

УДК 532.536.3

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ГИДРОЛОКАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ ВПЕРЕДИ И ПОЗАДИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

© 2020 г. Ю. Д. Чашечкин^{1,*}, В. Е. Прохоров¹

Представлено академиком РАН Д.М. Климовым 10.03.2020 г.

Поступило 12.03.2020 г.

После доработки 12.03.2020 г.

Принято к публикации 13.03.2020 г.

Методом теневой визуализации и эхолокации впервые изучена пространственная структура опережающего возмущения и спутного следа за пластиной в режиме интенсивной генерации внутренних волн. В эхолокационной картине тонкие структуры зарегистрированы и в опережающем возмущении, и в следе в слое движения тела. В теневой картине поля опережающих возмущений являются гладкими, тонкие прослойки выражены в спутном течении. Локальные максимумы в представленных пространственных спектрах возмущений выражены на масштабах, несколько превышающих длину присоединенных внутренних волн, и при меньших значениях. Наиболее тонкие прослойки наблюдаются в теневом изображении спутного следа непосредственно позади пластины.

Ключевые слова: стратификация, опережающее возмущение, след, теневой прибор, гидролокатор, профили освещенности, спектры, масштабы

DOI: 10.31857/S2686740020020091

При изучении обтекания препятствий потоком жидкости или газа особое место занимает задача обтекания полосы — тела простой геометрии, позволяющего проследить зависимость картины течения, действующих моментов и сил от параметров задачи — размеров и скорости потока, деталей формы и углового положения тела при различной степени выраженности эффектов трения в пограничном слое. Первоначальные расчеты и опыты проводились в предположении однородности среды [1], когда пренебрегают естественными вариациями плотности, всегда присутствующими в течениях реальной жидкости вследствие неоднородностей распределения температуры, состава, давления, концентрации растворенных веществ и взвешенных частиц. Основой теоретических и экспериментальных исследований служат системы фундаментальных уравнений [2], а также другие модели — в основном теория пограничного слоя [1, 3] и различные версии теории турбулентности [2, 4]. Различие общих свойств симметрий и рангов определяющих систем уравнений затрудняет прямое сравнение различных теоретических результатов между собой и требует

разработки специальных методик их верификации при сравнении с экспериментом. Трудности возникают и при определении механизмов формирования тонких компонентов течений, оценке их влияния на динамику установления течений.

Во второй половине прошлого века развился интерес к изучению влияния стратификации, обусловленный поиском источников внутренних волн и природы формирования долгоживущих высокоградиентных прослоек в картине физических полей в гидросфере и атмосфере [5]. Уже первые лабораторные опыты, которые показали, что даже слабая стратификация оказывает заметное влияние и на геометрию, и на динамику течений, стимулировали интерес к систематическому изучению обтекания тел простой формы — цилиндра [6], сферы [7] и пластины [8].

Одновременно стали развиваться методы численного моделирования обтекания препятствий на основе теории пограничного слоя [9] и различных моделей турбулентности [10]. Сравнения расчетов обтекания пластины с экспериментом показали, что волновое поле и опережающее возмущение в расчетах воспроизводятся достаточно хорошо, однако тонкая структура течений и собственно плотностной след практически не выделяются [11]. В то же время в численных расчетах обтекания вертикальной пластины на основе системы фундаментальных уравнений [12] высокоградиент-

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: yulidch@gmail.com

ные оболочки следа позади тела выделяются достаточно четко, как и в опытах методами теневой визуализации или эхолокации [13]. Поскольку из анализа общей системы фундаментальных уравнений механики жидкостей [14] следует, что тонкая высокоградиентная структура — неотъемлемое свойство всех течений неоднородных жидкостей, особый интерес представляет экспериментальное исследование картины обтекания тел методами, позволяющими регистрировать как крупномасштабные, так и тонкоструктурные компоненты во всех элементах течений. Цель данной работы — изучение структуры возмущений стратифицированной жидкости, сопутствующих движению вертикальной пластины согласованными методами гидролокации и теневой визуализации. При этом основное внимание уделено возмущениям впереди тела. Условия опытов с выраженными волновым и тонкоструктурными возмущениями выбирались по результатам анализа системы фундаментальных уравнений [2, 14] с учетом результатов расчетов [12] и ранее выполненных экспериментов по визуализации стратифицированных течений [6, 8].

