«Облачные вычисления: образование, исследования, разработки», Москва, 4-5 декабря 2014

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРЕNFOAM

> Димитриева Н. Ф., Загуменный Я. В. ИГМ НАНУ, ИПМех РАН

> > dimitrieva@list.ru







Течения, индуцированные диффузией на топографии в окружающей среде

(горные и долинные ветры в атмосфере с температурной стратификацией, плотностные течения в океане, самодвижение тел нейтральной плавучести, перераспределение примесей, формирование тонкой структуры среды)



Экспериментальные исследования (Лаборатория механики жидкостей, ИПМех РАН)

Система уравнений движения непрерывно стратифицированной среды:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_{00}}\nabla P + \nu\Delta\mathbf{v} - s\mathbf{g} \qquad \text{div } \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{s} = k_s \Delta \mathbf{s} + \frac{v_y}{\Lambda} \qquad \qquad \rho = \rho_{00} (\exp(-y/\Lambda) + s)$$

Начальные и граничные условия:

$$\mathbf{v}_{x,s}\Big|_{t\leq 0} = 0, \qquad v_{x,y}\Big|_{\Sigma} = 0, \qquad \left[\frac{\partial S}{\partial n}\right]\Big|_{\Sigma} = -\frac{1}{\Lambda}\frac{\partial y}{\partial n} + \left[\frac{\partial s}{\partial n}\right]\Big|_{\Sigma} = 0, \qquad \mathbf{v}_{x,y\to\infty} = 0$$

Масштабы задачи:

• Время: $T_b = 2\pi/N$ $(N = \sqrt{g/\Lambda}).$

• Длина:
$$\Lambda = (d \ln \rho_0 / dy)^{-1}$$
, L , $\delta_N^{\nu} = \sqrt{\nu/N}$, $\delta_N^{\kappa_s} = \sqrt{k_s/N}$.

• Скорость: $\delta_N^{\nu} = \sqrt{\nu/N}, \ \delta_N^{\kappa_s} = \sqrt{k_s/N}.$

v – скорость, P – давление, ρ - плотность, s – возмущение солености, κ_s – коэффициент диффузии, ν – коэффициент кинематической вязкости

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Open **V**FOAM







 /system/funkySetBoundaryDict 		 /system/fvSolution 		
o /system/fvScl	nemes	р	solver Pepperson preconditioner	CG; r DIC;
ddtSchemes default	backward;	U	solver Pl preconditioner	BiCG; r DILU;
gradSchemes	default Gauss linear;			
grad(p)	Gauss linear;	S	solver B preconditioner	ICCG; r DILU;
divSchemes default none;			I	,
div(phi,U	Gauss limitedLinearV 1;			
div(phi,S) Gauss limitedLinear 1;	PISO		
div(U)	Gauss limitedLinearV 1;			
laplacianSchemes		o /syste	em/decompos	seParDict
default	none;			
laplacian(nu,U) Gauss linear corrected;		o /system/funkySetFieldsDict		
laplacian(ks,S) Gauss linear corrected;		-	-	
laplacian((1 A(U)),p) Gauss linear corrected;		 /system/sampleDict 		







* Параллельные расчеты :



* Визуализация результатов:





Сравнение расчетных и экспериментальных данных течений, индуцированных диффузией



диск





наклонная пластина









Течение, индуцированное диффузией на пластине



Линии тока





Поле давления



(L=10cm, h=0.5cm, N=1.26s⁻¹, φ=10°)

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

движения пластины в стратифицированной жидкости





U = 0.1 cm/c



U = 0.32 cm/c

ДВИЖЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ



Вертикальная компонента скорости (L = 10 см, h = 0.5 см, U = 0.5 см/с):



Вертикальная компонента скорости (L = 10 см, h = 0.5 см, N = 1.0 с⁻¹):

ДВИЖЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

Толстая пластина

Тонкая пластина



h = 0.5 cm h = 0.05 cm

Временная эволюция поля завихренности (L = 10 см, N = 1.2 с⁻¹, Re = 8·10⁴)

Экспериментальные исследования течений, индуцированных диффузией на клине



Allshouse M. R., Barad M. F., Peacock T. Propulsion generated by diffusion-driven flow // Nature Physics. -2010. - 6. P. 516–519.

http://www.nature.com/nphys/journal/v6/n7/abs/nphys1686.html

РАСЧЕТНАЯ СЕТКА



topoSet refineMesh

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ



Возмущение солености







Течение, индуцированное диффузией на симметрично искривленном клиновидном препятствии



Поле давления

L = 10 см, h = 2 см, N = 1.0 с⁻¹

выводы

- Предложена методика численного моделирования течений непрерывно стратифицированных жидкостей на основе открытого пакета OpenFOAM.
- Вычисления, проведенные с использованием суперкомпьютерных систем, показали хорошую работоспособность предложенной модели в широком диапазоне изменения параметров задачи.
- Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает хорошее качественное согласие для стратифицированных течений около неподвижных и движущейся препятствий.
- Результаты расчета течений, индуцированных на клине, выявили области дефицита давления вблизи острой вершины, которые объясняют возникновение силы, приводящей к самодвижению клина вдоль горизонта нейтральной плавучести. Эффект самодвижения зависит от соотношения сторон клиновидного препятствия и кривизны поверхностей.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

- *Чашечкин Ю. Д.* Дифференциальная механика жидкостей: наблюдения и расчеты структуры течений // Журнал проблем эволюции открытых систем. 2013. Т. 2, вып. 15. С. 20-36.
- Загуменный Я.В., Чашечкин Ю.Д. Тонкая структура нестационарного течения, индуцированного диффузией на неподвижной пластине // Известия РАН: Механика жидкости и газа. 2013. № 3. С. 100–117.
- *Чашечкин Ю.Д., Загуменный Я.В.* Расчет течений непрерывно стратифицированной жидкости с использованием открытых вычислительных пакетов на базе технологической платформы UniHUB // Труды ИСП РАН. 2013. Т. 24. С. 87–106.
- *Dimitrieva N.* Numerical solution of the problem of diffusion-driven flows on a wedge// Proceedings of 4th international conference "High Performance Computing". Kyiv. October 14, 2014. P. 23-26.
- Dimitrieva N. F., Zagumennyi Ia.V. Calculations of admixture transport around a horizontal plate in a continuously stratified fluid // Selected papers of international conference "Fluxes and structures in fluids". Moscow. 2014. P. 61 – 68.