

Комплекс программ SINF:

Современное состояние и достижения 2015 г.

Д.К.Зайцев, А.А.Пожилов, Е.М.Смирнов,
А.А.Смирновский, А.И.Храбрый



Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
Кафедра гидроаэродинамики

<http://aero.spbstu.ru>
aero@phmf.spbstu.ru

Содержание

➤ Комплекс программ SINF

- Общая характеристика
- Основные модели и алгоритмы
- Примеры расчетов

➤ Последние достижения (2014-2015г)

- 3D расчеты нестационарных течений со свободной поверхностью (метод VOF)
- агломерационный многосеточный метод для решения уравнения Пуассона
- моделирование сопряженного тепло- и массопереноса (3D расчет тепловых труб)

Комплекс программ **SINF**

(**S**upersonic to **IN**compressible **F**lows)

разрабатывается с 1992 г.

Цели и задачи

- Освоение современных и разработка новых методов и технологий вычислительной гидродинамики
- Проведение фундаментальных исследований
- Решение задач промышленной гидрогазодинамики и теплообмена

Разработчики

- Студенты, аспиранты и сотрудники кафедры гидроаэродинамики СПбПУ (~15 человек)

Результаты

- 10 кандидатских и более 20-ти магистерских диссертаций
- Гранты РФФИ (12), поддержки научных школ, зарубежные (3)
- Контракты с российскими (>30) и зарубежными (>10) предприятиями

Базовый код комплекса SINF

- до- и сверхзвуковые течения газа и несжимаемой жидкости
- стационарные и нестационарные потоки
- абсолютная и вращающаяся системы отсчета
- скользящие сетки; взаимодействие статор-ротор
- деформируемые сетки; опции аэроупругости
- сопряженный теплообмен (без радиации)
- эффекты плавучести
- конвективно-диффузионный перенос примеси
- современные модели турбулентности RANS (k , ν_t -SA, k - ϵ , k - ω , MSST, ν^2f , γ - Re_θ); опции RANS/LES (DES)

- блочно-структурированные сетки; опции стыковки блоков
- метод конечного объема (cell-centered);
- противопоточные схемы $2^{го}$ порядка; HCUSP для сверхзвука
- неявная схема $2^{го}$ порядка по времени
- СЛАУ: AFM, ADDI, CG
- параллельные вычисления (Domain Decomposition; MPI)
- Fortran-90 (77); Windows/Linux

Комплекс программ SINP: Компоненты

Блочно-структурированные сетки

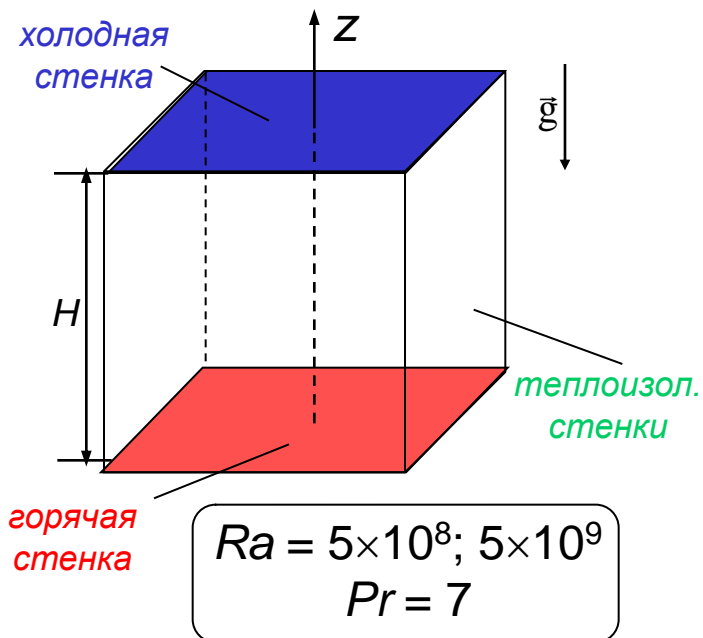
- Базовый расчетный код **SINP** (3D Навье-Стокс, газ/жидкость; 1992-2010)
- Интерактивный 2D генератор сеток + 3D утилиты (1993-1998)
- Визуализатор **FLAG** (*Flow Analysis Graphics*; 1993-1997)
- Специализированные коды/версии:
 - Течения с дисперсными частицами (Лагранж-Эйлер; 1996-1997)
 - МГД течения (1998-1999)
 - Интегрированный учебный пакет **FLOS** (*Flow Studio*; 2000-2003)
 - **ПГС-ТК** (многокомпонентная парогазовая смесь, равновесная объемная и пленочная конденсация, ...; для СПб АЭП, 2009-2012)

