

НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ ОБТЕКАНИЯ ПОГРУЖЕННОГО ТЕЛА ДЛЯ УСЛОВИЙ БАРЕНЦЕВА МОРЯ.

Родионов А.А.¹, Гордеева С.М.^{1,2}, Сафрай А.С.¹

¹ – Санкт-Петербургский филиал Института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Санкт-Петербург, Россия, safr7@yandex.ru

² – Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, Санкт-Петербург, Россия, smgordeeva@yandex.ru

Аннотация. Приводятся оценки характеристик нестационарности поля обтекания эллипсоида вращения, вихре-волнового взаимодействия и эволюции внутренних волн, полученные в результате численных экспериментов с трёхмерной негидростатической моделью «вода–воздух».

Ключевые слова: численное моделирование, внутренние волны.

В работе представлены результаты численного исследования обтекания эллипсоида вращения с удлинением 1:6 в стратифицированной среде. Эксперименты проводились для числа Фруда 0,098 ($Fr^2 = U^2/(gL)$, где U – скорость набегающего потока, g – ускорение силы тяжести, L – горизонтальный размер тела). Размеры области: длина бассейна $11L$, ширина $\pm L$, высота $1.9L$, глубина от свободной поверхности воды $1.8L$. Ось эллипсоида располагалась на горизонте $0.5L$ от свободной поверхности воды и на расстоянии $\pm L$ от боковых граней; центр тяжести эллипсоида – на расстоянии $2L$ от торцевой грани со стороны набегающего потока.

В качестве инструмента исследования использовалась численная 3-хмерная негидростатическая конечно-элементная модель вода-воздух с осреднением методом крупных вихрей (Large Eddy simulation, LES) и замыканием на основе моделей добавочной вязкости Смагоринского [1,2]. Для лучшего описания взаимодействия гидродинамических возмущений в глубине и на свободной поверхности использовался алгоритм метода конечных объёмов (Volume Of Fluid, VOF). Для решения системы дифференциальных уравнений используется полунявный проекционный метод. Аппроксимация производных имеет второй порядок точности. Система линейных алгебраических уравнений решается методом сопряженных градиентов. Для повышения эффективности расчетов используется алгоритм распределенных вычислений, основанный на декомпозиции по подобластям и декомпозиции аппроксимирующих матриц. Для моделирования сформирована неструктурированная сетка в конечных элементах-тетраэдрах размером 5.5 млн. конечных элементов (940 тыс. точек).

В качестве начальных условий по всему объему задавались: стратификация, характерная для августа Баренцева моря: средний градиент плотности $0,14 \text{ кг/м}^4$ в слое $0,03L - 0,2L$; максимальный - $0,18 \text{ кг/м}^4$ в слое $0,12-0,15L$, и продольная составляющая скорости U . Граничные условия: нижняя и боковые границы открыты; на верхней границе объема задается давление; на входной границе – форсинг (составляющие скорости $U = \text{const}$, $V = W = 0,0$, начальная стратификация); на выходной границе фиксирована только составляющая скорости U , остальные параметры свободны. На поверхности тела – условие прилипания.

Анализировались поля температуры воды. Исследования результатов численных экспериментов проводились с использованием вейвлет-анализа, позволившего наиболее полно и в то же время компактно описать временную эволюцию решения [3]. В работе использовался комплект программ Торренса и Компо (находятся в свободном доступе на сайте <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>). Вейвлет-разложению с

вейвлетом Морле подвергались временные ряды температуры воды от 13 до 165 модельных секунд в отдельных точках расчетной области. Также рассматривались пространственные ряды температуры воды на последовательные моменты времени равной дискретности. Рассчитываемый интегральный вейвлет-спектр на каждом из 90 временных шагов от 13 до 172 модельных секунд (м.с.) представлялся в виде поля распределения дисперсии колебаний температуры воды на разных масштабах во времени.