Методика опытов разрабатывалась с учетом наблюдения внутренних волн и разрешения тонкоструктурных компонентов, пространственные и временные масштабы которых определяют критерии выбора размеров поля зрения и разрешающей способности инструментов [14]. В число больших линейных параметров данной задачи входят масштаб стратификации $\Lambda = \left| \frac{d \ln \rho}{dz} \right|^{-1}$, высота препятствия h и длина присоединенной внутренней волны $\lambda = UT_b$. Микромасштабы определяются поперечными размерами лигаментов стока типа вязкой $\delta_N^v = \sqrt{\frac{\nu}{N}}$ и диффузионной $\delta_N^{k_s} = \sqrt{\frac{\kappa_s}{N}}$ при-

роды, а также прандтлева типа $\delta_U^v = \frac{\nu}{U}$, $\delta_U^{k_s} = \frac{\kappa_s}{U}$. Здесь $\rho(z) = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{\Lambda}\right)$ — плотность жидкости (ось z — вертикальна), $N = \sqrt{\frac{g}{\Lambda}}$ — частота и $T_b = \frac{2\pi}{N}$ — период плавучести, $\mathbf{g} = (0, 0, -g)$ — ускорение свободного падения, U — скорость тела, ν и κ_s — коэффициенты кинематической вязкости и диффузии стратифицирующего компонента [12, 14]. Базовые безразмерные характеристики — числа Рейнольдса $\left(\text{динамическое } Re_v = \frac{hU}{\nu} = \frac{h}{\delta_U^v} \text{ и } \right.$

диффузионное $Re_\kappa = \frac{hU}{\kappa_s} = \frac{h}{\delta_U^{k_s}} \left. \right)$, а также число Фруда $Fr = \frac{U}{Nh} = \frac{\lambda}{2\pi h}$ и параметр стратификации

$C = \Lambda/h$ определяются как отношения базовых масштабов.

Опыты выполнены на стенде ЛПБ из состава уникальной исследовательской установки “ГФК ИПМех РАН” [15], основу которого составляет прямоугольный бассейн размерами $240 \times 40 \times 60$ см, в боковые стенки которого вставлены оптические стекла. Наблюдение картины течения в вертикальной плоскости проводили с помощью теневого прибора ИАБ-458 с полем зрения 23 см и визуализирующей диафрагмой типа “нож Фуко” или “нить Максудова”. Гидролокатор работал на несущей частоте 1 МГц (длина звуковой волны 0.15 см), длительность и период посылки — 30 мкс и 20 мс соответственно. С помощью схемы автоматической временной регулировки усиления выделялось рассеяние в заданном диапазоне глубин.

Бассейн заполнялся раствором поваренной соли переменной концентрации методом непрерывного вытеснения [15]. Контроль распределения плотности и периода плавучести проводились оптическими методами по наблюдениям плотностной метки и датчиком электропроводности, фиксирующим частоту собственных колебаний среды.

Бассейн заполнялся раствором поваренной соли переменной концентрации методом непрерывного вытеснения [15]. Контроль распределения плотности и периода плавучести проводились оптическими методами по наблюдениям плотностной метки и датчиком электропроводности, фиксирующим частоту собственных колебаний среды.

Вертикальная пластина высотой $h = 2.5$ см, толщиной 2.5 мм и длиной 39.5 см устанавливалась на ножах, соединенных с кареткой, которая перемещалась с постоянной скоростью U .