Неструктурированные (полиэдральные) сетки

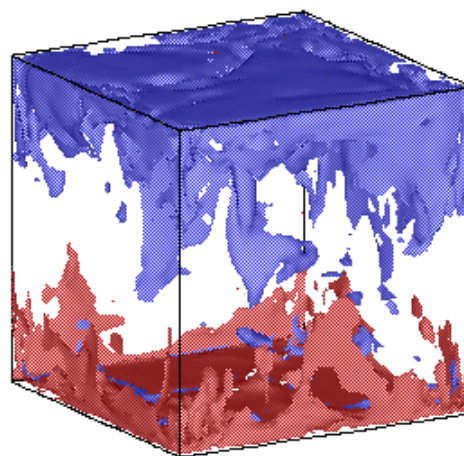
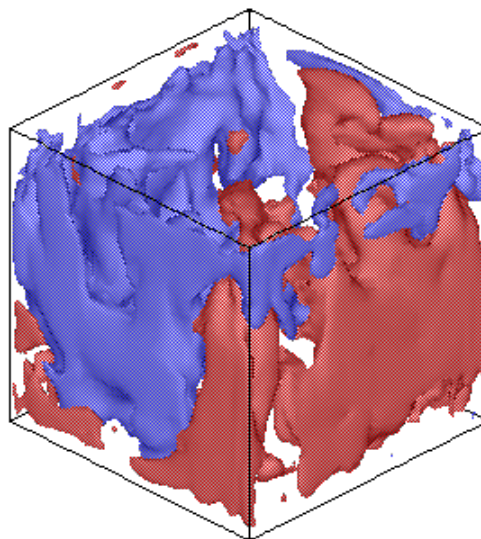
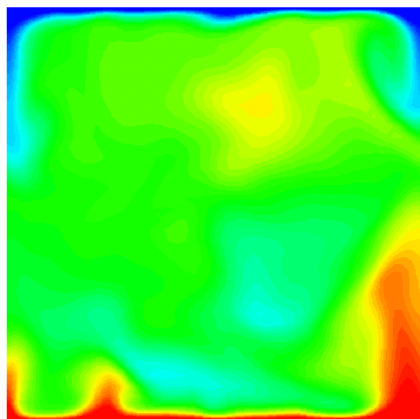
- Базовый код **SINP/Flag-S** (2005-н.в.)
- Специализированные коды:
 - **Flag-FS** (течения со свободной поверхностью; 2009-2013)
 - **ТЕМБР** (жидкие металлы; для ГК Росатом, 2012-2013)
 - **СКАТ³** (сопряженный тепломассоперенос ...; Роскосмос, 2014-2015)

Некоторые примеры использования ПК SINF

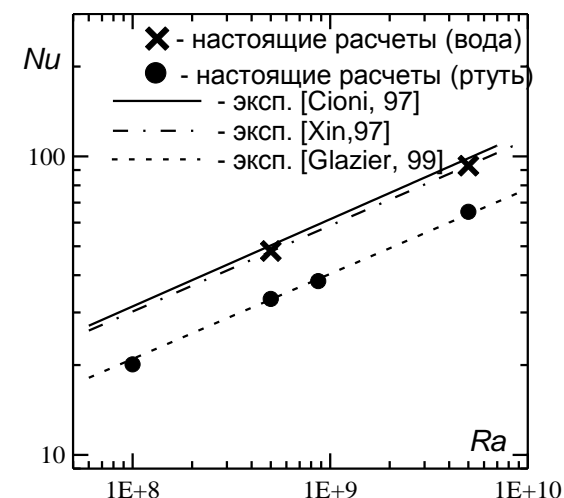
Турбулентная конвекция воды в подогреваемой снизу полости



