

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ И ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛЕДЯНОГО КИЛЯ

Е.В. Мортиков

Одним из параметров, необходимых для моделирования динамики морского льда в мезомасштабных моделях Арктики, является коэффициент сопротивления для действия ветра и морского течения. По данным наблюдений [1,2] подводная часть ледяного покрова имеет достаточно сложную структуру. Характерная черта поверхности – наличие ледяных килей, формирующихся при вертикальном смещении льда, высота (~5-30 м) которых сравнима с высотой пограничного слоя (~50 м) [3].

Современные параметризации [4], как правило, не учитывают эффекты стратификации и пренебрегают влиянием внутренних волн. Однако лабораторные эксперименты [5] показывают, что данные процессы существенно влияют на коэффициент сопротивления глубоких ледовых килей. Структура течения в пограничном слое также зависит от внутренних волн, а действие волн на возмущенное килем течение может изменять динамику формирования льда в зимний период за счет процессов турбулентного перемешивания [6]. При этом региональные модели Северного Ледовитого океана чувствительны к выбранной параметризации, так увеличение значения коэффициента сопротивления может приводить к более точным, относительно данных наблюдений, оценкам регулярного распределения толщины ледяного покрова [7,8].

В настоящей работе рассматривается влияние стратификации на сопротивление потока жидкости движению ледяного киля. Основное внимание уделяется воспроизведению условий по числу Фруда при дрейфе льда. В качестве стратифицированной жидкости рассматривается двухслойная система. Несмотря на то, что такой подход не позволяет воспроизвести все существенные для данной задачи волновые процессы, он представляет удобный способ классификации влияния потока на коэффициент сопротивления.

Для описания динамики жидкости используются модели, основанные на системе уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска: прямое численное моделирование (DNS, direct numerical simulation) и численное моделирование, основанное на методе крупных вихрей (LES, large eddy simulation; ILES, implicit large eddy simulation) [9]

Прямое численное моделирование предполагает явное описание всего диапазона пространственных и временных масштабов течения, что требует значительных вычислительных ресурсов.

Основная идея метода крупных вихрей состоит в воспроизведении наиболее крупных и статистически значимых вихрей и параметризации энергетических процессов, связанных с подсеточным масштабом. Такой подход позволяет снизить требование к пространственному разрешению, однако эффективность данной методики зависит от способа параметризации и выбора пристеночной модели.

Для пространственной аппроксимации используется метод конечных разностей на прямоугольной сетке с неравномерным шагом, а для аппроксимации криволинейных границ на несогласованной с геометрией области сетке используется метод погруженной границы [10]. Влияние криволинейных границ учитывается при численном решении задачи на основе известных полей скорости и заданных краевых условий [11,12]. Метод погруженной границы не зависит от конкретной геометрии области и не требует разработки сложных алгоритмов покрытия области криволинейными сетками, что делает его более привлекательным для реализации на параллельных вычислительных системах и численного решения гидродинамических задач в областях с подвижными границами.

Параметры среды, конфигурация вычислительной области и геометрия модели ледяного киля выбирались на основе лабораторных экспериментов [5]. Число Фруда можно определить следующим образом:

$$F_0 = \frac{U_0}{c_0} \quad (1)$$

где U_0 – скорость потока вверх по течению,

$$c_0^2 = g' h_0$$

- фазовая скорость. Характеристическая глубина h_0 и приведенное ускорение свободного падения g' задаются с помощью глубины невозмущенного верхнего и нижнего слоя d_1 и d_2 с плотностями ρ_1 и ρ_2 соответственно:

$h_0 = \frac{d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}$	(2)
$g' = g(\rho_2 - \rho_1) / \rho_0$	(3)

где ρ_0 – характеристическая плотность. Рассматриваются значения числа Фруда из интервала:

$$0.1 \leq F_0 \leq 1.7$$

что соответствует скоростям U_0 от 1 см/с до 24 см/с. Профили моделей ледяных килей определяются как функции вида:

$Z(x) = \frac{HB^2}{B^2 + x^2} - C$	(4)
-------------------------------------	-----

где H, B, C - константы.

Реализация численной модели основана на технологии программирования CUDA и использовании функций библиотеки MPI для декомпозиции вычислительной области между графическими процессорами [12,13]. Вычисления проводились на суперкомпьютере МГУ “ГрафИТ!/GraphIT!” на основе графических процессоров (Nvidia “Fermi” Tesla M2050).

Результаты численных расчетов показывают возможность достоверного воспроизведения коэффициента лобового сопротивления при движении с постоянной скоростью различных моделей килей в двухслойной жидкости. Структура течения, полученная при численном моделировании в целом согласуется с данными лабораторных экспериментов [5]. Сила сопротивления в двухслойной жидкости следует следующей зависимости от скорости движения ледяного кия: резкое увеличение при скорости, соответствующей числу Фруда $F_0 \approx 0.1$, локальный максимум при $F_0 \approx 0.5$, следующий за ним минимум, и дальнейшее монотонное увеличение при сверхкритических условиях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Williams E., Swithinbank C., Robin G. De Q. A submarine sonar study of Arctic pack ice // J. Glaciol. 1975. V. 15, N 73. P. 349-362.
2. Wadhams P. Sea ice thickness distribution in Fram Strait // Nature. 1983. V. 305, N 5930. P. 108-111.
3. Lepparanta M. The drift of sea ice. Berlin: Springer, 2005.
4. Lu P., Li Z., Cheng B., Lepparanta M. A parameterization of the ice-ocean drag coefficient // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, N C7. P. 19-33.
5. Pite H.D., Topham D.R., van Hardenberg B.J. Laboratory measurements of the drag force on a family of two-dimensional ice keel models in a two-layer flow // J. Phys. Oceanogr. 1995. V. 25, N 12. P. 3008-3031.
6. Skyllingstad E.D., Paulson C.A., Pegau W.S., McPhee M.G., Stanton T. Effects of keels on ice bottom turbulence exchange // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N C12. P. 3372-3387.
7. Яковлев Н.Г. Моделирование климата океана и морского льда Северного Ледовитого океана с помощью конечно-элементной модели FEMAO: к вопросу о понимании роли различных физических процессов в формировании наблюдаемого состояния и воспроизведении их в моделях глобального климата // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). С. 17-26.

8. Yakovlev N. The new ice-ocean drag parametrization and its impact on the Arctic Ocean ice evolution simulation // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2009. V. 11. P. 6582.
9. Sagaut P. Large eddy simulation for incompressible flows. An Introduction. Third Edition. Berlin: Springer, 2006.
10. Mittal R., Iaccarino G. Immersed boundary methods // Annu. Rev. Fluid Mech. 2005. V. 37. P. 239-261
11. Su S.-W., Lai M.-C., Lin C.-A. An immersed boundary technique for simulating complex flows with rigid boundary // Computers and Fluids. 2007. V. 36. P. 313 - 324.
12. Мортиков Е.В. Применение графических процессоров для численного моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости в областях сложной конфигурации методом погруженной границы // Вычислительные методы и программирование. 2012. Т 13, № 1. С. 177-191.
13. Мортиков Е.В. Численное моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в областях сложной конфигурации с помощью метода погруженной границы на графических процессорах // Научный сервис в сети Интернет: экзафлопсное будущее: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (19-24 сентября 2011 г., г. Новороссийск). М.: Изд-во МГУ, 2011. с. 625-627.