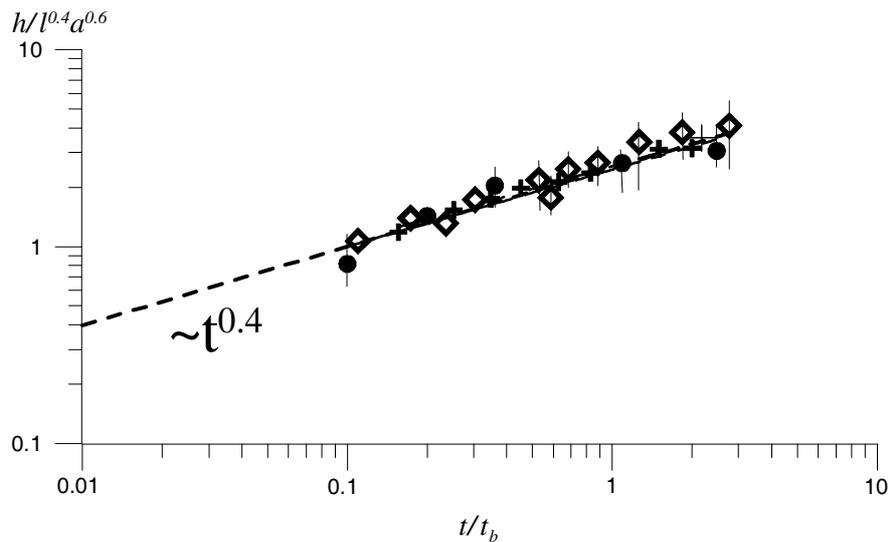


Рис. 11. Зависимость нормированной толщины турбулентного слоя от безразмерного времени при импульсном возбуждении турбулентности

Как видно из графика, экспериментальные точки близки к степенной зависимости  $\sim t^{0.4}$ , что неплохо согласуется с выводами полуэмпирической теории для импульсного источника турбулентной энергии.

### Заключение

Сформулируем основные результаты работы:

- турбулентный след, возбуждаемый движущимся надводным судном, на начальном этапе (при возрасте  $\tau < 20$ ) расширяется по закону близкому к степенному с показателем 0,4. При этом глубина следа остается практически постоянной, что позволяет рассматривать его как плоский слой турбулизированной жидкости;

- в лабораторном эксперименте промоделировано расширение турбулентного слоя от импульсного источника и получены зависимости толщины слоя от времени, близкие к теоретическим и полученным в натурном эксперименте;

- в рамках полуэмпирической теории турбулентности, с учетом гипотезы о постоянстве масштаба можно качественно описывать расширение турбулентного следа как динамику одномерного слоя турбулентности от импульсного источника.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 08-05-00634, 08-05-97011), INTAS (BOW), а также проектов Научной школы акад. В.И. Таланова и программы “Мировой океан”.

## Литература

1. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
2. Vesecky J.F., and R.H. Stewart. The observations of ocean surface phenomena using imagery from the Seasat synthetic aperture radar: An assessment // J. Geophys. Res. 87, (C5), 3397-3430, 1982.
3. Apel J.R., Byrne M., Proni J.R., Charnell R.L. Observations of oceanic internal and surface waves from the Earth Resources Technology Satellite // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 865-881.
4. Lyden, J.D., R.R. Hammond, D.R. Lyzenga, and R.A. Shuchman. Synthetic aperture radar imaging of surface ship wakes // J. Geophys. Res. 93 (C10), 12293-12303, 1988.
5. Peltzer R.D., Griffin O.M., Barger W.D., and Kaiser J.A.C. High resolution measurements of surface-active film redistribution in ship wakes // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. No. C4. P. 5231-5252.
6. Thompson D.R., Gasparovic R.F. Intensity modulation in SAR images of internal waves // Nature. 1986. V. 320. P.345-348.
7. Alpers W., Huehnerfuss H. Radar signatures of oil films floating on the sea surface and the Marangoni effect // J. Geophys. Res. 1988. V.93. No. C4. P. 3642-3648.
8. Da Silva J.C., Ermakov S.A., Robinson I.S., Jeans D.R.G., Kijashko S.V. Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf. 1. Short-period internal waves // J. Geophys. Res.1998. V.103. No.C4. P.8009-8031.
9. Ochadlick A.R., Cho P., and Evans-Morgis J. Synthetic aperture radar observations of currents collocated with slicks // J. Geophys. Res. 1992. V.97. P. 5325-5330.
10. Lyzenga D.R., Marmorino G.O. Measurements of surface currents using sequential synthetic aperture radar images of slick patterns near the edge of the Gulf Stream // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. No. C9. P. 18769-18777.
11. Ermakov S.A., Panchenko A.R., Salashin S.G. Film Slicks on the Sea Surface and Some Mechanisms of Their Formation // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 1992. V.16. P. 279-304.
12. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю. и др. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // УФН, 2003. Т.173. № 1. С. 69-87.
13. Twenty-Fourth Symposium on Naval Hydrodynamics. National Academic Press. Washington D.C. 2003. 1026 p.
14. Справочник по теории корабля. Т.1. Л.: Судостроение, 1985. 764 с.
15. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.
16. Езерский А.Б., Сандлер Б.М., Селивановский Д.А. Эхолокационные наблюдения газовых пузырьков вблизи морской поверхности // Акустический журнал, Т. XXXV, Вып. 5.
17. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Часть 1. М.: Наука, 1965. С. 345.
18. Ермакова О.С., Капустин И.А., Папко В.В. О динамике турбулентного слоя в однородной и стратифицированной жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. с. 629-640.
19. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. М.: Наука, 1986. 736 с.

## On widening of turbulent surface ship wake

S.A. Ermakov, I.A. Kapustin

*The Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences*

*E-mail: [stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru),*

*[kia@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:kia@hydro.appl.sci-nnov.ru)*

Studies of temporal evolution of turbulence, generated by a moving boat are carried out in field experiment. The geometrical scales of the turbulent area are retrieved from experimental data and the temporal dependence of the wake width as shown to be described by a 0.4-power law. Similar dependence was obtained in wave tank experiment on modeling of spreading of a turbulent layer excited by a pulse source. A qualitative model of an initial stage of wake spreading is suggested.

**Keywords:** sea surface, ship wakes, slicks, turbulence, turbulent diffusion.