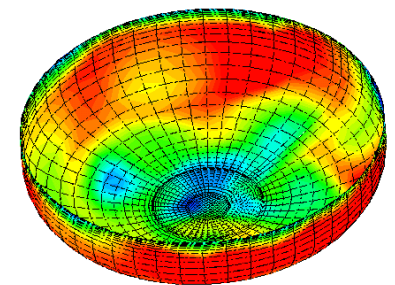
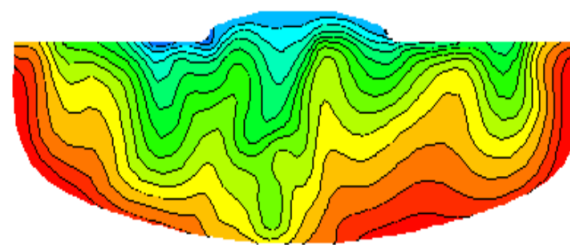
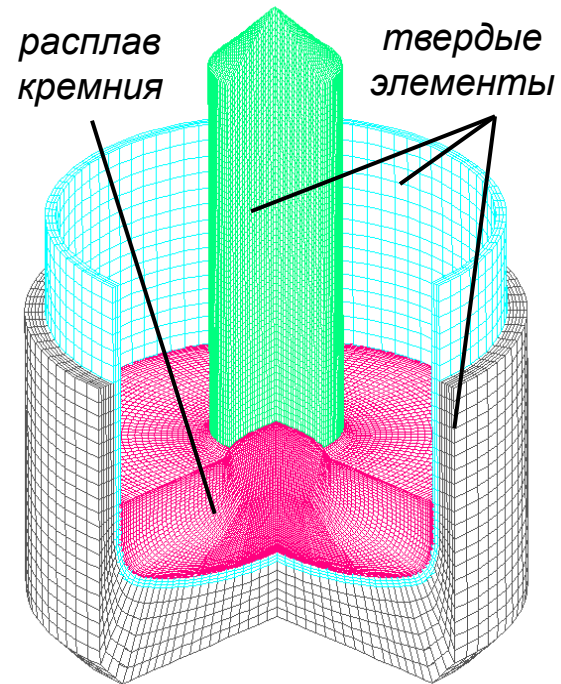
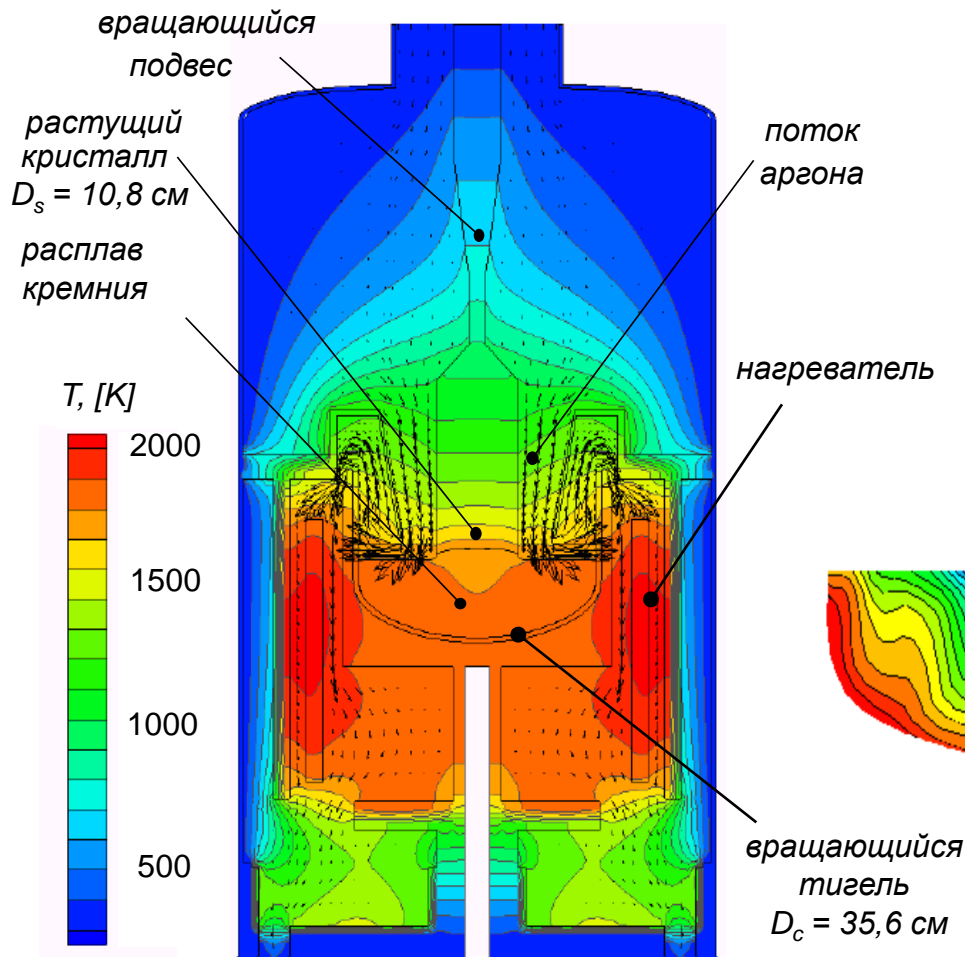
Поле температуры



