

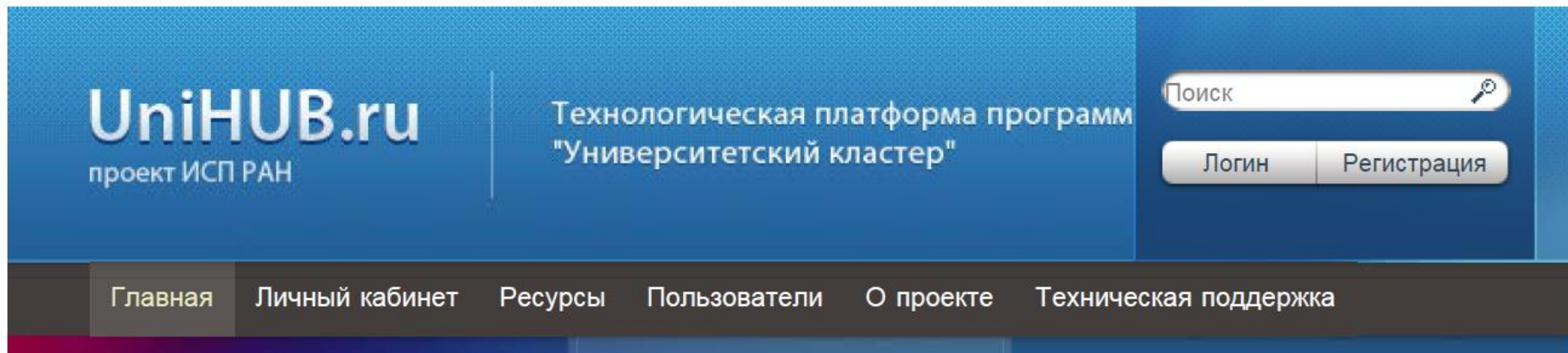
III Международная конференция
"Облачные вычисления: образование, исследования, разработки"
Москва, 06 – 07 декабря 2012

Использование технологической платформы UniHUB в расчетах тонкой структуры стратифицированных течений на базе открытых пакетов

[Загуменный Я.В.](#)

Институт проблем механики РАН, Москва
Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
e-mail: zagumennyi@gmail.com

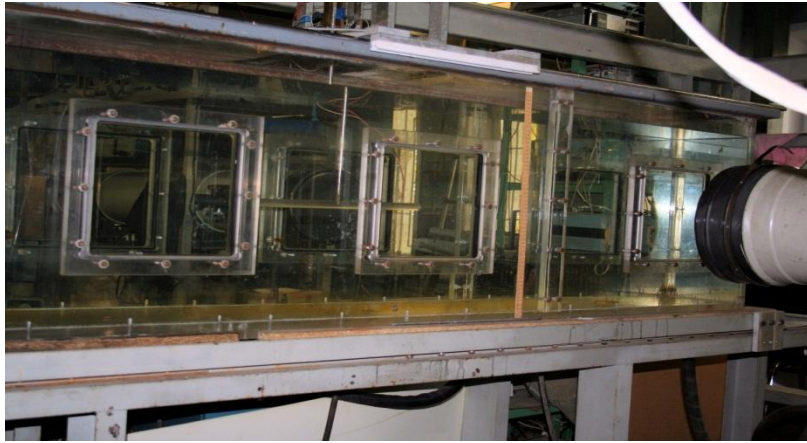




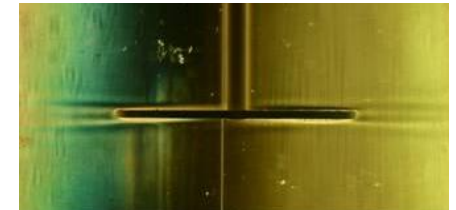
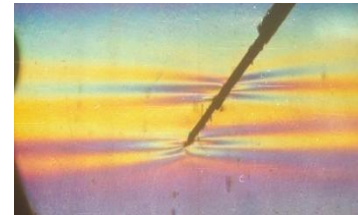
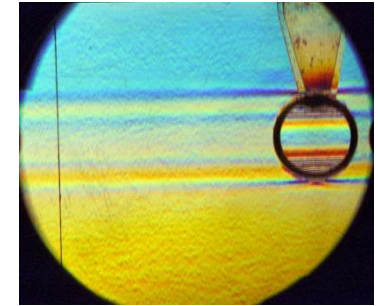
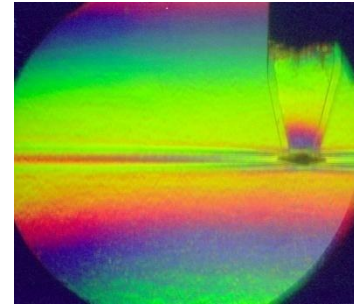
Технологическая платформа UniHUB позволяет:

- разворачивать различные предметно-ориентированные научно-образовательные Web лаборатории;
- решать задачи механики сплошной среды в рамках Web лаборатории UniCFD с помощью пакетов свободного программного обеспечения - SALOME, OpenFOAM, ParaView;
- использовать данные сервисы, развивая, модифицируя и подстраивая их под свои конкретные задачи;
- проводить расчеты задач в параллельном режиме непосредственно на вычислительных кластерах;
- обмениваться опытом внутри групп и техническом форуме платформы UniHUB (<http://ispn.ispras.ru/fudforum>);
- обучать и проходить обучение с помощью учебных курсов и обучающих материалов, добавлять новые приложения и материалы.

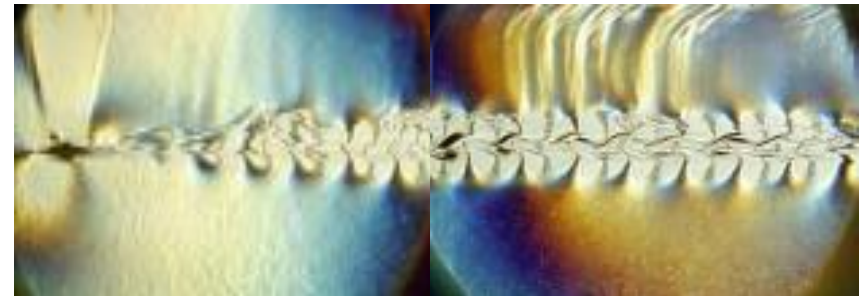
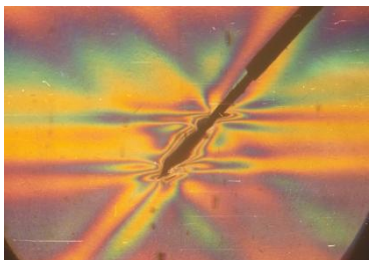
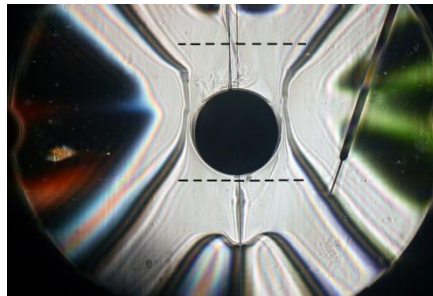
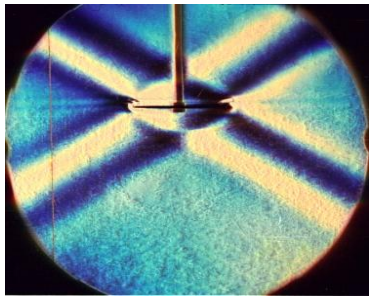
Теневая визуализация течений неоднородных жидкостей в лабораторных опытах



Опытный бассейн и теневой прибор
Лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН



Течения, индуцированные диффузией



Периодические осцилляции
и движение тел в стратифици-
рованных жидкостях

Система дифференциальных уравнений движения непрерывно стратифицированной жидкости

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_{00}} \nabla P + \nu \Delta \mathbf{v} - (s + s_0) \mathbf{g};$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s = \kappa_s \Delta s + \frac{v_z}{\Lambda};$$

$$\frac{\partial s_0}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s_0 = \kappa_{s_0} \Delta s_0;$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0; \quad \rho = \rho_{00} \left(1 - \frac{z}{\Lambda} + s + s_0 \right);$$

где \mathbf{v} – вектор скорости, P – давление, s – возмущение солёности, s_0 – концентрация пассивной примеси, ρ – плотность, κ_s, κ_{s_0} – коэффициенты диффузии соли и примеси, $\Lambda = |d \ln \rho / dz|^{-1}$ – масштаб стратификации,

$N_b = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}$ – частота и $T_b = 2\pi / N_b$ – период плавучести.

Начальные и граничные условия

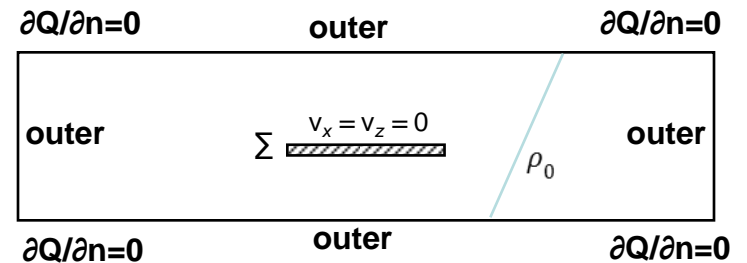
Течения, индуцированные прерыванием диффузионного потока на поверхности непроницаемого препятствия

$$\mathbf{v}, s, s_0|_{t \leq 0} = 0; \quad v_x|_{\Sigma} = v_z|_{\Sigma} = 0;$$

$$\left[\frac{\partial S}{\partial \mathbf{n}} \right]_{\Sigma} = \left[\frac{\partial s}{\partial \mathbf{n}} \right]_{\Sigma} - \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial z}{\partial n} = 0;$$

$$\left[\frac{\partial s_0}{\partial n} \right]_{\Sigma_0} = q_{s_0} \text{ или } s_0|_{\Sigma_0} = S_I;$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\text{outer}} = 0, \quad Q = \{ \mathbf{v}, s, s_0, P \}$$

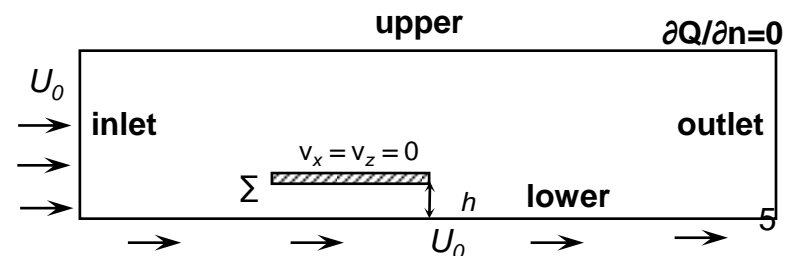


Обтекание препятствий потоком непрерывно стратифицированной вязкой несжимаемой жидкости

$$\mathbf{v}, s|_{t \leq 0} = 0; \quad v_x|_{\Sigma_{\text{lower}}} = v_z|_{\Sigma_{\text{lower}}} = 0; \quad v_x|_{\text{inlet lower}} = U_0; \quad \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\text{outlet upper}} = 0;$$

$$\left[\frac{\partial S}{\partial n} \right]_{\Sigma_{\text{lower}}} = \left[\frac{\partial s}{\partial n} \right]_{\Sigma_{\text{lower}}} - \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial z}{\partial n} = 0;$$

$$\left[\frac{\partial s_0}{\partial n} \right]_{\Sigma_0} = q_{s_0} \text{ или } s_0|_{\Sigma_0} = S_I;$$





OpenFOAM — свободно распространяемое программное обеспечение для проведения численных расчетов.

OpenFOAM — объектно-ориентированная платформа, реализованная на языке программирования C++.

OpenFOAM – перспективное и динамично развивающееся открытое программное обеспечение для моделирования задач механики сплошных сред. В его разработке и развитии принимают участие сотни организаций и тысячи разработчиков по всему миру.

OpenFOAM – обладает большой функциональностью и удовлетворяет всем основным требованиям, предъявляемым к современному программному обеспечению для расчета промышленных задач

Разработан в Imperial College of Science. London. UK. 1991-2003

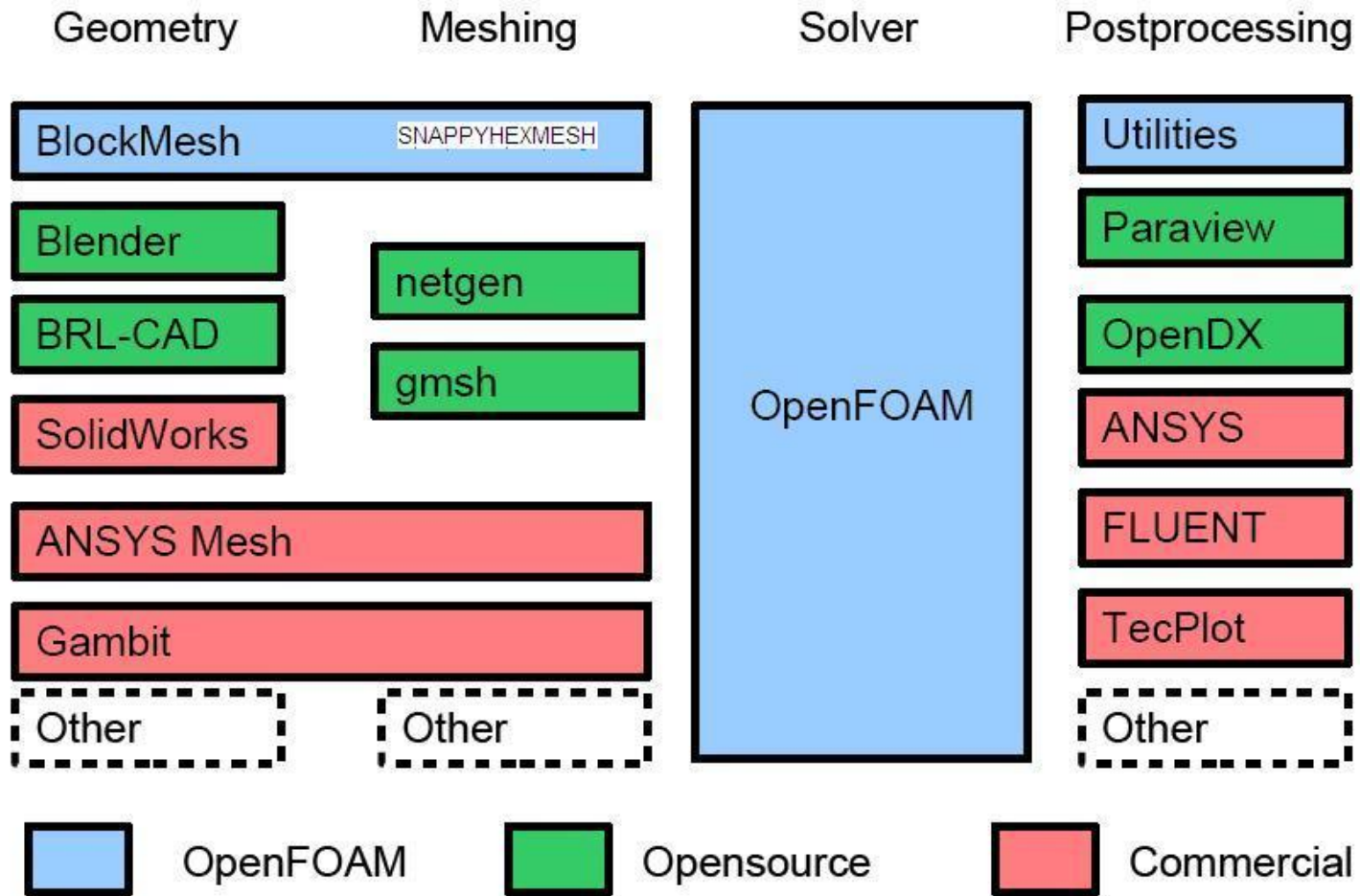
Открытие кода OpenFOAM в 2004 г. на условиях GPL

Входит в состав CAE Linux

Форум на www.cfd-online.com

Всего более 3000 пользователей в мире.