Акустическое зондирование выполнялось в вертикальном направлении. Ось звукового пучка проходила через центр бассейна. Расстояние от плоскости антенны гидролокатора до середины пластины составляло 15 см. Сигналы гидролокатора и оптические изображения поступали в память компьютера для обработки. Использование специализированного программного обеспечения позволило провести математическую обработку, в ходе которой были выделены параметры тонкоструктурных возмущений в оптическом и акустическом изображениях.

В картине теневое изображение течения, образующегося при равномерном движении пластины с $U = 0.17$ см/с в жидкости с периодом плавучести $T_b = 7.5$ с, представленной на рис. 1а, система плавно сходящихся наклонных полос визуализирует опережающее возмущение, последовательность полуокружностей позади тела с шагом 1.3 см — присоединенные внутренние волны. Система наклонных полосок позади пластины протяженностью от 1.3 до 2.4 см выше оси следа и от 1.0 до 2.2 см ниже оси визуализирует высокоградиентные прослойки. Спутный след, как и в расчетах [12], оконтурен собственной группой наклонных высокоградиентных прослоек с большими значениями градиента коэффициента преломления и плотности соответственно. Здесь показаны горизонтальные распределения вариаций освещенности на расстояниях $z = 4$ см (рис. 1б) и

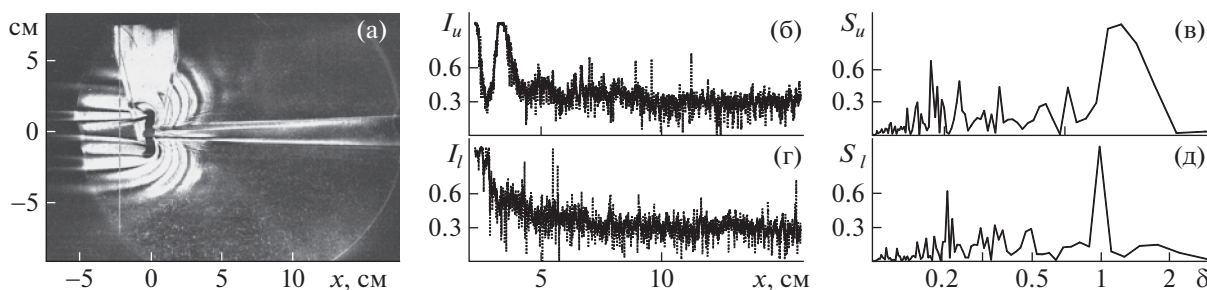


Рис. 1. Теневая картина (а) следа и опережающего возмущения, горизонтальные профили относительной освещенности и спектры масштабов выше (б, в) и ниже (г, д) оси следа.

$z = -3$ см относительно оси следа. Пунктиром представлены текущие значения, вложенной сплошной линией обозначено осредненное (по методу скользящего среднего с окном $0.2\lambda = 0.26$ см). В распределении освещенности четко выражен волновой характер кривой — следствие быстро затухающих по мере удаления присоединенных внутренних волн. На фотографии (рис. 1а) отчетливо выражены только три первых осцилляции, однако в распределении освещенности (рис. 1б) видно, что волны заполняют всю область наблюдения позади тела. Волновой характер нижней части следа (рис. 1г) выражен менее отчетливо, что обусловлено особенностями настройки теневого прибора. Структура картины течения позади пластины согласуется с данными [12].

Пространственные спектры

$$S_n(k) = \frac{\Delta x}{N} \left| \sum_{m=0}^{N-1} (I_n)_m \exp(-i2\pi km) \right|^2, \quad k \leq \frac{1}{\Delta x},$$

где k — обратный масштаб, Δx — пространственный интервал дискретизации освещенности I , распределений относительной интенсивности I_n , для верхней и нижней половин следа (рис. 1б, г) приведены на рис. 1в, д (по оси абсцисс отложено расстояние от центра пластины $l = Ut$, где t — возраст, нормированное на длину присоединенной внутренней волны, $\delta = \frac{l}{\lambda}$). Основной максимум на обеих спектральных кривых расположен в окрестности масштаба длины внутренней волны $\lambda = U \cdot T_b$ ($\delta = 1.1$). С дальнейшим увеличением масштаба спектр быстро спадает.