Числа Нуссельта
в сравнении с экспериментами

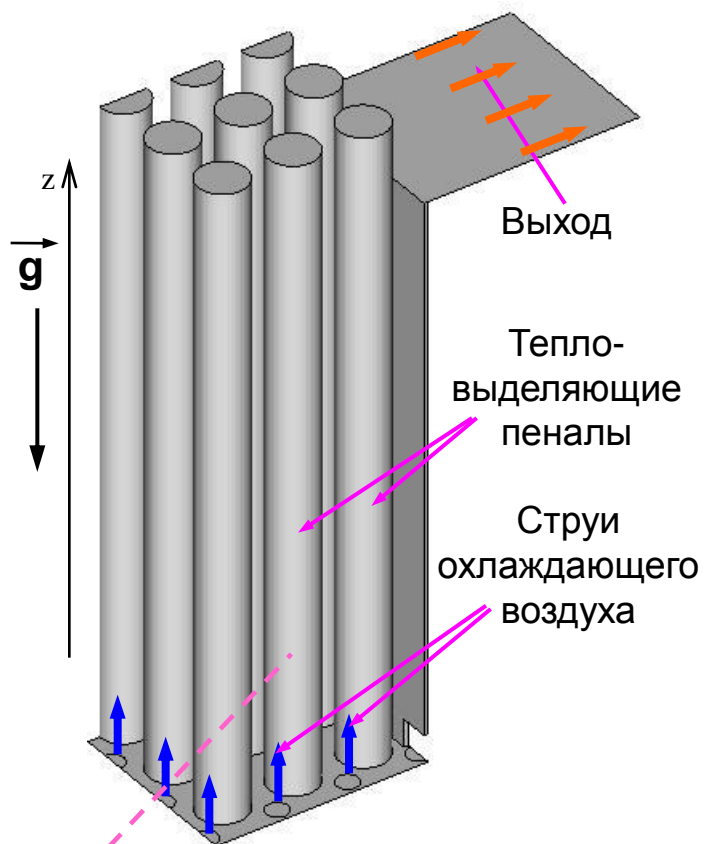


Турбулентная конвекция расплава кремния в тигле метода Чохральского

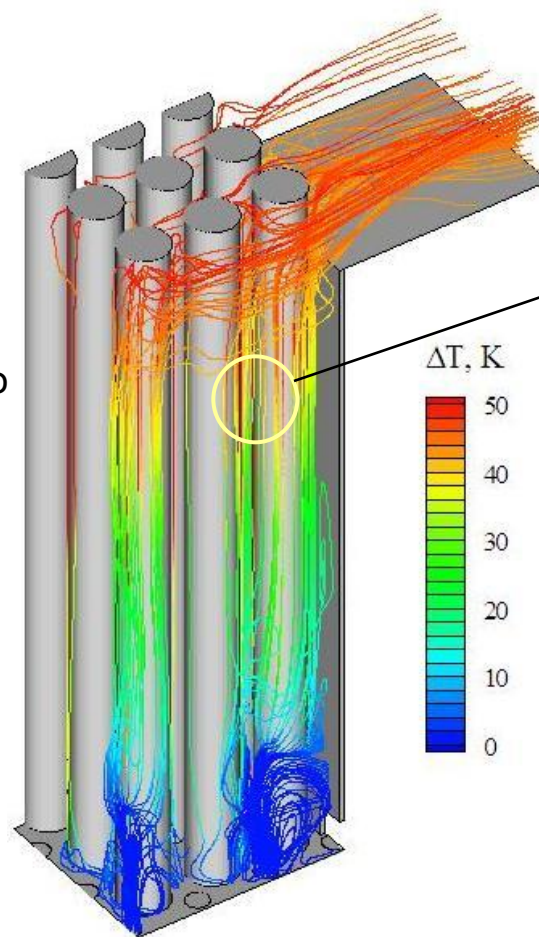
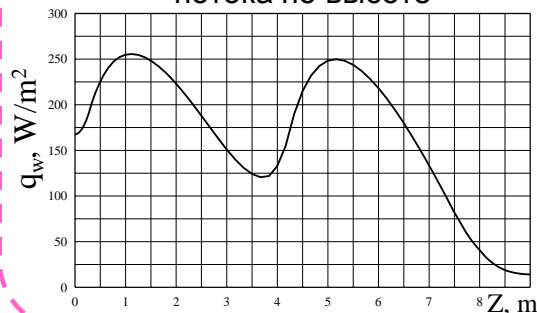


Поле температуры в расплаве

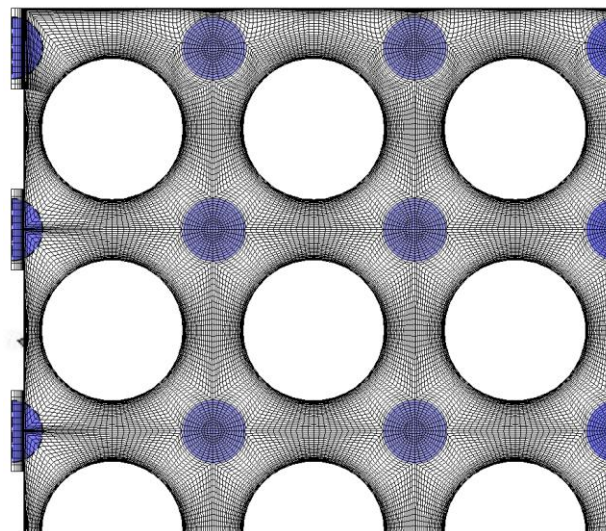
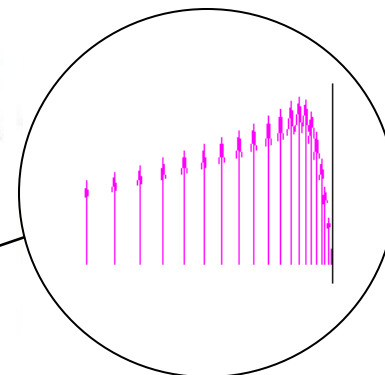
Смешанная конвекция в камере сухого хранения отработанного ядерного топлива (RANS расчет)