Основные этапы и модули при решении задач МСС





Основные возможности пакета OpenFoam

- Метод контрольного объема на базе многогранных ячеек с поддержкой подвижных сеток;
- URANS/LES/DNS моделирование;
- * SIMPLE/PISO/PIMPLE алгоритмы для связи уравнений скорости и давления;
- * Несжимаемые/сжимаемые и стационарные/нестационарные потоки ;
- * Однофазные, двухфазные и многофазные потоки;
- * Лагранжева модель для расчета движения частиц;
- * Модели турбулентности: k- ϵ , k- ω , k- ω SST, SA, LES, DES. Всего 15 моделей;
- * Модели теплообмена, испарения, горения, распыливания топлива;
- Различные термо-физические свойства среды, учет реальных свойств газов;
- Сопряженные задачи (жидкость – тело);
- Решение уравнений движения тела с 6 степенями свободы;
- Решение задач динамики разряженного газа;
- * Многоблочная сетка и декомпозиция расчетной области (Metis, Scotch);
- * Параллельная версия (до 2000 ядер), поддержка версий MPI. ;
- * Поддержка структурированной/неструктурированной сетки;
- * Импорт сеток из различных коммерческих и открытых пакетов.

Построение собственного решателя OpenFOAM для расчета стратифицированных течений

icoFoam.C → stratifiedFoam.C :

```
fvVectorMatrix UEqn  
(  
    fvm::ddt(U)  
    + fvm::div(phi, U)  
    - fvm::laplacian(nu, U)  
);
```



```
fvVectorMatrix UEqn  
(  
    fvm::ddt(U)  
    + uln*fvm::div(phi, U)  
    - fvm::laplacian(nu, U)  
    + (S+S0)*g  
);
```

// PISO loop //

+

```
fvScalarMatrix SEqn  
(  
    fvm::ddt(S)  
    + sln*fvm::div(phi, S)  
    - fvm::laplacian(ks, S)  
    - U.component(vector::Y)/lambda  
);  
SEqn.solve();
```

+

```
fvScalarMatrix S0Eqn  
(  
    fvm::ddt(S0)  
    + fvm::div(phi, S0)  
    - fvm::laplacian(ks0, S0)  
);  
S0Eqn.solve();
```

Добавление новых физических переменных

```
//total density
```

```
Ro = Ro0*(1.0-Y/lambda+S+S0);
```

```
//impulse
```

```
Imp = Ro * U;
```

```
//baroclinic vorticity generation rate
```

```
barc = -1.0/sqr(Ro0)*fvc::grad(p) ^ fvc::grad(Ro);
```

```
//energy dissipation rate
```

```
tensor Txx(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
```

```
tensor Tyy(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0);
```

```
tensor Txy(0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
```

```
tensor Tyx(0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0);
```

```
diss = 2.0*nu*(sqr(fvc::grad(U) && Txx) + sqr(fvc::grad(U) && Tyy) +  
0.5*sqr((fvc::grad(U) && Txy) + (fvc::grad(U) && Tyx)));
```

```
//density perturbation gradient
```

```
grads = Ro0*fvc::grad(S);
```

```
//passive substance concentration gradient
```

```
grads0 = fvc::grad(S0);
```

```
//etc
```

Компиляция кода

new variables



/createFields.H



wmake



stratifiedFoam

Solver

stratifiedFlow.C

EXE=\$(FOAM_USER_APPBIN)/stratifiedFlow



/Make/files

divSchemes

```
{ div(phi,S) Gauss upwind;  
  div(phi,S0) Gauss upwind }
```

laplacianSchemes

```
{ laplacian(ks,S) Gauss linear corrected;  
  laplacian(ks0,S0) Gauss linear corrected }
```



/system/fvSchemes

S

```
{ solver BICCG; preconditioner DILU;  
  tolerance 1e-06; relTol 0 }  
S0 { solver BICCG; preconditioner DILU;  
  tolerance 1e-06; relTol 0 }
```



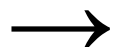
/system/fvSolution

Initial values for the declared variables



/0

```
Ro0 Ro0 [ 1 3 0 0 0 0 0 ] 1020.0;  
nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;  
ks ks [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.41e-9;  
ks0 ks0 [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-11;  
g g [ 0 1 -2 0 0 0 0 ] (0 9.8 0);  
Nb Nb [ 0 0 -1 0 0 0 0 ] 1.256;  
uIn uIn [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 1;  
sIn sIn [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 1;
```



/constant/transportProperties

Построение сетки и запуск задачи

blockMeshDict



blockMesh



/constant/polyMesh/boundary, faces,
neighbour, owner, points

blockMeshDict.m4



m4 blockMeshDict.m4 > blockMeshDict



blockMeshDict

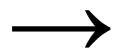
```
changecom(//)changequote([,])
define(calc, [esyscmd(perl -e 'printf ($1)'])]
define(alfa, 7)
define(pi, 3.14159265)
define(fi, calc(alfa*pi/180))
define(h, 15)
define(L, 10)
define(w, calc(L*cos(fi)+h*sin(fi)))
```

неоднородные граничные условия:
расширенная утилита **swak4Foam**

funkySetBoundaryDict



funkySetBoundaryFields



gradient nonuniform List<scalar>

декомпозиция области:

decomposeParDict



decomposePar



processor0...15

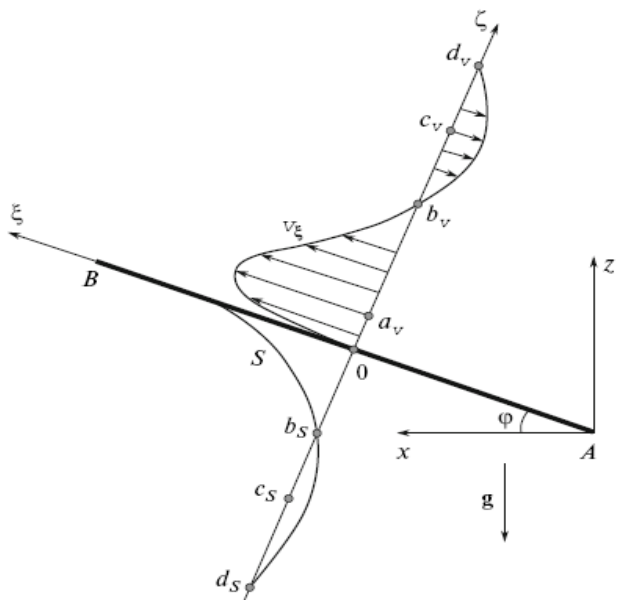
поставить задачу в очередь :

qsub job.sh

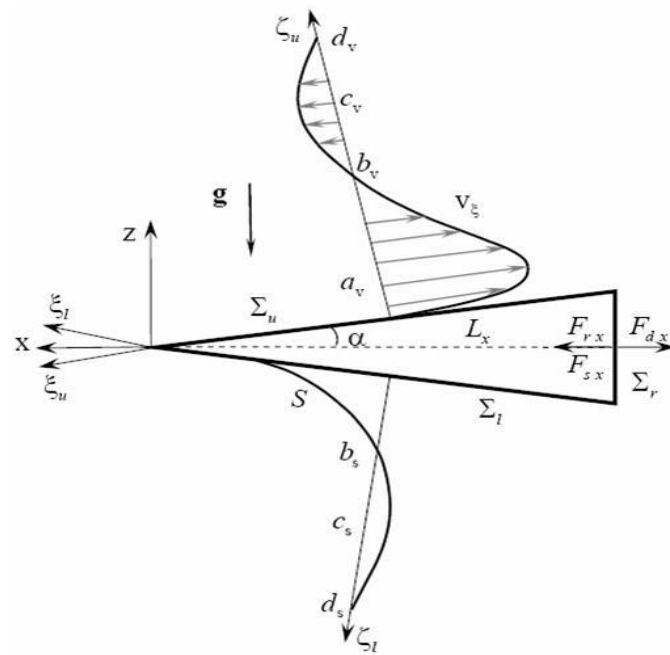
/job.sh :

```
#PBS -l walltime=24:00:00,nodes=2:ppn=8
cd $FOAM_RUN/tutorials/incompressible/stratifiedFlow/diffusion/cylinder
mpirun -np 16 -machinefile $PBS_NODEFILE $FOAM_USER_APPBIN/stratifiedFoam -parallel | tee -a log.std
```

