

## **Аннотация работы:**

Объект исследования – процессы перемешивания в течениях со стратификацией и неровностями подстилающей поверхности. Цели работы – развитие и верификация методов численного моделирования стратифицированных течений с препятствиями в различных условиях для воспроизведения структуры потока и тепломассопереноса. Для турбулентных стратифицированных течений с плохообтекаемыми телами, генерирующими внутренние волны, развиты вычислительные технологии решения уравнений динамики жидкости и газа. Модифицированные алгоритмы верифицированы в расчетах при различных параметрах геометрии препятствий (тонкого вертикального барьера, холмов косинусоидальной и треугольной формы), исходных распределений плотности, чисел Рейнольдса  $Re$ , Фруда  $Fr$ , Шмидта  $Sc$ , задания малых возмущений, режимов обрушения волн. Для условий опыта ИГиЛ СО РАН с профилем плотности в виде пикноклина, получены по модифицированным алгоритмам новые данные трехмерных расчетов. Результаты верификации расчетов обтекания тела смешивающейся многослойной жидкостью в условиях физических экспериментов позволяют получить комплексное решение рассматриваемой задачи.

## **Тема работы:**

Численное моделирование эволюции и обрушения поверхностных и внутренних волн

## **Состав коллектива:**

Яковенко Сергей Николаевич, д.ф.-м.н., доцент, в.н.с. ИТПМ СО РАН.

Бойко Андрей Владиславович, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, г.н.с., зав. лаб. ИТПМ СО РАН.

Евтушок Георгий Юрьевич, магистрант НГТУ (2018), аспирант ИТПМ СО РАН.

## **Информация о гранте:**

Проект 2 «Влияние реальных гидрофизических факторов (стратификация, топография, перемешивание) на процессы массообмена в океане, атмосфере и экология прибрежных вод» Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН II.1 2018–2020 гг.

Руководитель – Ляпидевский В.Ю. (ИГиЛ СО РАН).

Отв. исполнители – Ерманюк Е.В., Макаренко Н.И., Сапрыкин А.И., Яковенко С.Н.

## **Научное содержание работы:**

### **1. Постановка задачи (актуальность, цели и задачи).**

Процессы тепломассообмена в стратифицированных по плотности атмосфере и океане являются одним из основных факторов формирования климата Земли, развития и поддержания различных биосистем и их экологического равновесия. Наличие даже слабой плотностной стратификации потока, обтекающего препятствие на земле или под водой, может приводить к резкому изменению режима обтекания, формированию локализованных высокоэнергетических течений, интенсивному вихревому движению, намного превосходящему характерные размеры препятствия, а также к другим гидрофизическим процессам, влияющим на продуктивность биосистем и жизнедеятельность человека. В частности, неровности рельефа в потоке с устойчивой стратификацией генерируют подветренные внутренние волны, играющие важную роль в циркуляции атмосферы и океана, вызывая перенос импульса, энергии, химических примесей, морских организмов. Опрокидывание нелинейных высокоамплитудных волн порождает зоны повышенной турбулентности. Высокоэнергетические процессы под влиянием орографии формируются,

например, при боре в прибрежных зонах: возникают подветренные бури, опасные для судоходства, авиации, прибрежной инфраструктуры. Исследования подобных явлений актуальны в аэрогидрофизических приложениях [1, 2], где необходимо знание механизмов развития геофизической турбулентности. Несмотря на их активное изучение, до сих пор нет ясного понимания особенностей эволюции областей обрушения поверхностных и внутренних волн при различных условиях.

Цель работы – изучение сценариев развития неустойчивости и турбулентности при опрокидывании внутренних волн, создаваемых препятствием в потоке с устойчивой стратификацией. Основная задача состоит в исследовании особенностей возникновения неустойчивости, перехода к турбулентности, структуры итогового течения в квазистационарном состоянии при различных параметрах набегающего потока, геометрии препятствия – числе Фруда ( $Fr$ ), Рейнольдса ( $Re$ ), Прандтля ( $Pr$ ), граничных условиях, исходных полях скорости и плотности.