Распределение теплового
потока по высоте

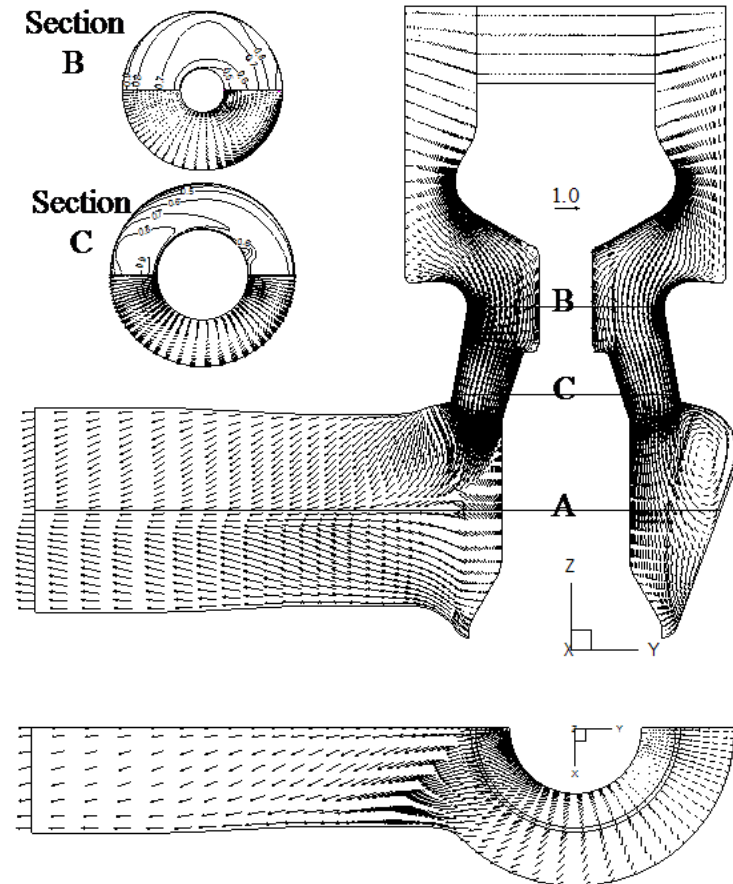
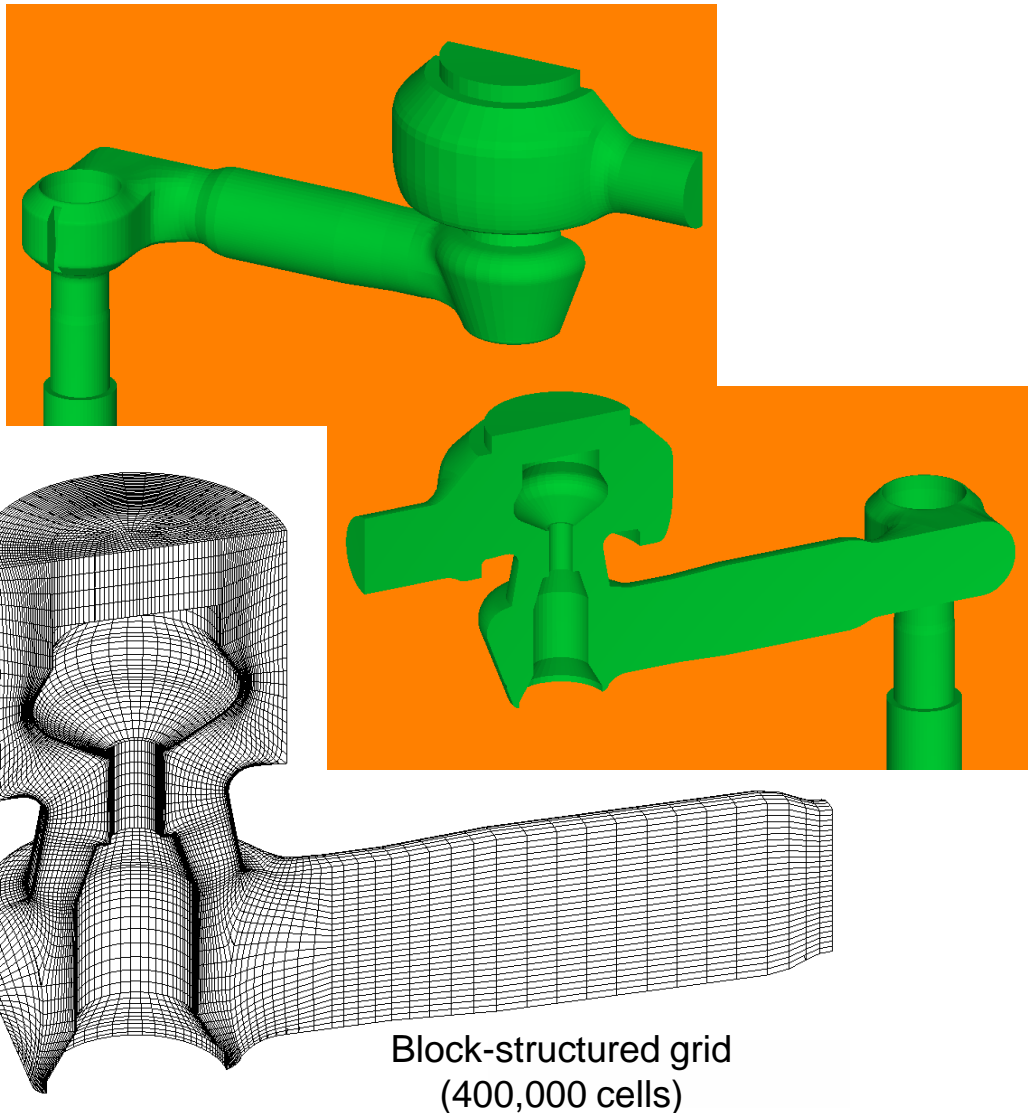