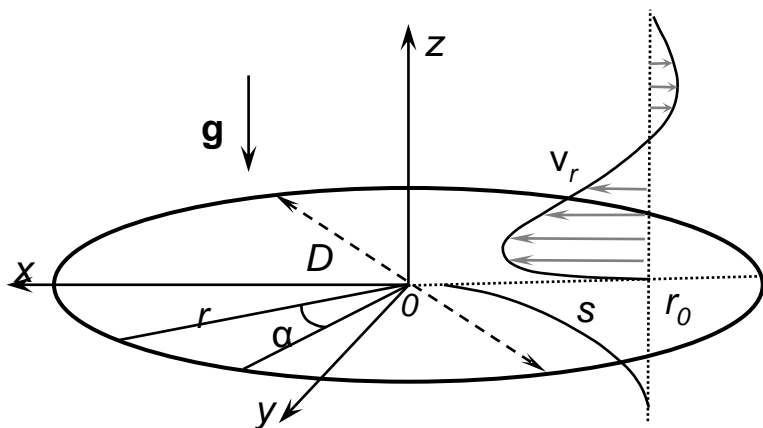
Тестирование решателя



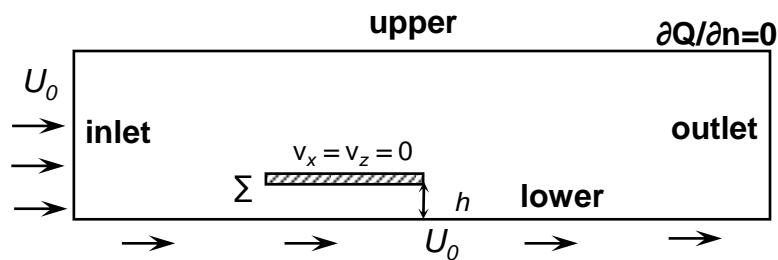
наклонная пластина



симметричный клин

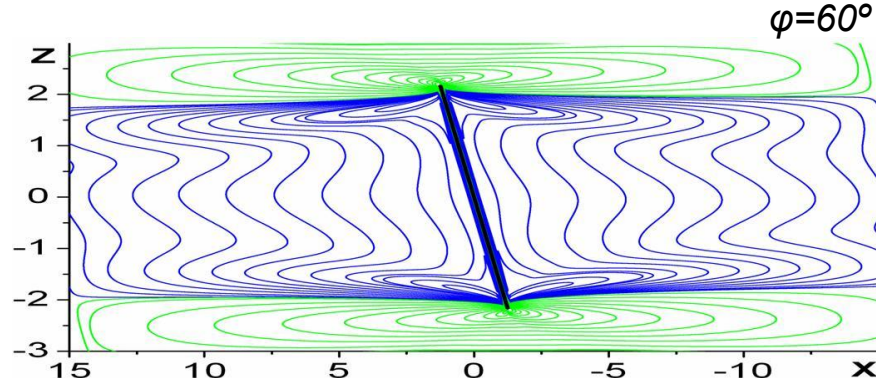
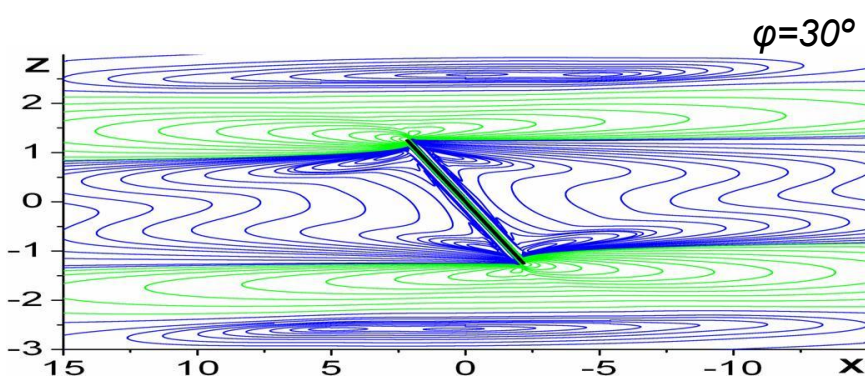
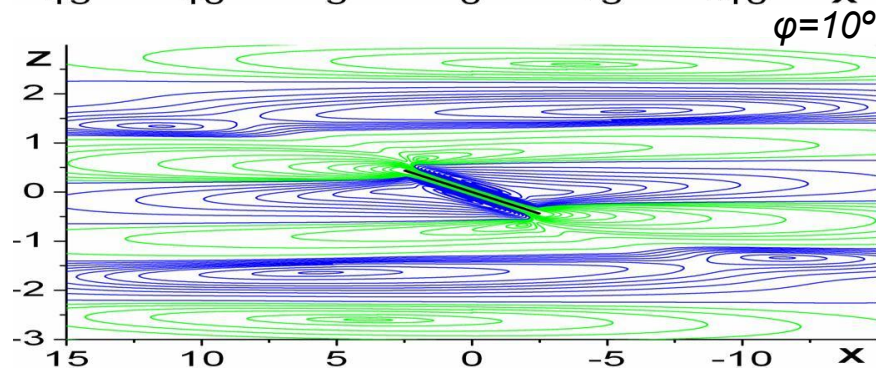
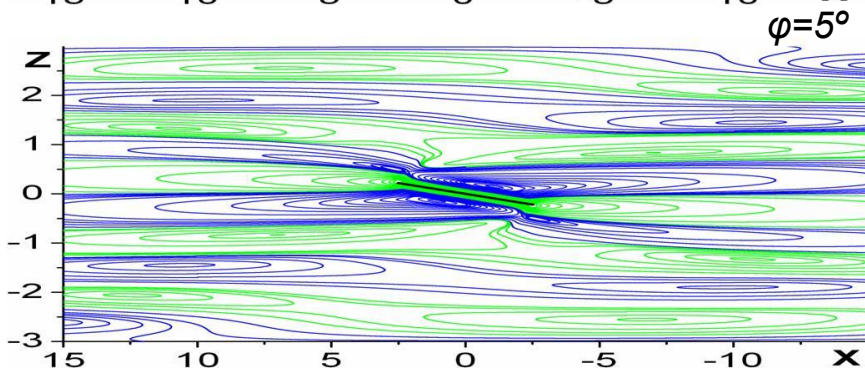
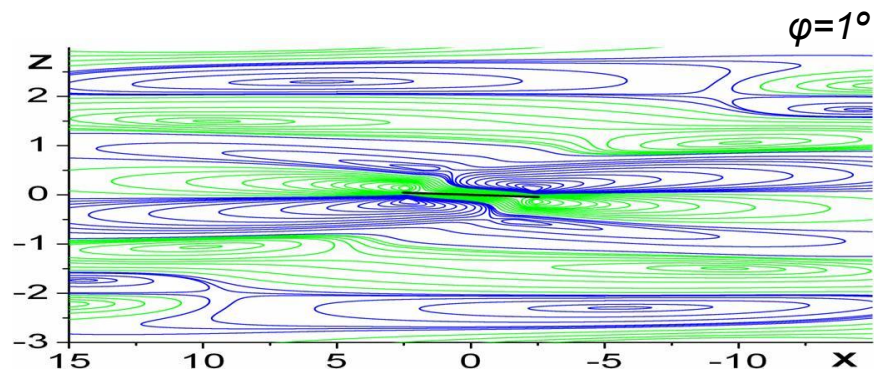
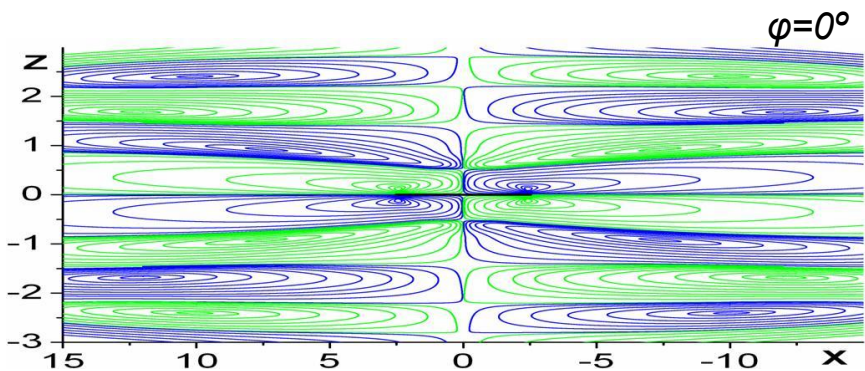


горизонтальный диск

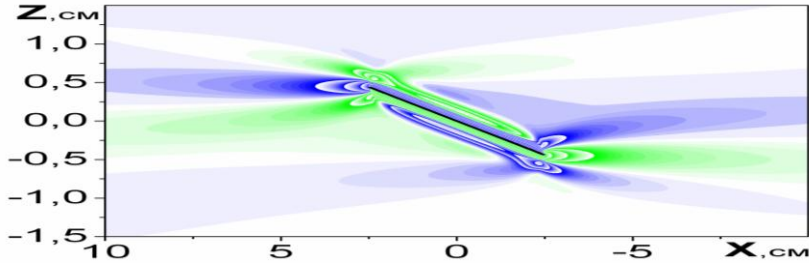


обтекание пластины

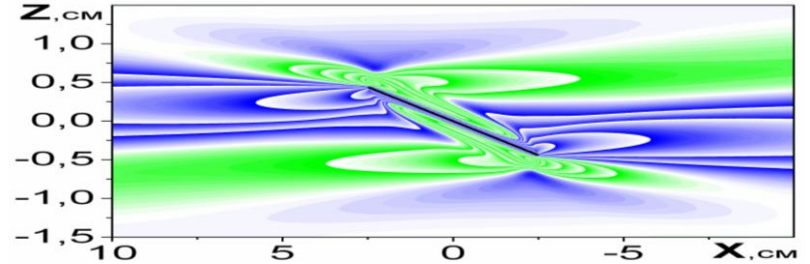
Структура стратифицированного течения, индуцированного прерыванием диффузионного переноса непроницаемой наклонной пластиной



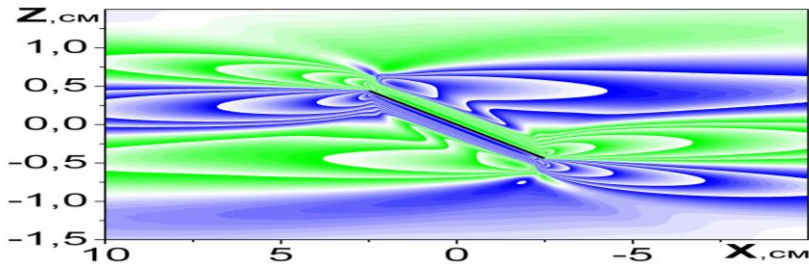
Картины полей различных физических переменных



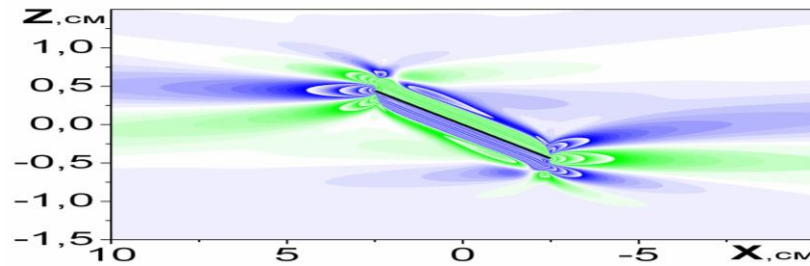
возмущение солености



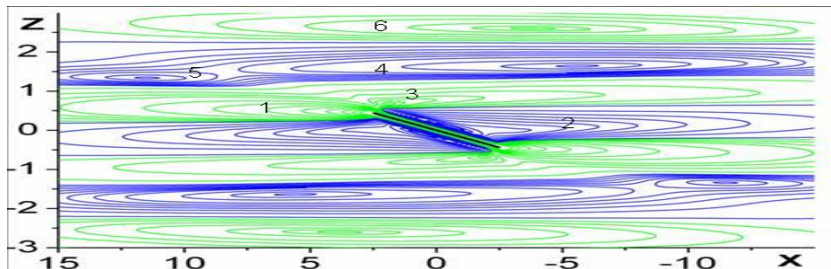
давление



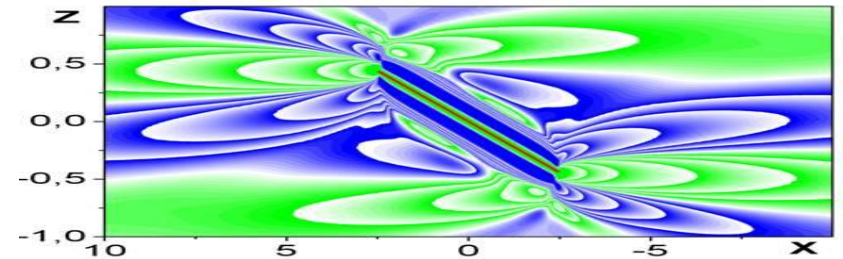
горизонтальная и вертикальная компоненты скорости



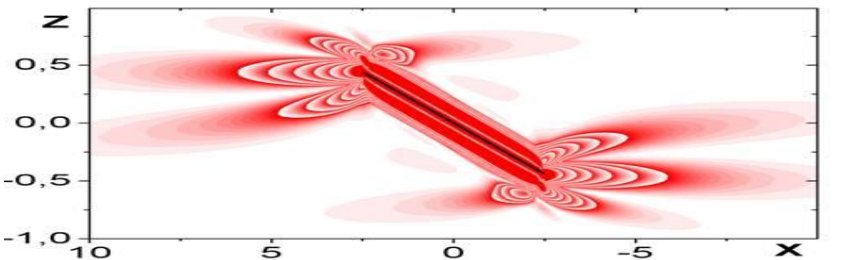
завихренность



линии тока



скорость бароклинной генерации завихренности



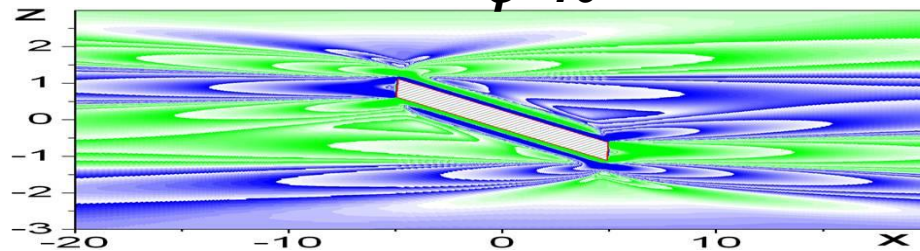
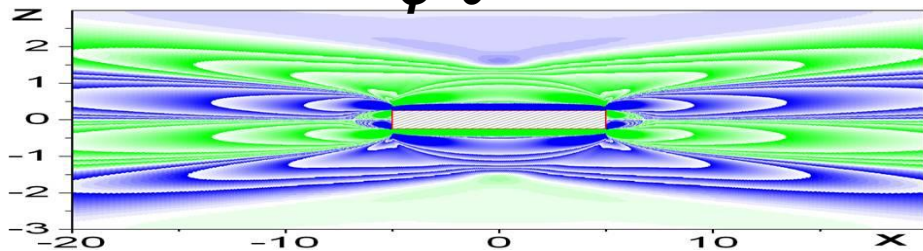
скорость диссипации энергии

Поля различных физических переменных течения, индуцированного диффузией на горизонтальной и наклонной пластинах

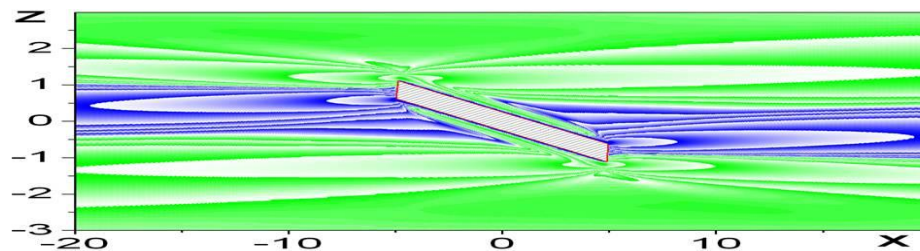
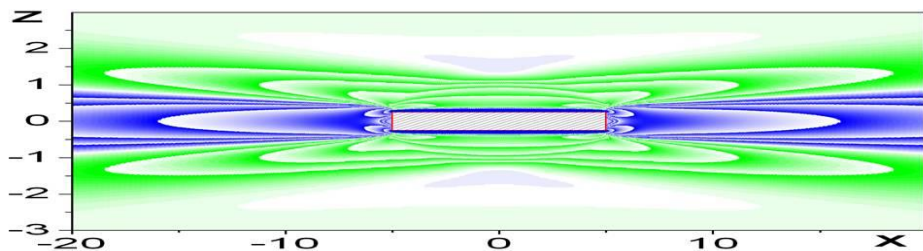
($L=10\text{cm}$, $h=0.5\text{cm}$, $N=1.26\text{s}^{-1}$)

$\varphi=0^\circ$

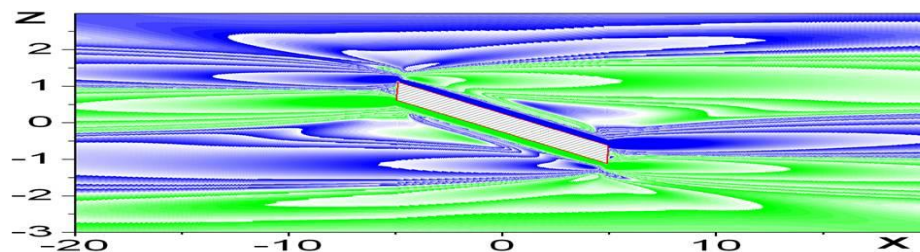
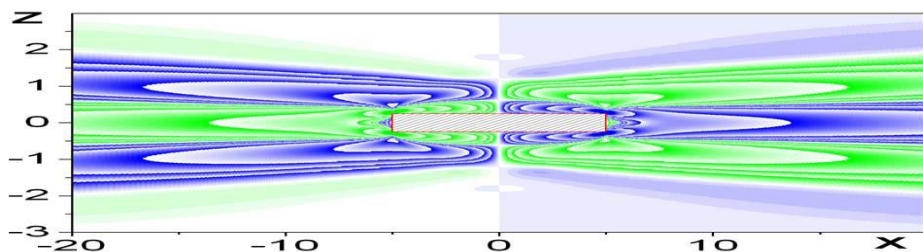
$\varphi=10^\circ$



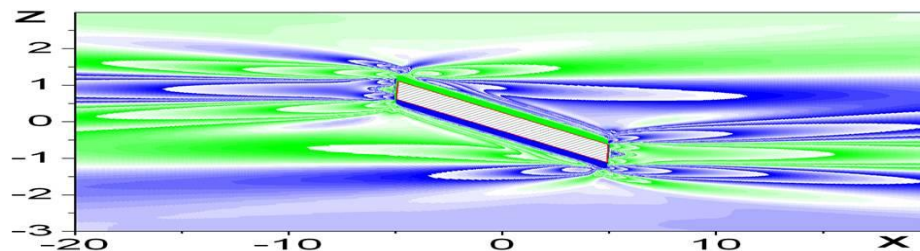
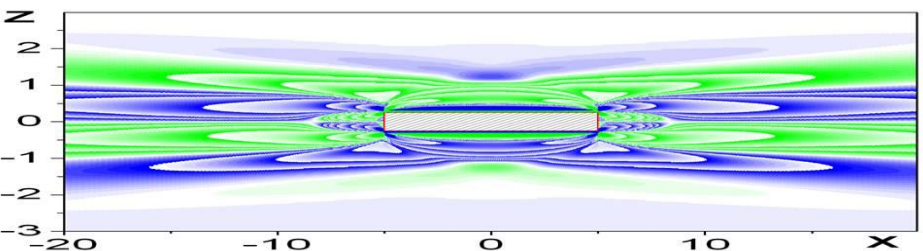
возмущение солёности