## **2. Современное состояние проблемы.**

Натурные наблюдения развития неустойчивости в атмосфере и океане ограничены возможностями аппаратуры и редкой сеткой станций измерения. Лабораторный эксперимент по развитию турбулентности в области обрушения волн также представляется сложной задачей. Для измерения тонких характеристик неустойчивости, в опытах с телом, буксируемым у дна или свободной поверхности гидродинамического канала (напр., [3–5]), не хватает разрешения, а длительность опыта может быть недостаточна для достижения стационарной структуры развитой турбулентности. Предприняты также попытки численных исследований таких течений [6–10] при относительно небольших числах Рейнольдса  $Re = Uh/\nu$ , основанных на высоте препятствия  $h$  и постоянной скорости потока  $U$  на входе. В последние годы в научном сообществе появилась возможность использования открытых пакетов вычислительной аэрогидродинамики, реализующих методы спектральных элементов (напр., Nek5000) и конечных объемов (напр., OpenFOAM). Пример разработки решателей на основе этих методов и их применения в двумерных нестационарных расчетах с внутренними волнами в линейно стратифицированной среде приведен в [11].

## **3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы**

Для решения уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска и диффузии скаляра (отклонения плотности) применяются методы прямого численного моделирования (DNS) и моделирования крупных вихрей (LES). Эти подходы позволяют получить как осредненные поля скорости и скаляра, как в методе, основанном на осредненных по Рейнольдсу уравнениях (RANS), так и детали мгновенных (отфильтрованных) полей, что существенно для выяснения механизмов возникновения и развития неустойчивости, итоговой структуры турбулентности и анализа спектральной информации. В LES-расчетах течений в атмосфере и водных средах важным является конструирование подходящих подсеточных моделей. В предварительных тестах [10] при  $1000 < Re (= Uh/\nu) < 10\,000$  и  $Pr = 1$  эффекты подсеточной и молекулярной вязкости были сопоставимыми. При большем числе  $Re$ , основанном на высоте препятствия  $h$  и скорости потока  $U$  на входе, подсеточная вязкость превалировала. С ростом  $Re$  или  $Pr$  роль подсеточной вязкости и диффузии становится все более важной, поскольку всё меньшая доля масштабов явно разрешается.

Для генерации внутренних волн препятствие с варьируемыми формой и размером вводится в поток с областью отрицательного вертикального градиента плотности, отвечающего устойчивой стратификации. Исходные распределения скорости и плотности, в частности, высота зоны устойчивой стратификации и профиль плотности в этой зоне, также

варьируются. Ввод в поток препятствия для генерации внутренних волн применен во многих работах [8] и служит хорошей моделью обтекания элемента топографии в атмосфере и водоеме. Для некоторой комбинации значений параметров задачи, волна опрокидывается и развивается неустойчивость, формируя зону интенсивного перемешивания с повышенной степенью турбулентности. Для минимизации длины области расчета и устранения возврата отраженных от границ области волн к месту обрушения (что искажает картину течения), применены абсорбирующие слои [8]. Для учета влияния шага сетки, длины и ширины области счета проведено тестирование результатов и получение независимого от сетки решения при сравнении локальных и интегральных характеристик, соответствующих расчетам на сетках различной разрешающей способности и в областях различного размера.

Полученные данные мгновенных (DNS) и отфильтрованных (LES) полей подвергнуты тщательному анализу сканированием векторных, скалярных величин – скорости, плотности, завихренности и других индикаторов вихревых структур в различных сечениях в различные моменты времени. Кроме визуализации векторов и изолиний в двумерном/трехмерном виде и построения одномерных профилей вдоль выделенных линий, проведено осреднение по размаху препятствия, и изучена эволюция распределений осредненных характеристик для двумерных (или квазидвумерных) препятствий с формой, не меняющейся в трансверсальном направлении (или с шириной много больше длины). При достижении квазистационарного состояния развитой турбулентности в области обрушения волн проведено осреднение по периоду квазистационарности. Проведен анализ пространственных и временных спектров поля скорости и плотности. В частности, для двумерных и квазидвумерных препятствий изучение трансверсальных спектров позволяет выявить основные моды вторичной неустойчивости на различных стадиях развития возмущений и перехода к турбулентности.