Линии тока, окрашенные по
значениям температуры

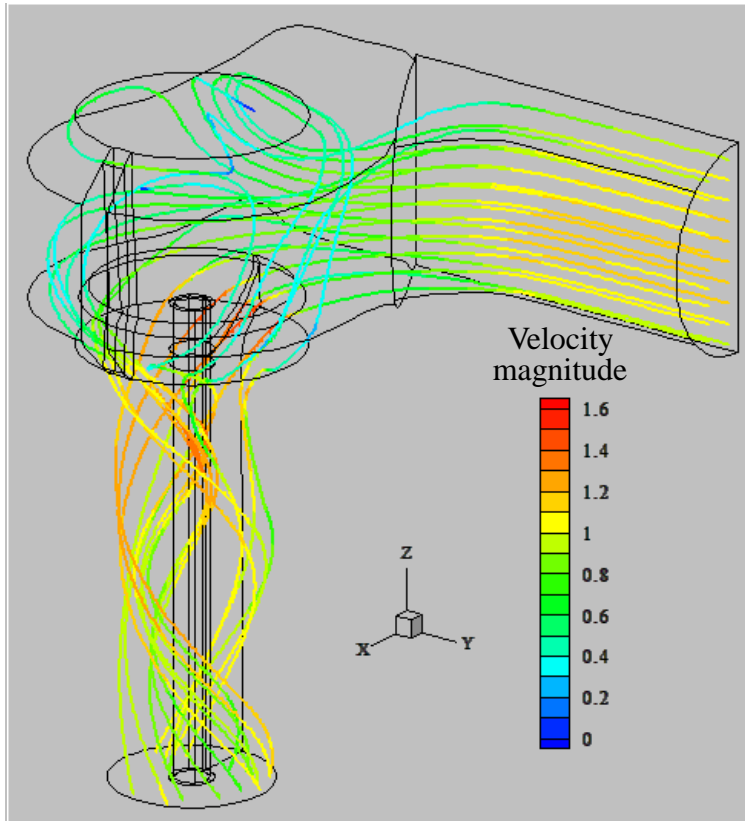


Сетка 3x10⁶

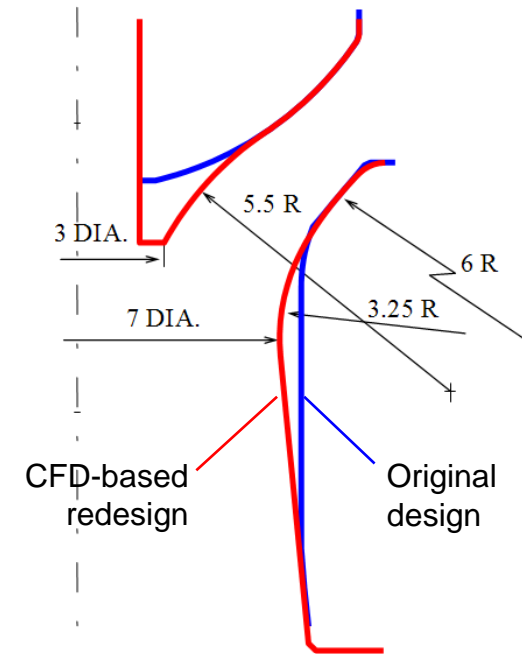
Conceptual Design of a Large Steam Turbine Control Valve (CV)