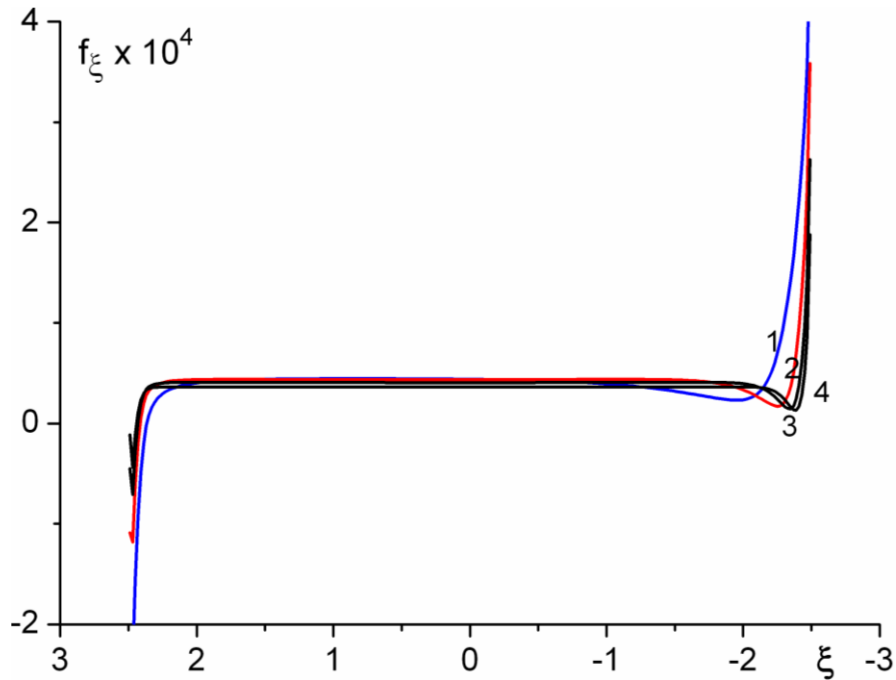
давление



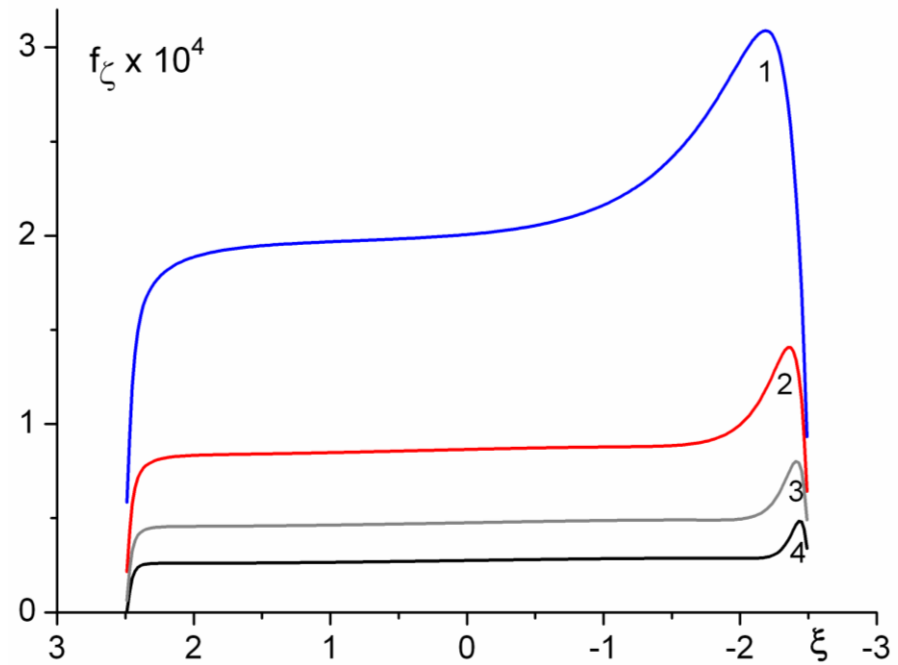
горизонтальная компонента скорости



вертикальная компонента скорости

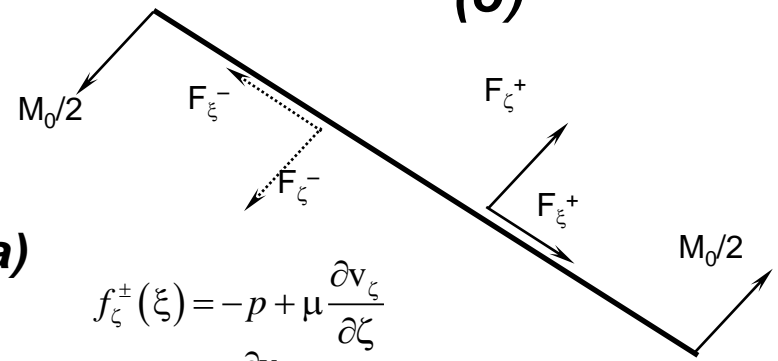


(a)



(б)

**Распределение силы сопротивления (а)
и подъемной силы (б) вдоль верхней
стороны пластины для различных углов
наклона к горизонту: $L=5\text{см}$, $N=1.256\text{с}^{-1}$,
 $\varphi=5^\circ; 10^\circ; 30^\circ; 60^\circ$ (кривые 1-4)**

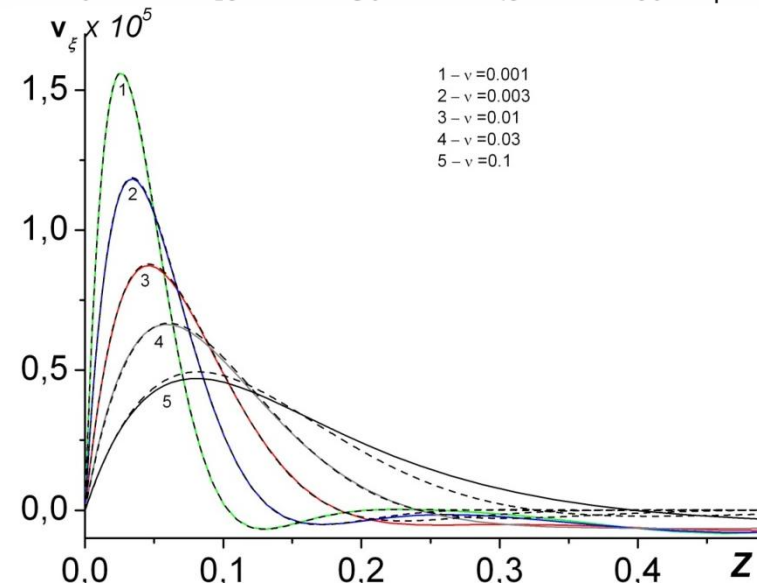
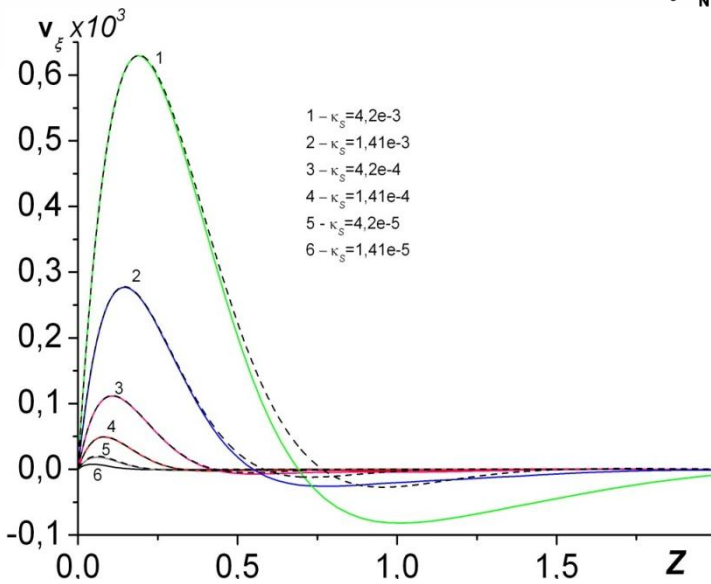
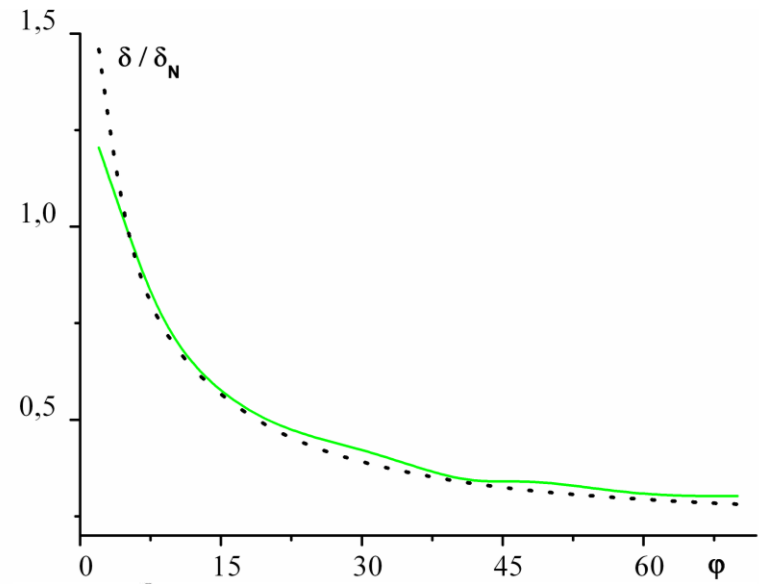
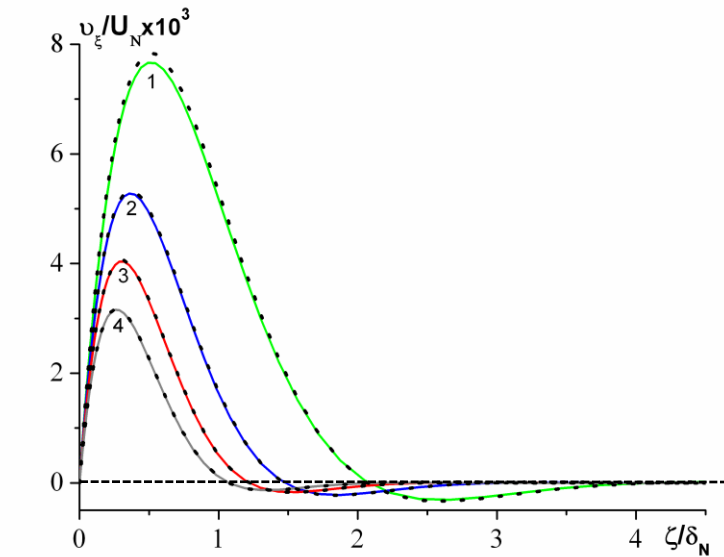


$$f_{\zeta}^{\pm}(\xi) = -p + \mu \frac{\partial v_{\zeta}}{\partial \zeta}$$

$$f_{\xi}^{\pm}(\xi) = \mu \frac{\partial v_{\xi}}{\partial \zeta}$$

$$F_{\xi, \zeta}^{\pm} = \int_{\Sigma^{\pm}} f_{\xi, \zeta}^{\pm}(\xi) d\xi$$

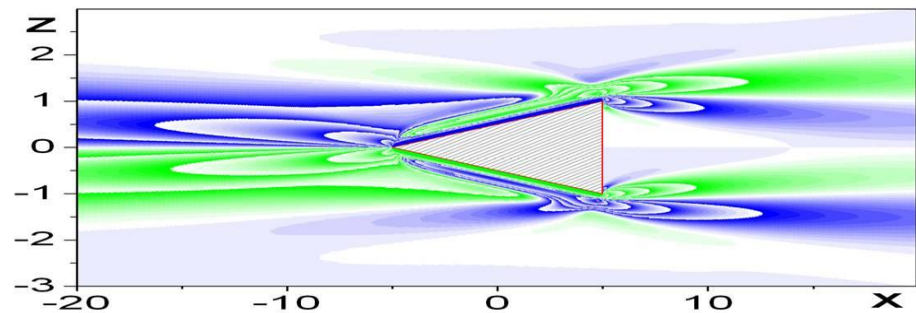
$$M_0^{\pm} = \int_{\Sigma^{\pm}} \xi \cdot F_{\zeta}^{\pm}(\xi) d\xi$$



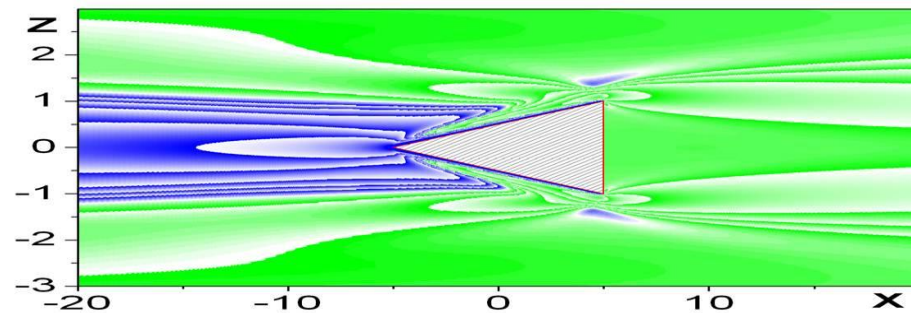
Сравнение рассчитанных результатов с аналитическими оценками на бесконечной плоскости

$$v_{\xi} = \frac{2\kappa_s}{\delta_v} \cdot e^{-\zeta/\delta_v} \sin(\zeta/\delta_v) \operatorname{ctg} \varphi, \quad \delta_v = \left(\frac{4\nu\kappa_s}{N^2 \sin^2 \varphi} \right)^{1/4}.$$

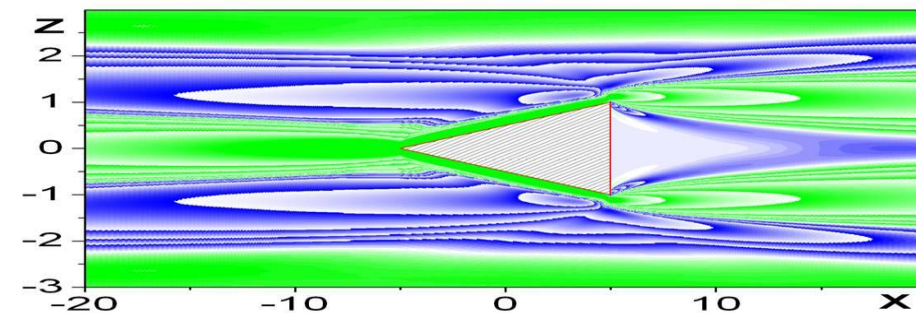
Картины течения, индуцированного диффузией на симметричном клине ($L=10\text{см}$, $h_{\max}=2\text{см}$, $N=1.26\text{с}^{-1}$, $\alpha=6^\circ$)