Для верификации данных моделирования использованы данные сопутствующих опытов на установках ИГиЛ СО РАН современными методами визуализации и измерений. Путем сканирования по физическим и геометрическим параметрам исследовано развитие неустойчивости и турбулентности при обрушении внутренних волн при различных числах  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Fr$ , размерах и форме препятствий, граничных условиях, начальных полях скорости и плотности. Это позволяет выявить и лучше понять особенности режимов обрушения волн, наблюдаемого в экспериментах и природных системах. Развитые подходы будут применимы при решении других актуальных задач аэрогидродинамики и теплопереноса.

### **Список литературы к разделам 1-3:**

1. Clark T.L., Hall W.D., Kerr R.M., et al. // *J. Atmos. Sci.* 2000. Vol. 57. P. 1105-1131.
2. Grubisic V., Lewis J.M. // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2004. Vol. 85. P. 1127-1142.
3. Castro I.P., Snyder W.H. // *J. Fluid Mech.* 1993. Vol. 255. P. 195–211.
4. Eiff O.F., Bonneton P. // *Phys. Fluids.* 2000. Vol.12. P. 1073–1086.
5. Eiff O., Huteau F., Tolu J. // *Dyn. Atmos. Oceans.* 2005. Vol. 40. P. 71–89.
6. Paisley M.F., Castro I.P. // *Dyn. Atmos. Oceans.* 1996. Vol. 23. P. 309–319.
7. Gheusi F., Stein J., Eiff O.F. // *J. Fluid Mech.* 2000. Vol. 410. P. 67–99.
8. Yakovenko S.N., Thomas T.G., Castro I.P. // *J. Fluid Mech.* 2011. Vol. 677. P. 103–133.
9. Yakovenko S.N., Thomas T.G., Castro I.P. // *J. Fluid Mech.* 2014. Vol. 760. P. 466–493.
10. Yakovenko S.N. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. Vol. 894. # 012112.
11. Брузе К., Докуа Е., Ерманюк Е. и др. // *Труды ИСП РАН.* 2014. Т. 26, вып. 5. С. 117–141.

#### 4. Полученные результаты:

Рассмотрены два тестовых случая для потока с устойчивой стратификацией и постоянной скоростью  $U$  в гидродинамическом канале глубины  $D$  с препятствием высоты  $h$ , занимающим всю ширину канала  $W$  ( $> D > h$ ):

(а) течение с постоянным отрицательным вертикальным градиентом плотности (который варьировался), обусловленным ростом солености воды с глубиной, и двумерным препятствием в виде тонкого вертикального барьера, как и в [12], при  $Re = Uh/\nu = 100$ ;

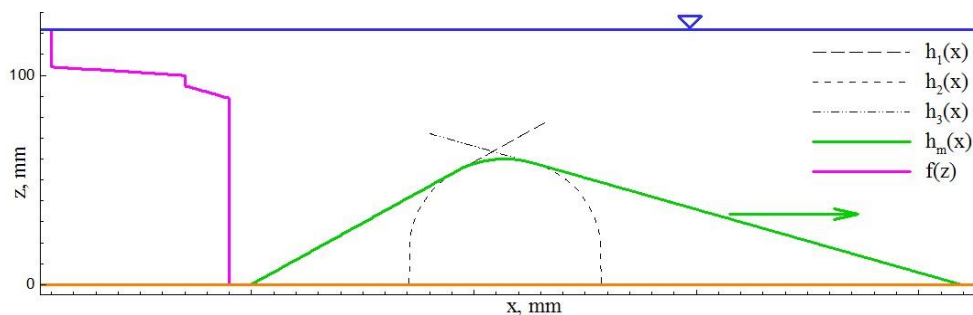
(б) многослойное течение с пикноклином, где плотность меняется скачком за счет роста концентрации раствора сахара в воде с глубиной, и квазидвумерным препятствием треугольной формы со сглаженной вершиной (рис. 1), в условиях опыта в ИГиЛ СО РАН.