Дискретный характер спектра сохраняется при уменьшении масштабов до $\delta = 0.14$ и 0.16 для верхней и нижней половины следа соответственно. Локальные спектральные пики присутствуют также на безразмерных масштабах $0.18, 0.24, 0.36$ и 0.71 для верхней части следа и $0.21, 0.30, 0.34$ и 0.49 для нижней, что свидетельствует о сохранении на больших удалениях от пластины влияния на акустический сигнал тонкой слоистой структу-

ры, отчетливо видимой в изображении первых трех волн непосредственно за пластиной. Мелкомасштабные неоднородности перед телом, создающие регулярные повторяющиеся вариации возмущений профилей рассеяния, не выделяются в теневой картине, поскольку затеняются большими возмущениями волновой природы.

Выборки из последовательности вертикальных профилей относительного уровня обратного рассеяния (нормировка на абсолютный максимум всей реализации) и составленная из них эхограмма, представленные на рис. 2, показывают, что изменения в характере рассеяния звука отмечаются не только позади, но и впереди тела. В эксперименте профили обратного рассеяния снимались с периодом 20 мс, что при данной скорости $U = 0.17$ см/с соответствует шагу по горизонтали 3.4×10^{-3} см.

В эхограмме обратного рассеяния (центральная часть рис. 2) тело представлено контрастным темным пятном, образованным основным и боковыми лепестками диаграммы направленности гидролокатора. В распределении интенсивности перед телом выделены две области повышенной активности высотой 3.4 см (нижний край которой расположен на расстоянии $\Delta z = 2.6$ см от центра пластины) и высотой 3.5 см (верхний край на расстоянии 0.2 см от центра пластины). Их разделяет область слабого рассеяния высотой 2.6 см. Все профили сигнала акустического рассеяния в опережающем возмущении, в отличие от оптического изображения, характеризуются тонкой структурой. В целом картина распределения акустического возмущения соответствует геометрии опережающих нестационарных внутренних волн, гребни которых представлены наклонными лучами, сходящимися к точке старта тела. В оптическом изображении окрестности пластины лучи плавно переходят в полуокружности присоединенных внутренних волн.

Позади тела области повышенного рассеяния также образуют две полосы, верхняя из которых (высотой 3.7 см) перекрывает часть следа ниже центра пластины, а нижняя (высота 2.6 см) отделе-

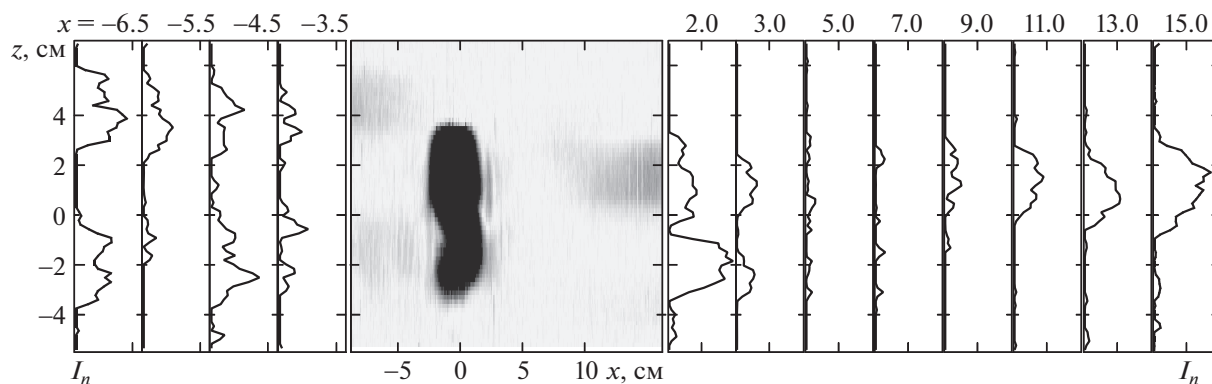


Рис. 2. Эхограмма опережающего возмущения и следа (в центре) и вертикальные профили относительного уровня обратного рассеяния I_n в сечениях x .