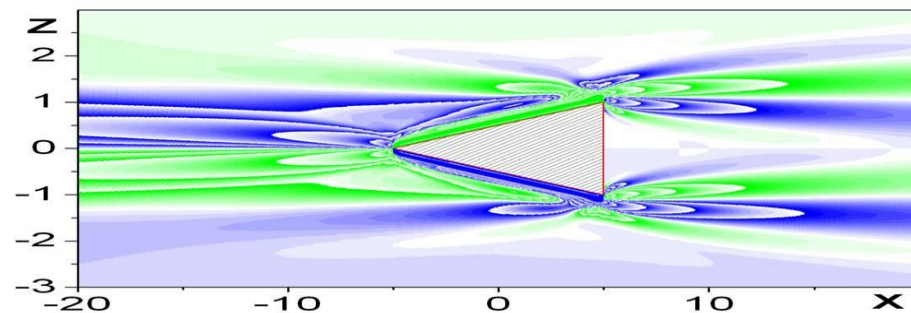
возмущение солености



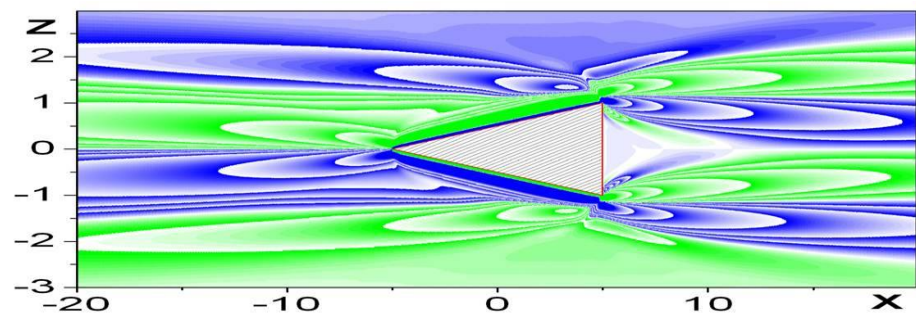
давление



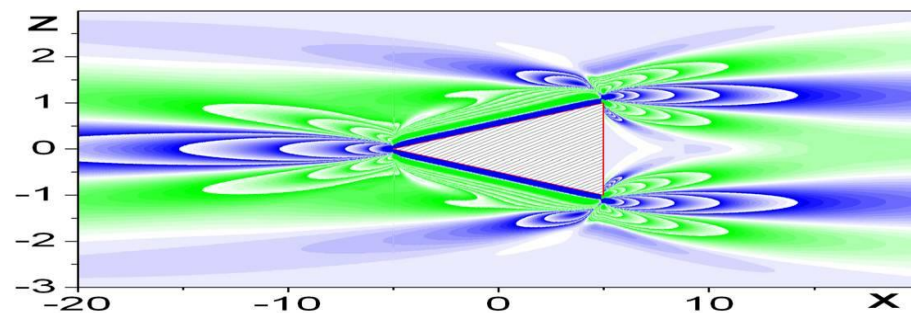
горизонтальная компонента скорости



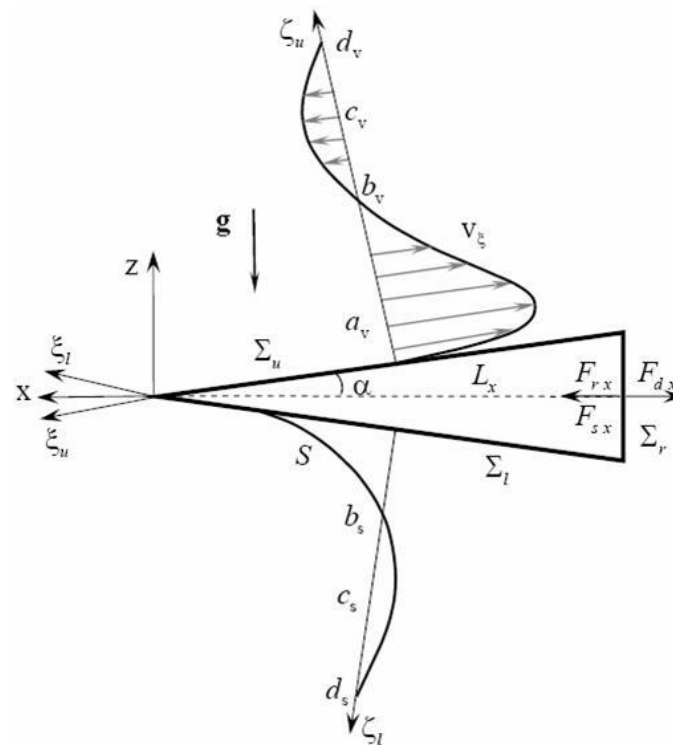
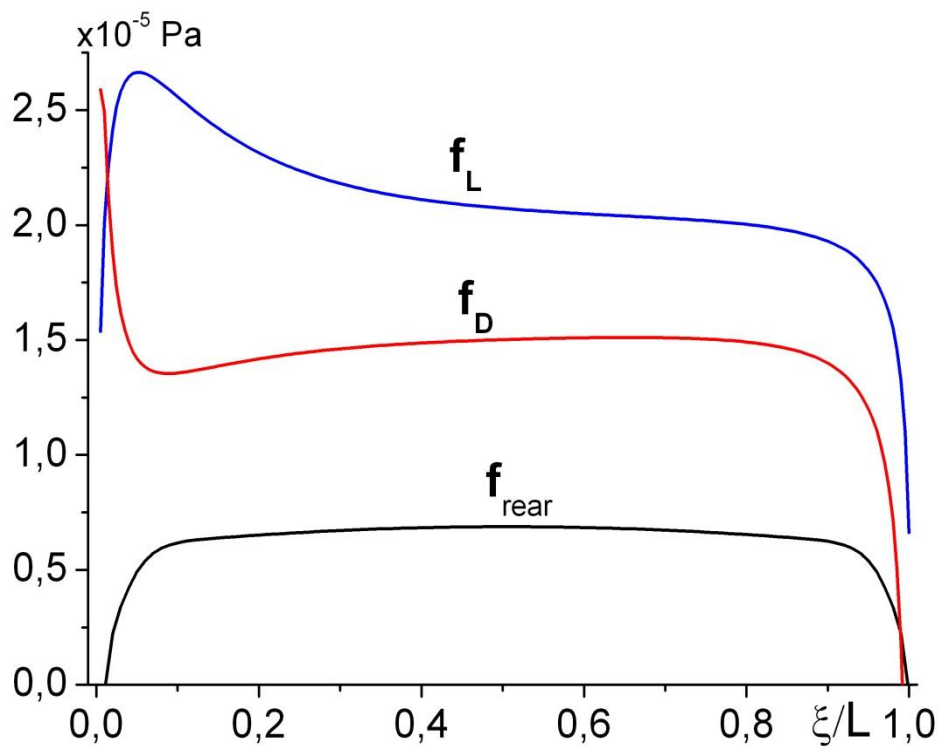
вертикальная компонента скорости



динамическая завихренность



скорость бароклинной генерации завихренности

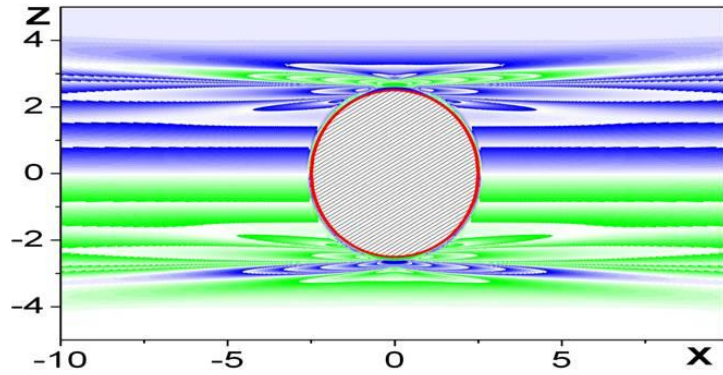


Распределение горизонтальных проекций подъемной силы и силы сопротивления вдоль боковых сторон и задней границы клина :

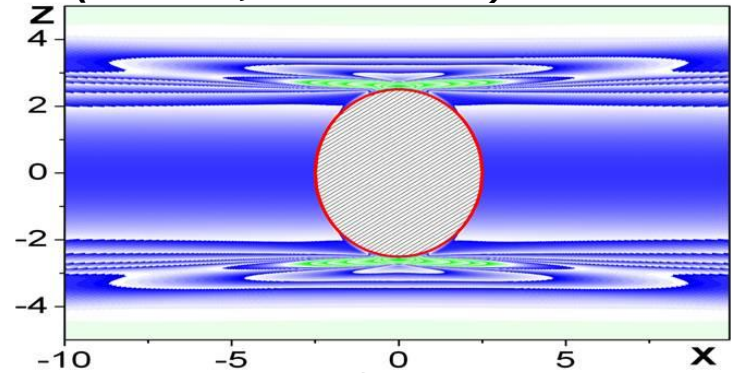
$$L=10\text{см}, h_{\text{max}}=2\text{см}, N=1.26\text{с}^{-1}, \alpha=6^\circ$$

$$F_{Lx} = 9.073 \cdot 10^{-4} \text{ (H)}, F_{Dx} = 5.72 \cdot 10^{-4} \text{ (H)}$$

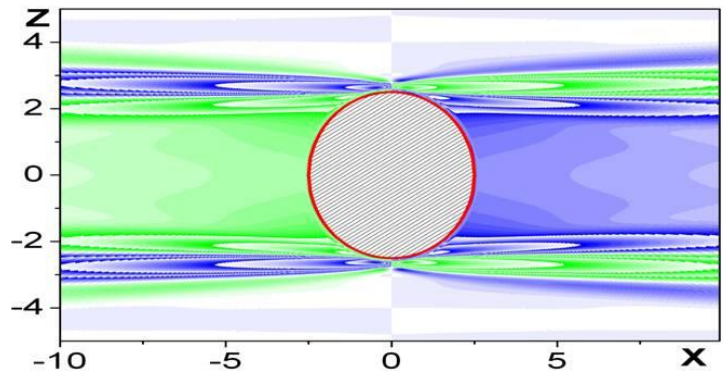
Картинны течения, индуцированного диффузией на горизонтальном цилиндре ($D=5\text{см}$, $N=1.26\text{с}^{-1}$)