Тест (а) выбран для проверки алгоритмов сначала в двумерных расчетах при сравнении с данными предшественников. Случай (б) взят для комплексного физического и численного моделирования трехмерного обтекания асимметричного тела. Приведем полученные благодаря ресурсам ИВЦ НГУ результаты для случая (б) более сложной геометрии течения.

После начала буксировки тела ( $t > 0$ ), препятствие движется с постоянной скоростью  $u = u_0$  по покоящейся среде с неподвижными стенками и дном. Не учитывается ускорение при разгоне препятствия в предположении импульсного ввода препятствия. На свободной поверхности пренебрегается вертикальным движением и задается нулевое касательное напряжение,  $\partial u/\partial z = 0$  при  $z = L_z = D$ . Отражение внутренних волн от границ канала не зафиксировано в опытах, поэтому выбираем расчетную область с вертикальными стенками, расположенными на расстоянии  $x_0$  и  $L - x_0$  от левой кромки препятствия в момент  $t = 0$ .

Результаты вычислений в центральной плоскости канала (рис. 2) в моменты времени, близкие к экспериментальным аналогам, показывают схожую картину эволюции течения, полученную на основе физического и численного моделирования. Сначала наблюдается рост амплитуды и опрокидывание волны при  $t^* \approx 2,5$ , что порождает область рециркуляции из двух ламинарных противонаправленных вихрей при  $t^* \approx 3$ . Затем (при  $t^* \approx 4$ ) эта область распадается на большее число вихрей и трансформируется далее в турбулентное пятно размером, значительно бóльшим толщины пикноклина. Отметим, что вычисленное поведение позволяет детально разрешить картину развития возмущений в трансверсальном направлении  $y$  (рис. 3), т.е. комплексное экспериментальное и численное исследование способно дать информацию о тонкой структуре протекающих процессов перемешивания в стратифицированном течении с элементами топографии.

#### 5. Иллюстрации, визуализация результатов.



**Рис. 1.** Схема расчета с пикноклином и треугольным препятствием при  $Re = hU/\nu \approx 783$ ,  $Sc = \nu/d \approx 2000$ ,  $Fr = U/(Nh^*) \approx 0,19$ , где  $N^2 \approx g(\rho_3 - \rho_1)/(\rho_3 h^*) = \sigma_1/h^*$ ,  $h^* = h_2 + 0.5 \times (\delta_1 + \delta_2)$ ,  $f(z, t = 0)$  и  $h_m(x)$  – распределения скаляра (отклонения плотности) и высоты препятствия.