Проведенный вейвлет-анализ временной изменчивости температуры воды в ряде точек пространства в окрестности погруженного тела показал, что в поле обтекания проявляются эффекты нестационарности, связанные с вихреволновым взаимодействием. Что явствует из сравнения интегрального по времени вейвлет-спектра со спектрами в отдельные моменты времени эксперимента в точках, выбранных в окрестности тела на удалении $0,1 - 0,5L$. Во всех выбранных точках существует значительная нестационарность частотной структуры поля температуры воды во времени, выраженная в смещении пиков мгновенного спектра относительно пиков интегрального спектра, причём характер этих смещений различен в разных точках.

Ещё одним доказательством нестационарности процесса обтекания служат картины временной изменчивости пространственного интегрального вейвлет-спектра для температуры воды поперек области на срезе на расстоянии $0.25L$ от вершины эллипсоида на горизонте $0.1L$ над телом, а также на горизонте $0.1L$ под телом. Над телом обращает на себя внимание практически постоянное присутствие максимума на масштабах $2.6L$. Вторая группа возмущений эволюционирует от $1.5L$ в начале эксперимента до $1.0L$ к его окончанию. Наконец, постоянно присутствуют $0.5L$ -возмущения. Обращает на себя внимание и то, что каждые 15-25 м.с. происходит перестройка поля пространственных масштабов, т.е. периоды времени, когда происходит переток энергии от больших масштабов к коротким ($2.5-22$, $60-73$, $95-110$ м.с.), сменяются периодами, когда поток энергии противоположен. Внутри каждого из этих периодов времени существование групп возмущений тоже периодически с периодами 2.5-5 м.с.. Под телом картина эволюции спектра схожа, но перестройка осуществляется менее регулярно. Возмущения длиной $0.5L$ существуют постоянно. Слабее, в основном в начале эксперимента, выражены $1L$ -возмущения

Для эволюции вейвлет-спектра вдоль оси эллипсоида чередование районов с потоками энергии разных направлений проявляется ещё сильнее, и происходят с периодом 70-80 м.с., что также соответствует периодам, выявленным на временных спектрах. В области за эллипсоидом (сбоку от оси на $0.1L$) на высоте $0.1L$ над его осью выявляются две выраженные системы возмущений: с длиной порядка $1.5L$ и $2.2-2.5L$, $1.5L$ -возмущения усиливаются каждые 10-12 м.с., а длиной $2.2L$ – через 10-15 м.с. Эволюция вейвлет-спектра на оси эллипсоида похожа на рассмотренную выше. Хорошо выделяются периоды времени с перекачкой энергии от малых возмущений к крупным и разрушения крупнейших возмущений. Период самой крупной волны составляет 70-80 м.с.

Литература

1. Сафрай А. С., Ткаченко И. В. Численное моделирование гравитационных течений жидкости в наклонном канале // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2009. № 1. С.21-30.
2. Сафрай А. С., Ткаченко И. В. Трехмерная негидростатическая модель вода-воздух. Численный эксперимент // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6. № 1.
3. Сафрай А. С., Ткаченко И. В., Гордеева С. М. Об эволюции одиночной внутренней волны в канале. Численные эксперименты // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 1.

NON-STATIONARITY OF THE FLOW AROUND SUBMERGED BODY (BARENTS SEA).

Rodionov A.A.,¹, Gordeeva S.M.^{1,2}, Safray A.S.¹

¹ – *SPb Branch of P.P.Shirshov Inst. of Oceanology, St. Petersburg, Russia, safr7@yandex.ru*

² – *State Hydrometeorological Univ., St. Petersburg, Russia, smgordeeva@yandex.ru*

Abstract. Estimations of the characteristics of non-stationarity of the field of flow around an ellipsoid of rotation, eddy-wave interaction and internal waves evolution, obtained as a result of numerical experiments with a three-dimensional non-hydrostatic model of the system “water – air”.

Key words: numerical modelling, internal waves.