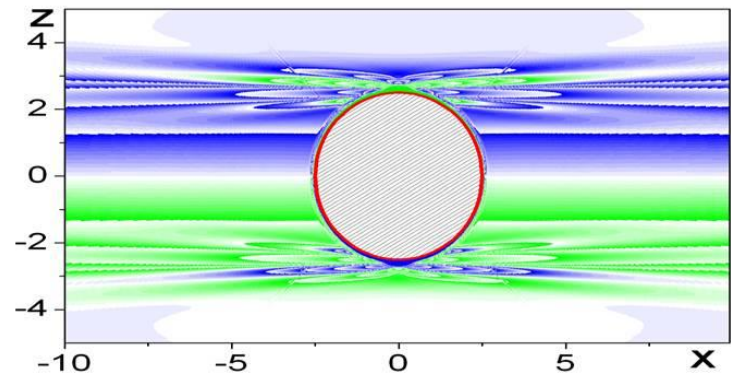
возмущение солености



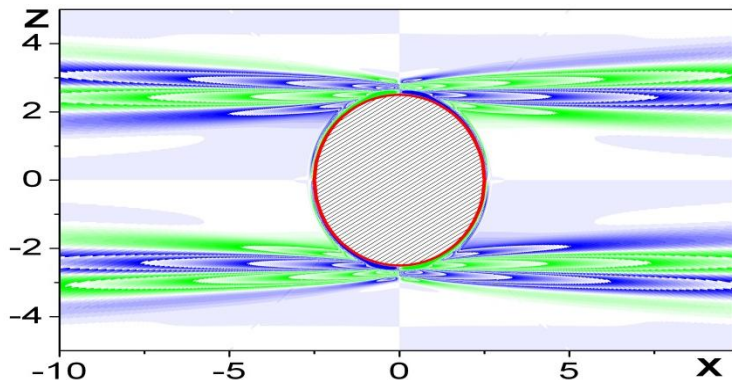
давление



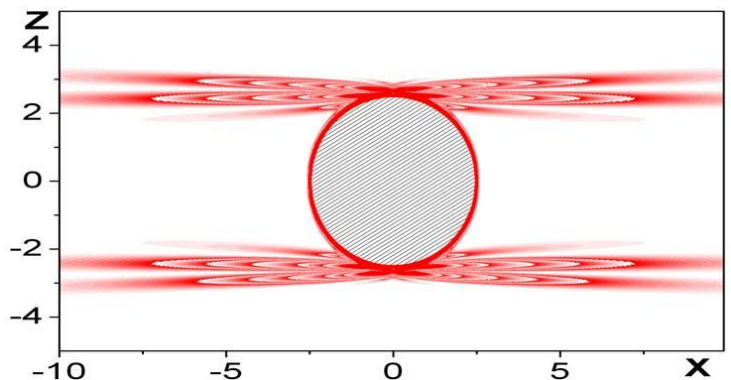
горизонтальная компонента скорости



вертикальная компонента скорости

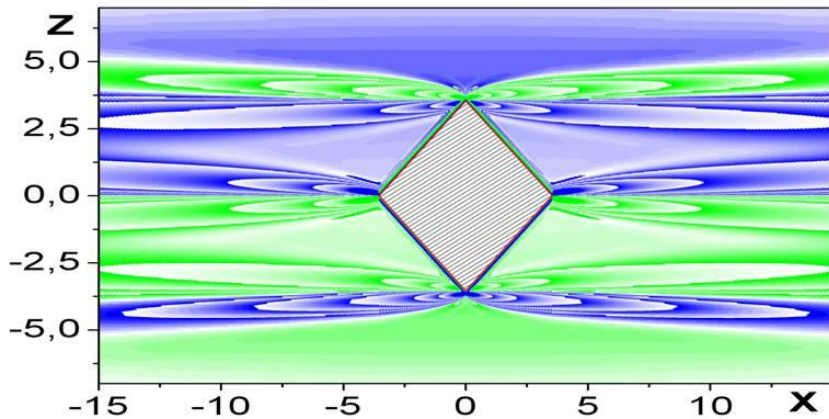


динамическая завихренность

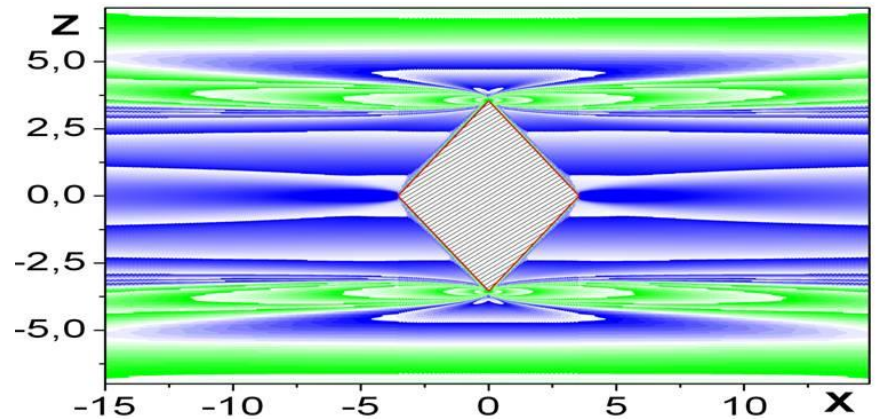


скорость диссипации механической энергии

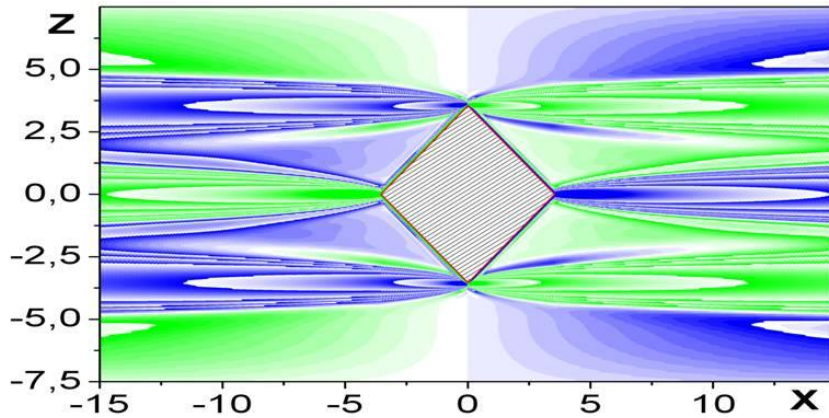
**Картины течения, индуцированного диффузией на
прямоугольном цилиндре ($L=5\text{см}$, $N=1.26\text{с}^{-1}$)**



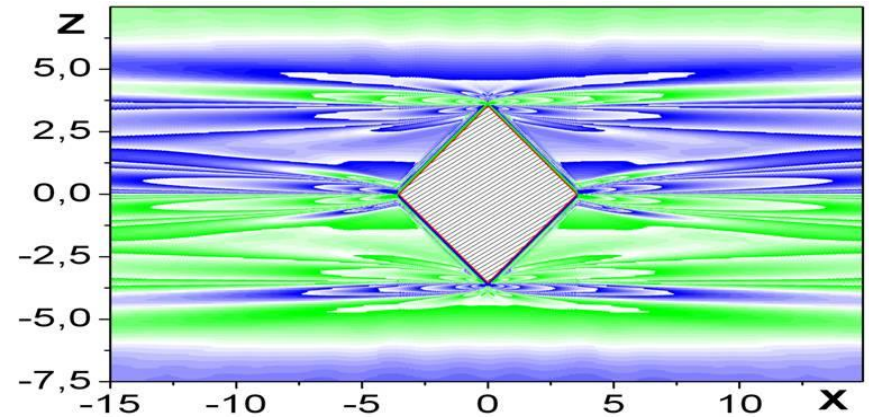
возмущение солёности



давление

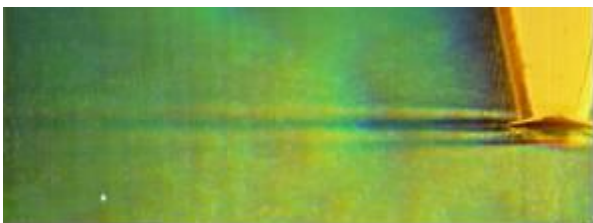


горизонтальная компонента скорости



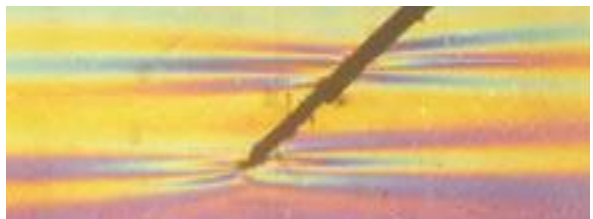
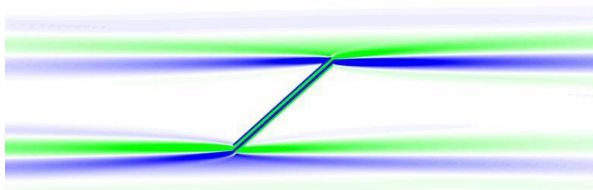
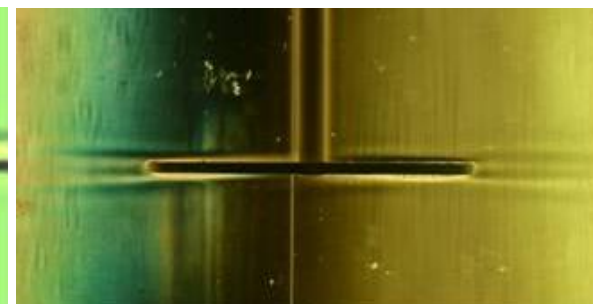
вертикальная компонента скорости

Сопоставление рассчитанных и визуализируемых в опытах теневых картин течений, индуцированных диффузией на препятствиях различной геометрии



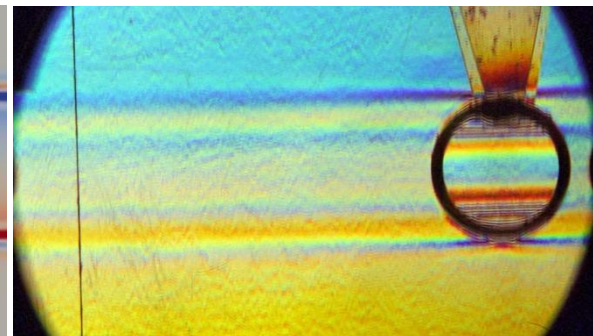
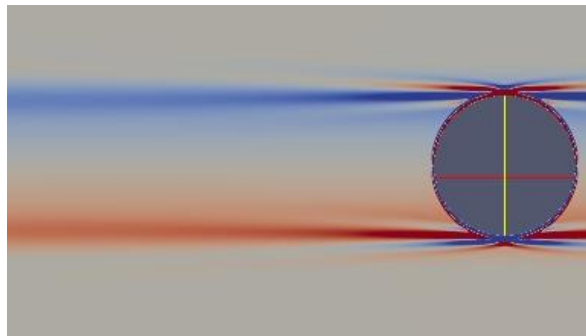
горизонтальная пластина

горизонтальный диск



наклонная пластина

цилиндр



**Рассчитанные картины течений над теньвыми изображениями при
равномерном движении горизонтальной пластины
в непрерывно стратифицированной жидкости**



$U=0.1\text{cm/s}$

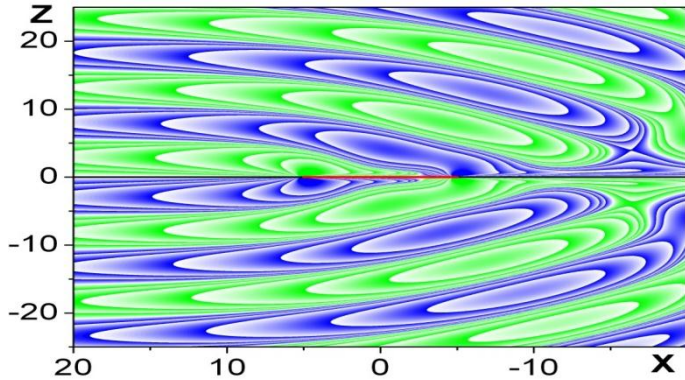


$L=7.5\text{ cm}, N=0.826\text{ s}^{-1}$

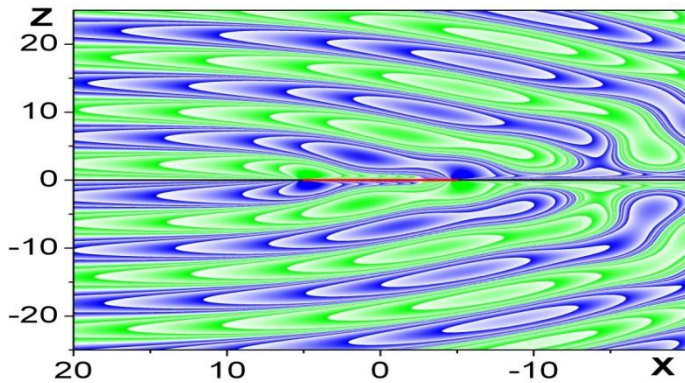
$U=0.32\text{cm/s}$

Картинки внутренних волн при равномерном движении горизонтальной пластины ($U_0=1\text{см/с}$, $L=10\text{см}$)

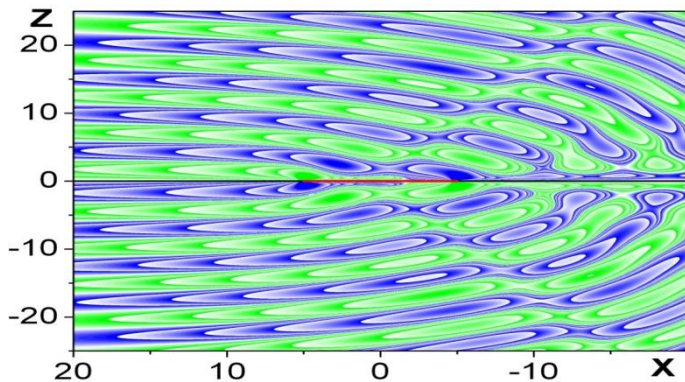
Визуализация точного решения



$N=0.63\text{ c}^{-1}$

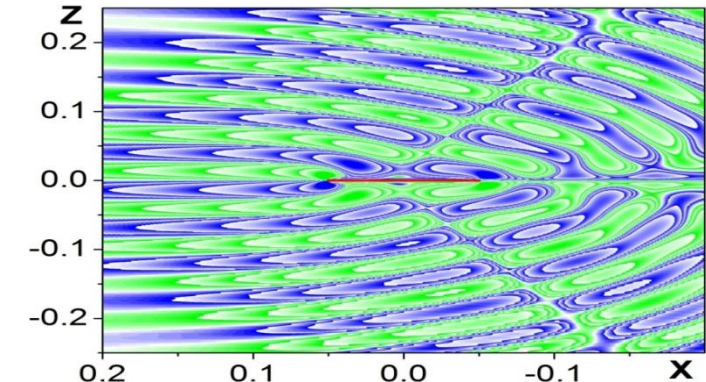
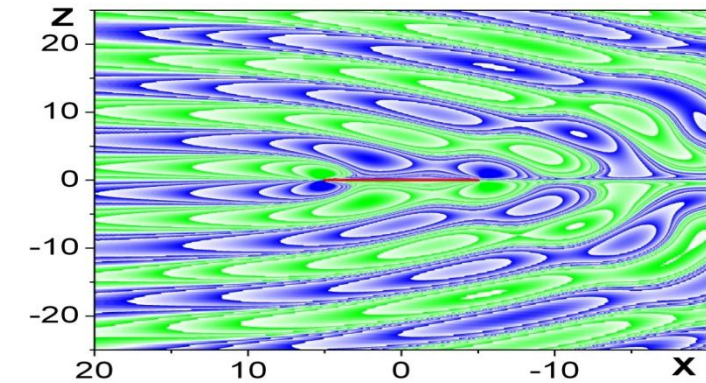
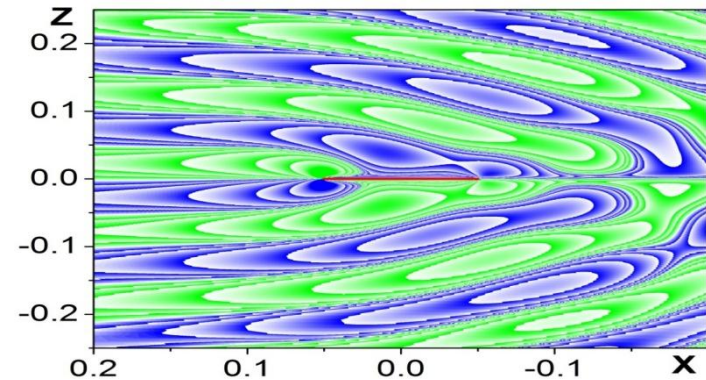


$N=0.83\text{ c}^{-1}$



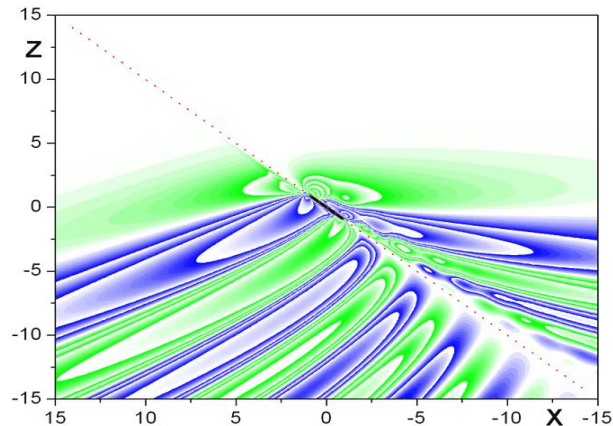
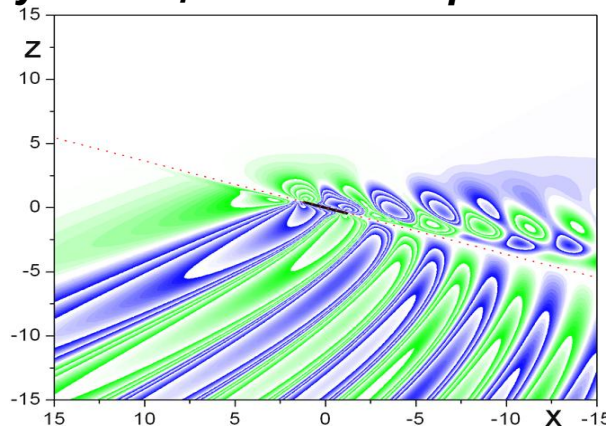
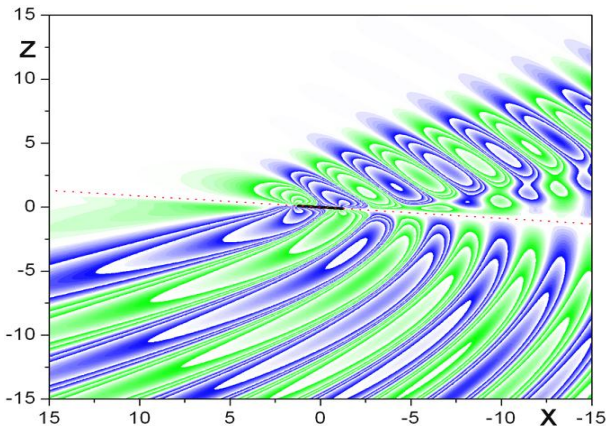
$N=1.26\text{ c}^{-1}$