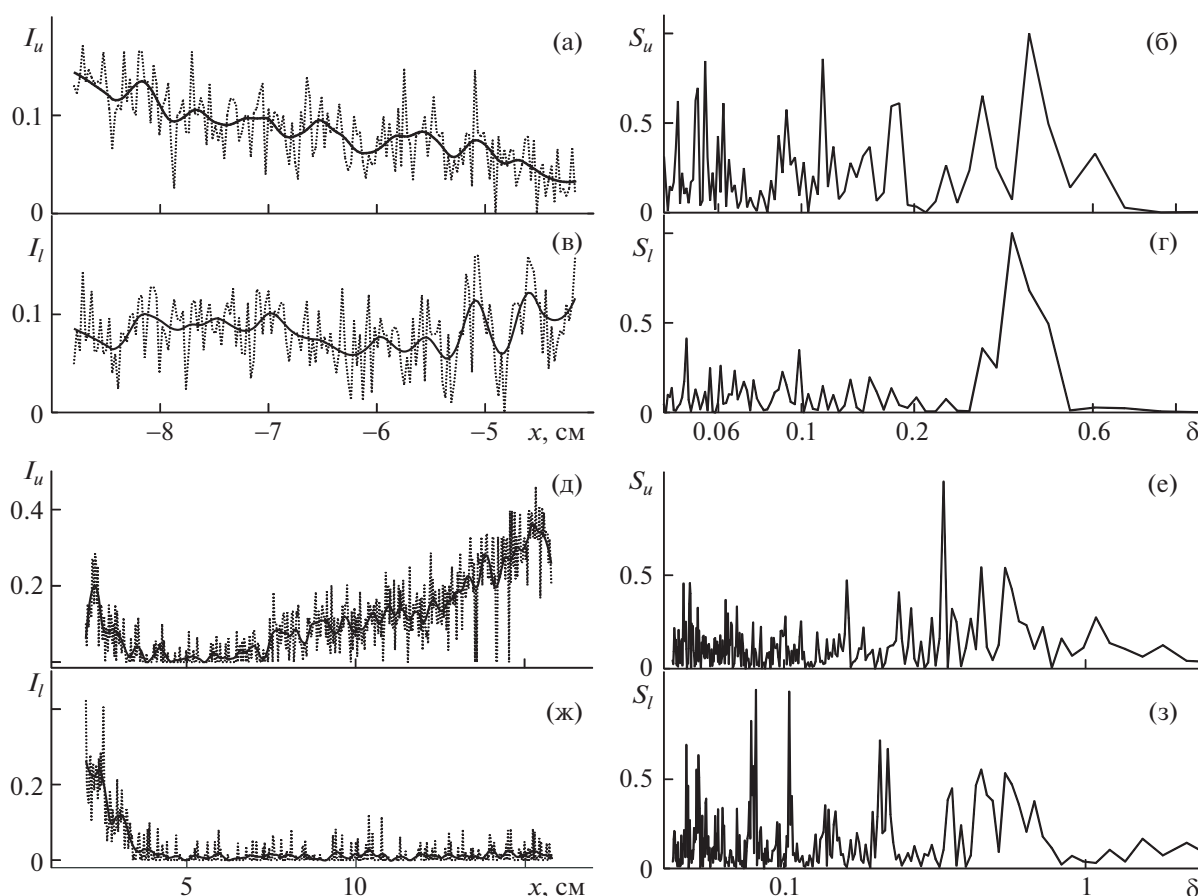


Рис. 3. Профили относительного уровня обратного рассеяния (а, в, д, ж) и спектры масштабов (б, г, е, з) впереди (а и б, в и г) и позади (д и е, ж и з) пластины вдоль горизонтов выше (а и б, д и е) и ниже (в и г, ж и з) оси следа.