CV Seat and Disk Redesign

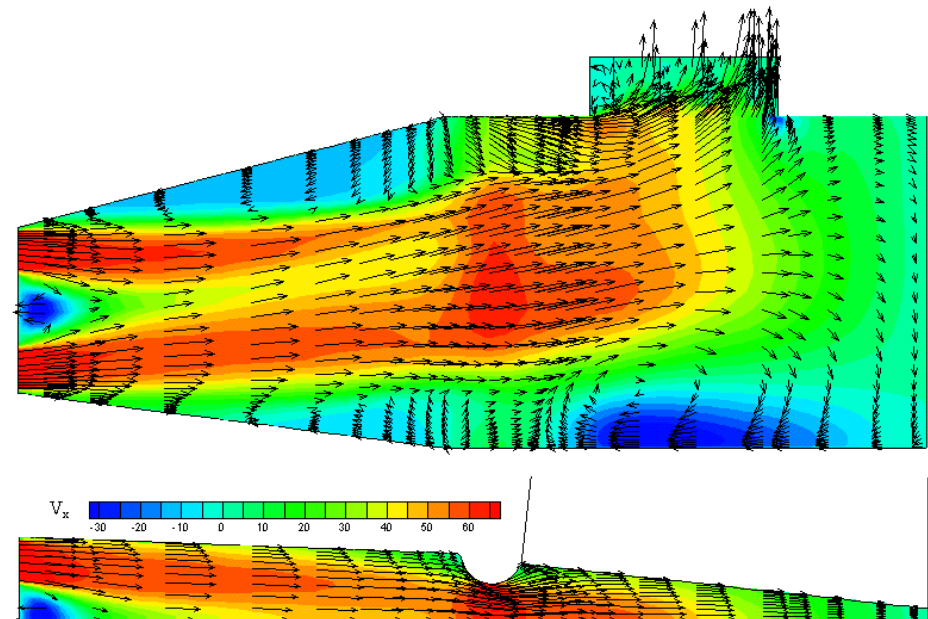
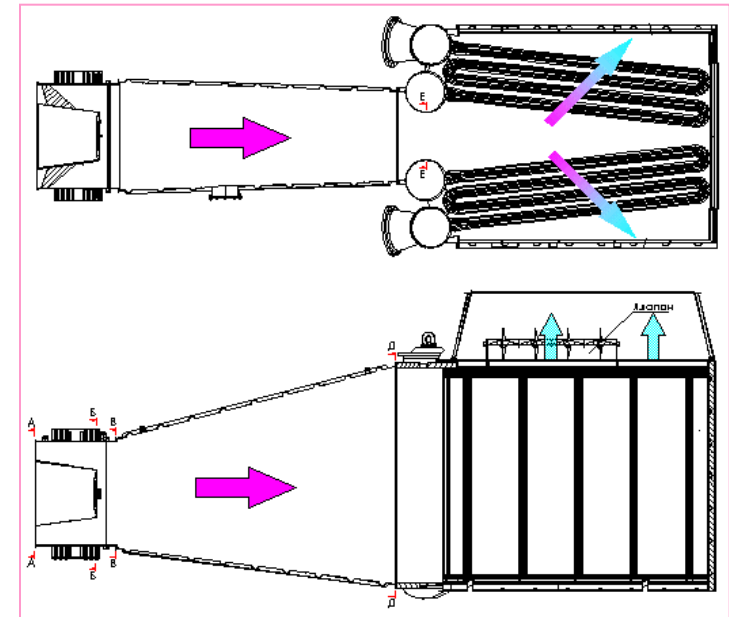
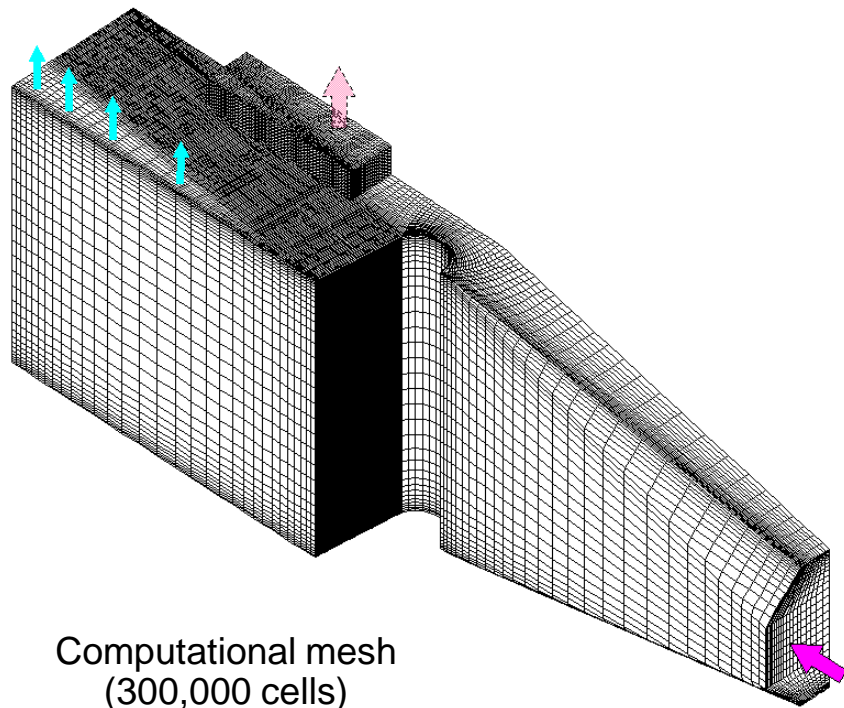