Прямое численное моделирование

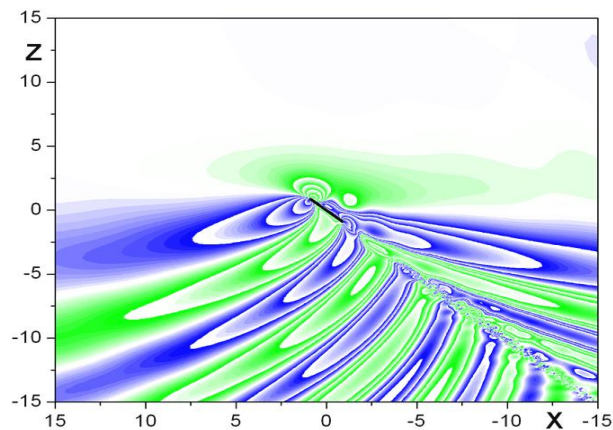
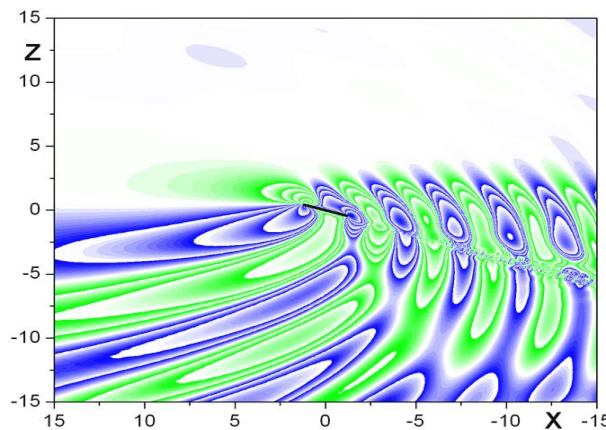
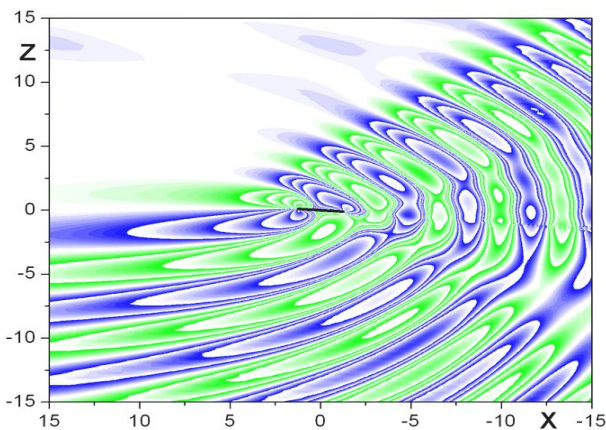


Картинны внутренних волн при равномерном движении пластины под углом к горизонту ($U_0=0.5$ см/с, $L=2.5$ см)

Визуализация точного решения



Прямое численное моделирование

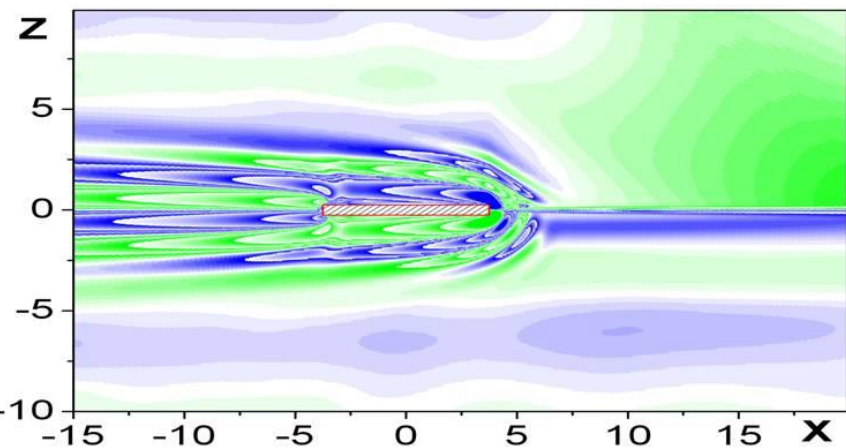


$\varphi=5^\circ$

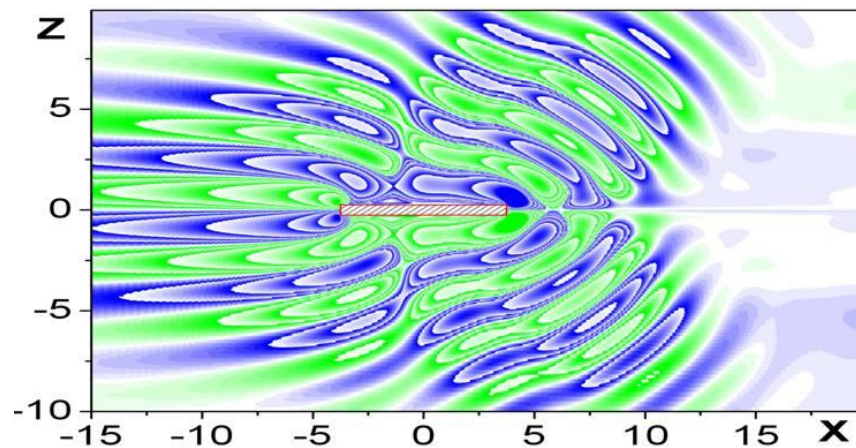
$\varphi=20^\circ$

$\varphi=45^\circ$

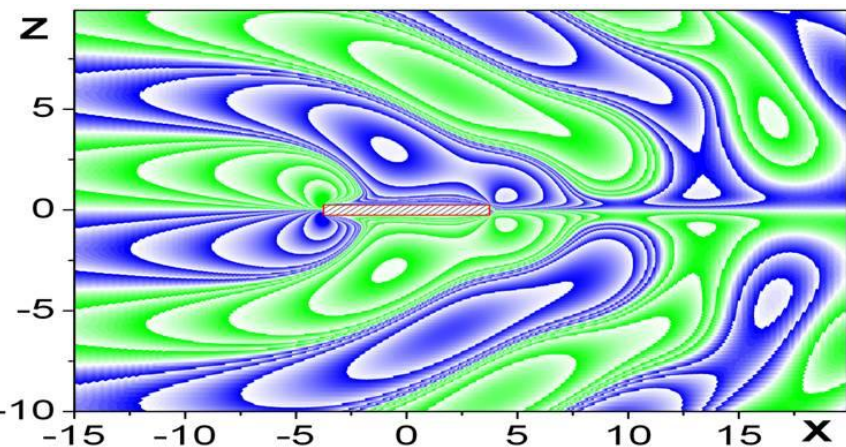
Картини обтекания горизонтальной пластины потоком
непрерывно стратифицированной жидкости ($L=7.5$ см, $N=0.826$ с $^{-1}$)



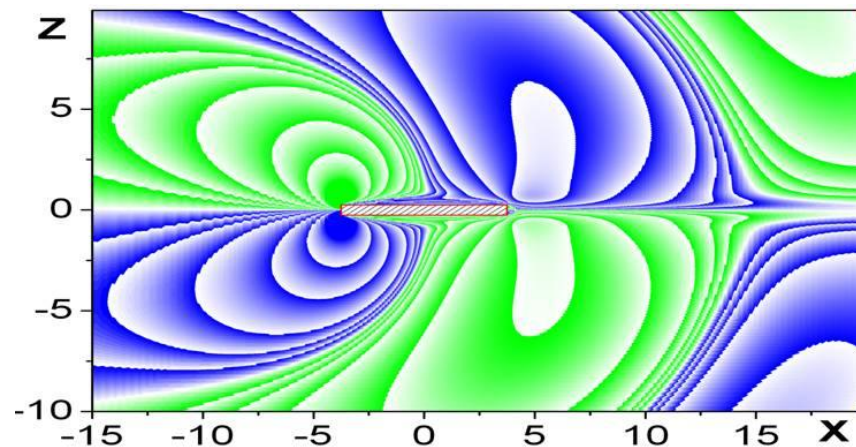
$U=0.1$ см/с



$U=0.3$ см/с

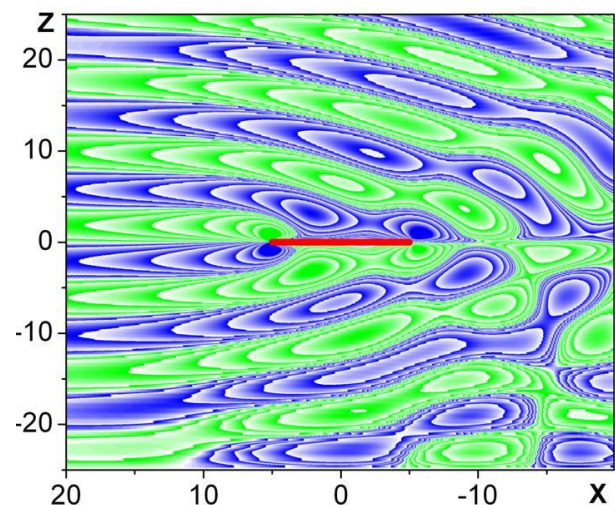


$U=1$ см/с

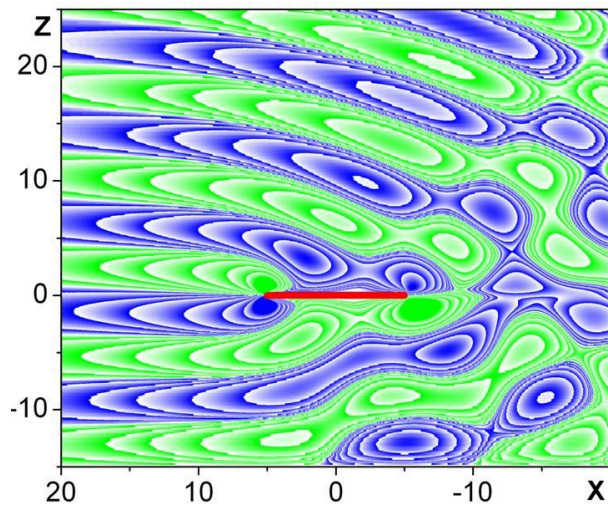


$U=3$ см/с

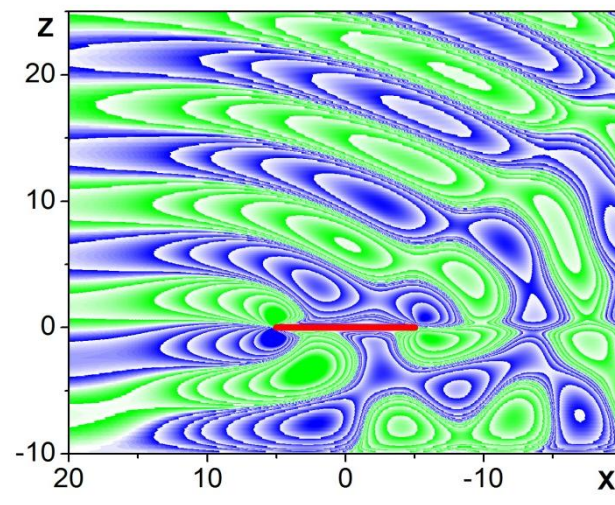
Картини обтекания пластины потоком стратифицированной жидкости на различных расстояниях от поверхности: $U_0=1$ см/с, $L=10$ см, $N=0.83$ с⁻¹