на от нее тонким слоем шириной 0.4 см. Сравнение профилей на расстояниях $\Delta x = 2$ и 11 см от задней кромки пластины показывает, что высоты полос практически не меняются, в отличие от распределения интенсивностей. Непосредственно за пластиной сигнал в нижней части следа является

более выраженным, однако его интенсивность быстро падает с удалением. В интервале $5.5 < x < 7.3$ см сигнал практически отсутствует, в нем сохраняются только мелкомасштабные возмущения. Затем интенсивность рассеяния в верхнем слое — как интегральное значение, так и мелко-

масштабная компонента — начинает нарастать. Важно подчеркнуть, что как далеко впереди тела, так и в его непосредственной окрестности, и дальнем спутном следе в сигнале рассеяния выражена тонкая структура, типичный масштаб которой в слоях рассеяния составляет 0.7 см при $2 < x < 15$ см.

Горизонтальная структура поля рассеяния, показанного в центре рис. 2, представлена на рис. 3. В опережающем возмущении интенсивность рассеяния приведена на горизонтах $z_1 = 4.5$ и -1.6 см, а в спутном следе, соответственно, на $z_3 = 1.5$ и $z_4 = -1.5$ см (в центре пластины $z = 0$). Штриховой кривой показано текущее значение интенсивности рассеяния, сплошной — осредненное на масштабе 0.1λ . В сигналах как перед телом, так и позади него четко выражена тонкая структура. Впереди тела пик выражен на масштабе $\delta = 0.40$ и 0.36 , в верхней и нижней полосе рассеяния соответственно. В верхней полосе спектр масштабов более богатый и включает пики на масштабах 0.3, 0.24, 0.17, 0.11, 0.09, 0.05 и 0.02. В нижней полосе спектр возмущений более бедный, в нем выражены только мелкомасштабные пики на масштабах 0.09, 0.06, 0.05.

Позади тела средний уровень сигнала в верхней полосе после спадания начинает монотонно возрастать. Сигнал от нижнего слоя после краткого спадания слабо флуктуирует вблизи нулевого значения. В обоих компонентах сигнала в следе выражена только мелкомасштабная составляющая. Спектры обоих сигналов спадают при $\delta > 0.6$. Максимум спектра рассеяния от нижнего слоя выражен при $\delta = 0.57$, а в верхнем при 0.54. В следующей группе спектральных пиков выделяются масштабы 0.46 и 0.36 в нижнем слое, и 0.45 и 0.333 — в верхнем. Следующий пик — при $\delta = 0.2$ и 0.16 в верхнем и нижнем слое соответственно. Наиболее мелкомасштабные пики — 0.046 и 0.047 в верхнем и нижнем слое.

Совместная регистрация тонкой структуры в следе за телом оптическим и акустическим методами свидетельствует о формировании высокоградиентных прослоек, которое наблюдаются в полях и других величин, в частности, скорости течения [12]. Механизм формирования структурированного акустического сигнала в отсутствие тонкоструктурных возмущений в поле оптического показателя преломления в опережающем возмущении нуждается в дополнительном изучении.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме АААА-А18-118011990267-5 государственного задания. Эксперименты проведены при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-00870). Расчеты выполнены в НИВЦ МГУ при поддержке Программы Президиума РАН I.2.49 “Взаим-