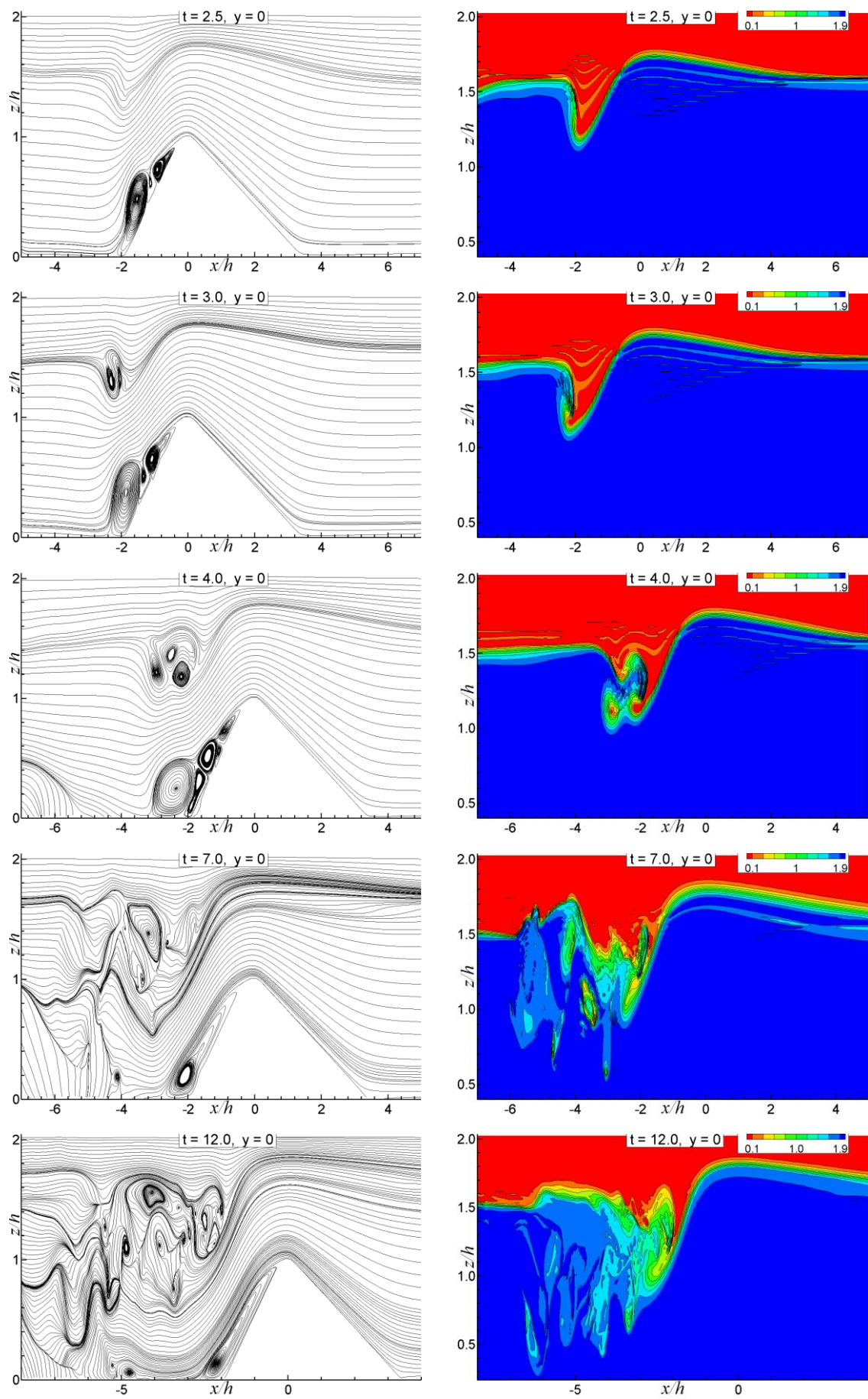


Рис. 2. Результаты расчетов при  $y = 0$ : слева – линии тока, справа – изолинии скаляра  $\sigma(x,z)$ .