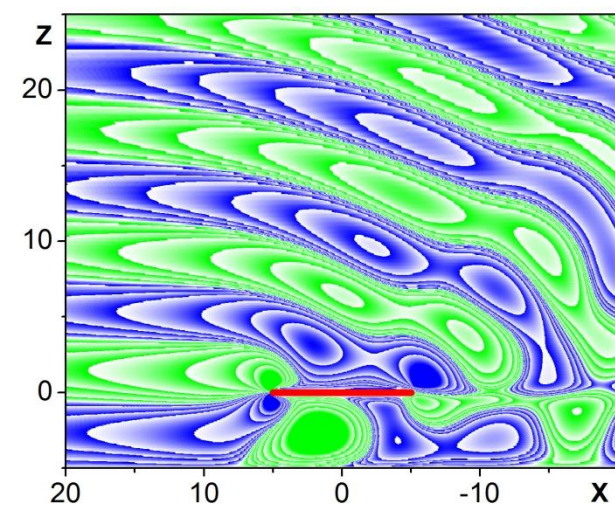
$h=25$ см



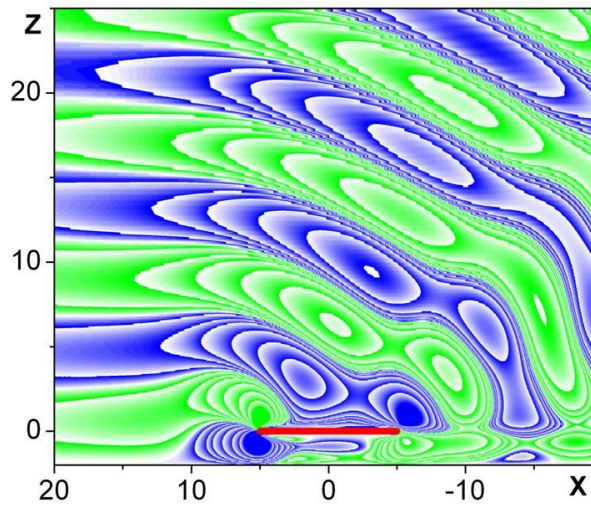
$h=15$ см



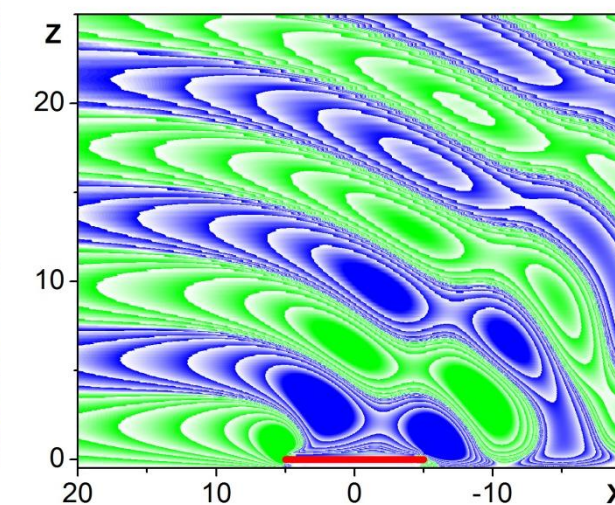
$h=10$ см



$h=5$ см

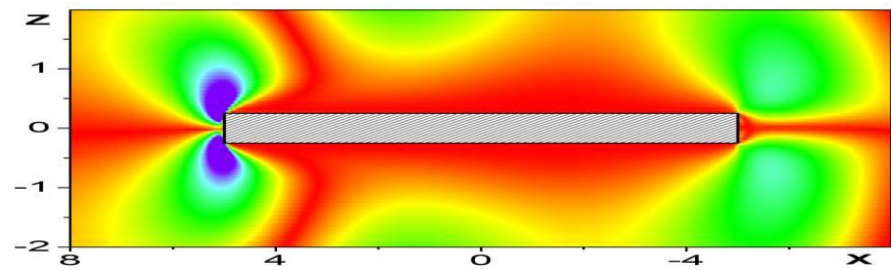


$h=2$ см

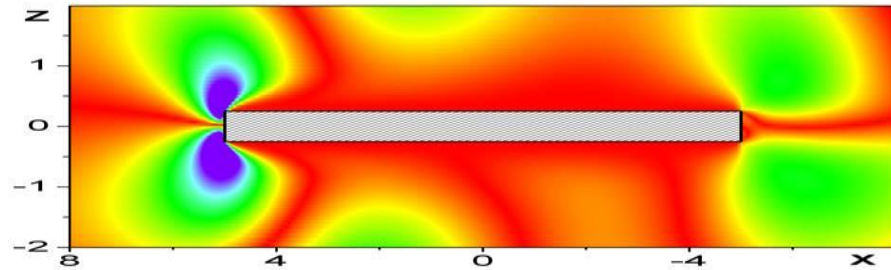


$h=0.5$ см

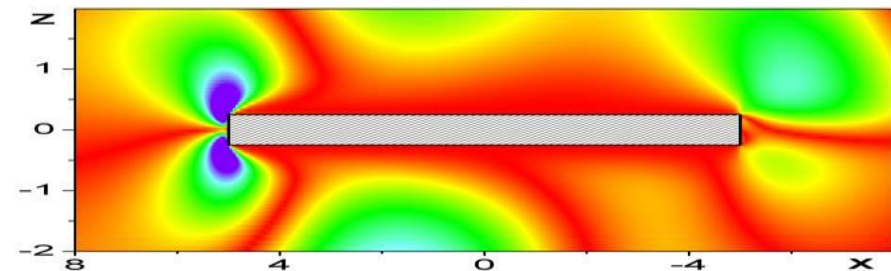
Изменение структуры краевых сингулярностей с приближением пластины к подстилающей поверхности: $U_0=1$ см/с, $L=10$ см, $N=0.83$ с⁻¹



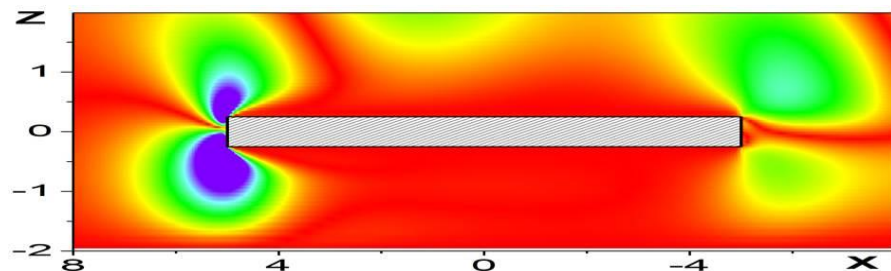
$h=20$ см



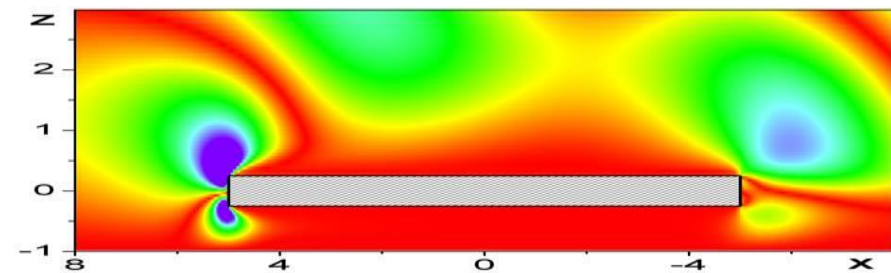
$h=10$ см



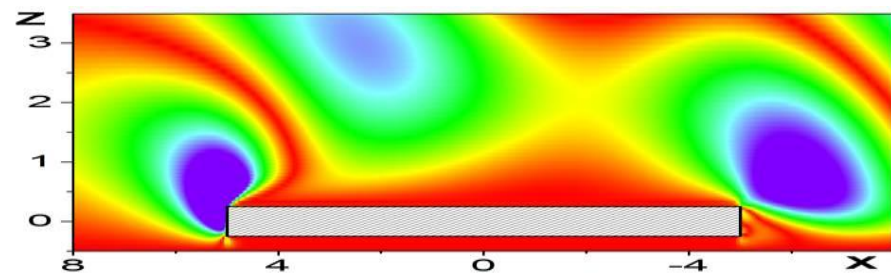
$h=5$ см



$h=2$ см



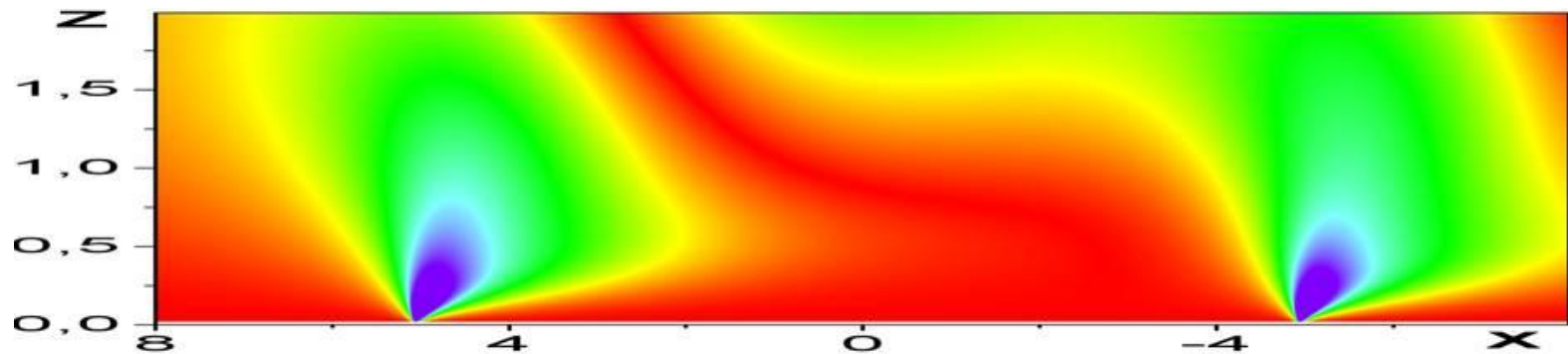
$h=1$ см



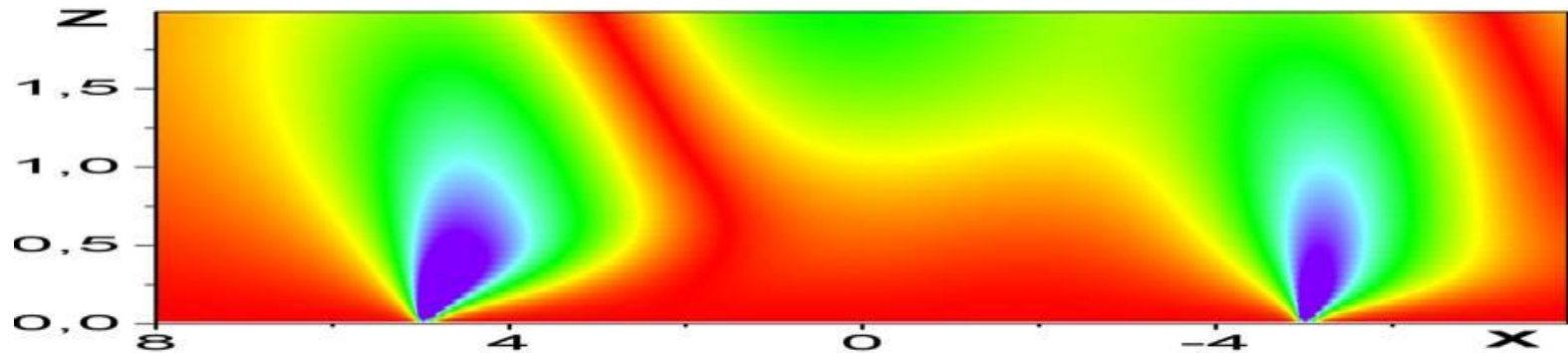
$h=0.5$ см

Структура краевых сингулярностей при движении пластины вдоль подстилающей плоскости: $U_0=1$ см/с, $L=10$ см, $N=0.83$ с⁻¹

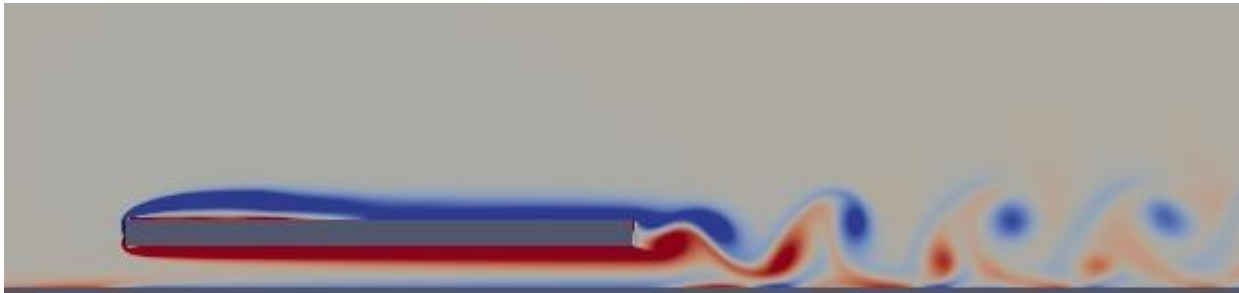
Визуализация точного решения



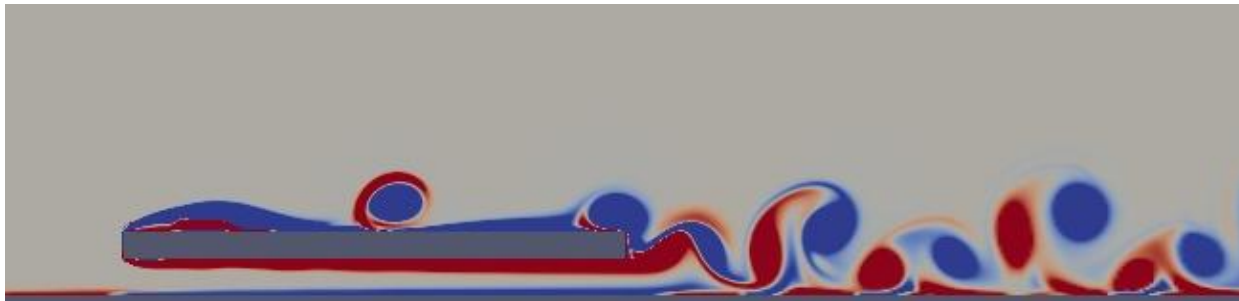
Численное моделирование



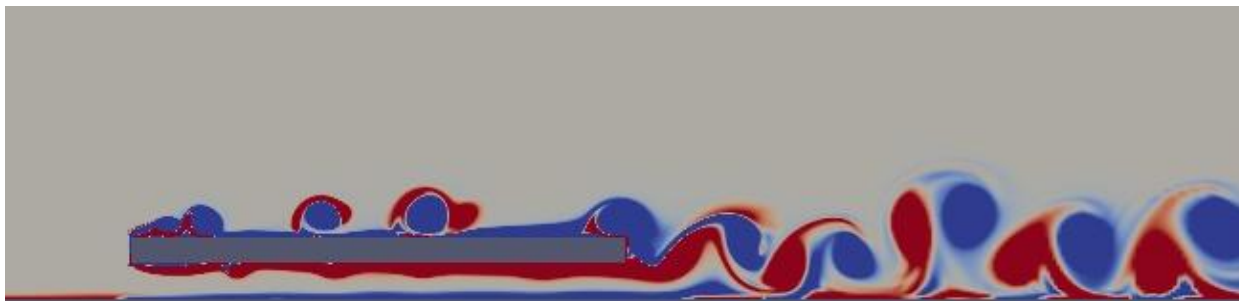
Вихревая структура течения при движении пластины вблизи подстилающей плоскости: $h=1$ см, $L=10$ см, $N=1.256$ с⁻¹



$U=4$ см/с



$U=14$ см/с



$U=24$ см/с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Технологическая платформа UniHUB – удобная, эффективная и перспективная вычислительная лаборатория для расчетов задач механики жидкостей.
- Построен и протестирован решатель OpenFOAM для численного расчета стратифицированных течений: результаты расчетов хорошо согласуются с картинками теневой визуализации и аналитическими решениями около неподвижных и движущихся препятствий.
- OpenFOAM – перспективное и динамично развивающееся открытое программное обеспечение, которое планируется использовать в дальнейшем численном моделировании задач механики неоднородных жидкостей.
- Для адекватного математического моделирования природных процессов необходимо исходить из рассмотрения фундаментальной системы уравнений, поскольку плотность жидкости в окружающей среде обычно неоднородна по температуре и концентрации растворенных веществ.
- Индуцированные диффузией течения могут приводить к самопроизвольному движению тел нейтральной плавучести.
- При движении препятствия в непрерывно стратифицированной жидкости формируются системы внутренних волн, которые даже при достаточно слабой стратификации могут оказывать заметное влияние на тонкую структуру и динамику течений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
(проекты 12-07-90912-мол_снг_нр, 12-05-90417).

Автор выражает благодарность руководителю проектов
проф. Юлию Дмитриевичу Чашечкину
и сотрудникам Лаборатории механики жидкостей

Спасибо за внимание!