действие физических, химических и биологических процессов в Мировом океане”, проект АААА-А17-117121120015-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
3. Бондарев Е.Н., Дубасов В.Т., Рыжов Ю.А., Свиричевский С.Б., Семенчиков Н.В. Аэрогидромеханика. М.: Машиностроение, 1993. 608 с.
4. Basnet K., Constantinescu G. Effect of a Bottom Gap on the Mean Flow and Turbulence Structure Past Vertical Solid and Porous Plates Situated in the Vicinity of a Horizontal Channel Bed // Physical review fluids. 2019. Т. 4. 044604. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.044604>
5. Тернер Дж.С. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. 429 с.
6. Чашечкин Ю.Д., Миткин В.В. Макро- и микро-структура спутного стратифицированного течения за цилиндром // ДАН. 2000. Т. 373. № 6. С. 767–770. <https://doi.org/10.1134/1.1310740>
7. Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика сферы в стратифицированной жидкости // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 1. С. 3–9. <https://doi.org/10.1007/BF01051469>
8. Chashechkin Yu.D., Mitkin V.V. Vortex Arrays Past a Sloping Strip Uniformly Moving in Homogeneous or Linearly Stratified Fluid // J. Visualization. 2002. V. 5. № 2. P. 120. <https://doi.org/10.1007/BF03182419>
9. Hanson R.E., Buckley H.P., Lavoie P. Aerodynamic Optimization of the Flat Plate Leading Edge for Experimental Studies of Laminar and Transitional Boundary Layers // Experiments in Fluids. 2012. V. 53 (4). P. 863–871. <https://doi.org/10.1007/s00348-012-1324-2>
10. Basnet K., Constantinescu G. Effect of a Bottom Gap on the Mean Flow and Turbulence Structure Past Vertical Solid and Porous Plates Situated in the Vicinity of a Horizontal Channel Bed // Physical review fluids. 2019. V. 4. 044604. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.044604>
11. Houcine H., Chashechkin Yu.D., Fraunie Ph., et al. Numerical Modeling of the Generation of Internal Waves by Uniform Stratified Flow over a Thin Vertical Barrier // Int. J. for Numerical Methods in Fluids. 2012. V. 68. P. 451–466. <https://doi.org/10.1002/fld.2513>
12. Chashechkin Yu.D., Zagumennyi I.V. Visualization of Stratified Flows Around a Vertical Plate: Laboratory Experiment and Numerical Simulation // Intern. J. Computational Methods and Experimental Measurements. 2020. V. 8. № 2. P. 148–161. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V8-N2-148-161>
13. Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д. Структура стратифицированного течения за тонкой вертикальной пластиной по данным теневой визуализации и

- гидролокации // ДАН. 2013. Т. 448. № 5. С. 538–542.
<https://doi.org/10.1134/S1028335813020067>
14. *Chashechkin Yu.D.* Singularly Perturbed Components of Flows – Linear Precursors of Shock Waves // *Math. Model. Nat. Phenom.* 2018. V. 13. № 2. P. 1–29.
<https://doi.org/10.1051/mmnp/2018020>
15. Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере (ГФК ИПМех РАН).
<http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>

VISUALIZATION AND ECHO SOUNDING OF STRATIFIED LIQUID DISTURBANCES AHEAD AND PAST THE VERTICAL PLATE

Yu. D. Chashechkin^a and V. E. Prokhorov^a

^a *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS D.M. Klimov

Using the schlieren visualization and echo sounding method, the spatial structure of the disturbances ahead and past the plate was first studied in the flow regime of intense internal waves generation. In the echograms, fine structures are registered both in the upstream disturbances and in the wake of the body within layer of motion. In the schlieren images, the fields of upstream disturbances are smooth, thin layers are expressed in the downstream wake. Local maxima in the spatial perturbation spectra are expressed at scales slightly exceeding the length of the attached internal waves, and, in less extent, at lower scales. The thinnest interfaces are observed in the schlieren image of the wake immediately behind the plate.

Keywords: stratification, upstream disturbance, wake, schlieren instrument, sonar, illuminance profiles, spectra, scales