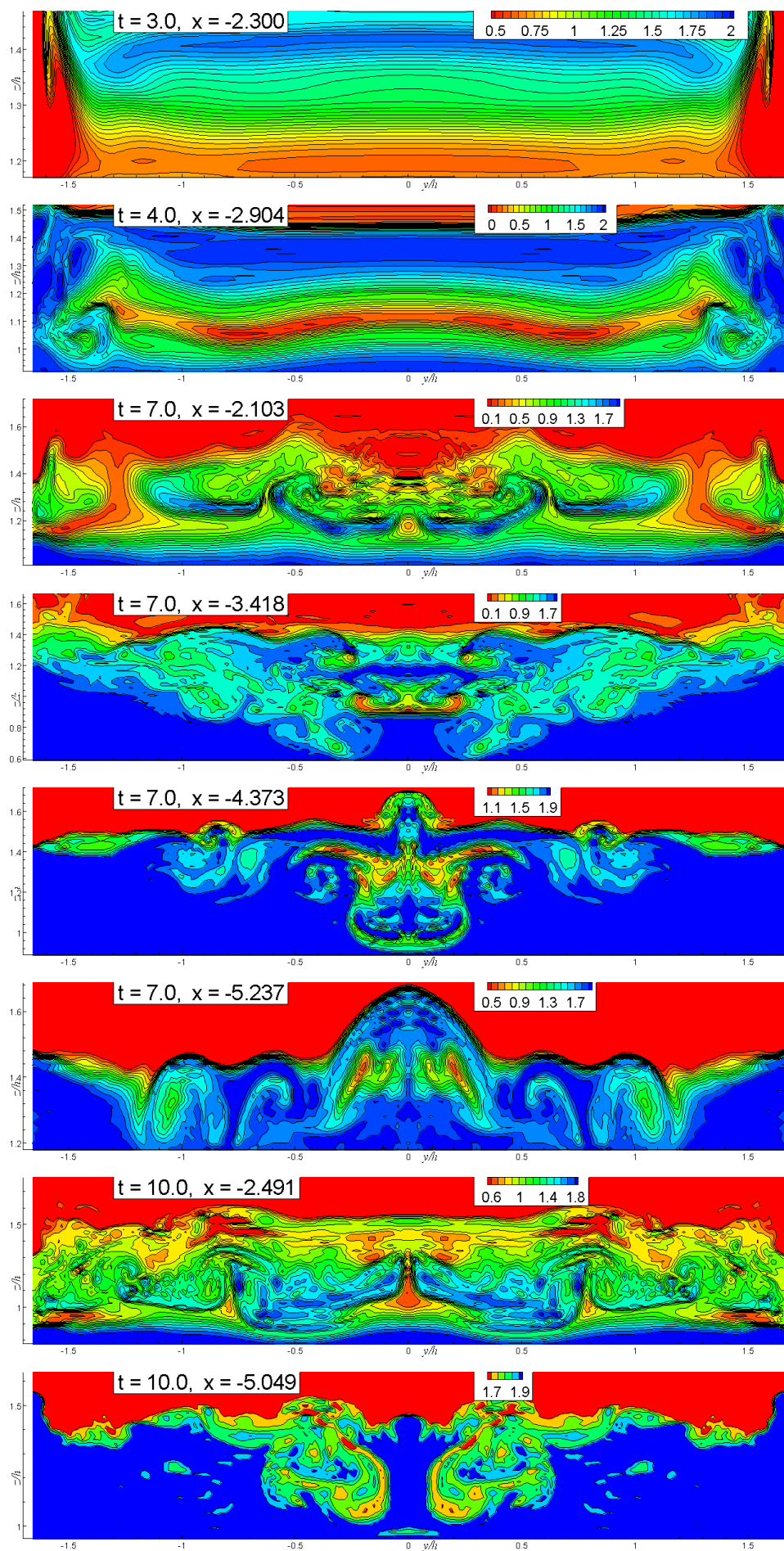


Рис. 3. Результаты вычислений  $\sigma(y, z)$  в сечениях  $x = \text{const}$  (вдоль размаха препятствия).

## **Эффект от использования кластера в достижении целей работы.**

Вычислительные ресурсы ИВЦ позволили выполнить высокопроизводительные расчеты (на мелких сетках с сотнями миллионов ячеек) при решении трехмерных нестационарных уравнений движения для описания полей скорости, давления, плотности при больших числах Рейнольдса для сложной геометрии обтекаемых поверхностей в актуальных задачах аэрогидродинамики.

## **Перечень публикаций, содержащих результаты работы.**

1. Yakovenko S.N., Chang K.C. Computational studies of near-wall behaviors of low-Reynolds-lumber Reynolds-stress models // AIAA Journal. 2019. Vol. 57, No. 1. P. 279-296.

doi: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.J057079>

Импакт-фактор журнала JCR 2019 = 2.108

2. Yakovenko S.N. Unsteady numerical solutions for a plane jet flowing from a narrow slit into the submerged space // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. Vol. 26, No. 5. P. 711-721.

doi: <https://doi.org/10.1134/S0869864319050081>

Импакт-фактор журнала JCR 2019 = 0.423

3. Evtushok G.Yu., Boiko A.V., Yakovenko S.N. Development of the algorithm to model stratified flows in the presence of obstacles, and its verification for a flow with a vertical barrier // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2019. Vol. 60, No. 6. P. 1046-1053.

doi: <https://doi.org/10.1134/S0021894419060099>

Импакт-фактор журнала JCR 2019 = 0.649