Streamline Patterns within the Original Valve



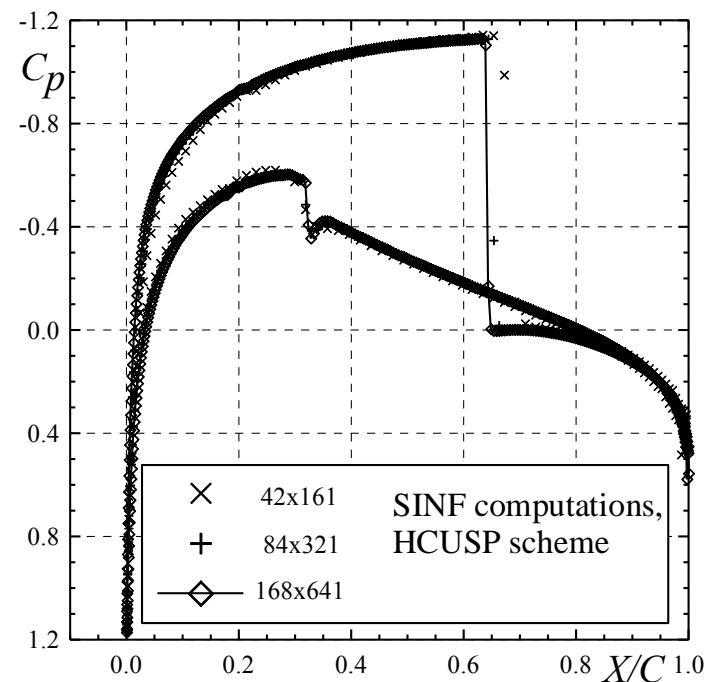
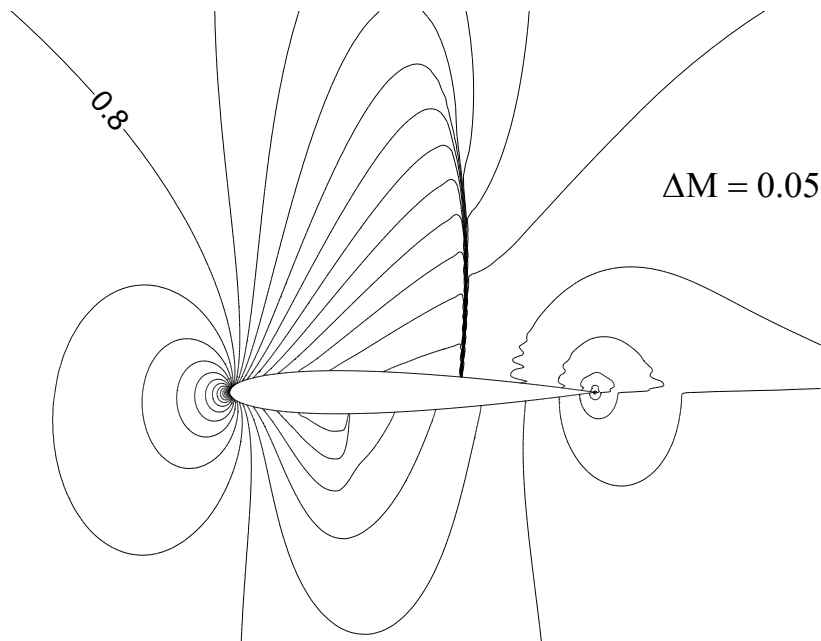
Section of flow path	$\Delta p^*/p_0, \%$	
	CFD, SPSPU	Exp.
Upstream of the strainer	0.54	0.54
Downstream of the strainer	0.81	0.79
Inlet to the CV chest	1.61	1.84
4.5 m downstream of the CV	2.97	2.88
Redesigned Seat and Disk	2.56	

CFD-analysis of 3D flow and pressure losses in a gas-turbine-unit air-heater



SINF code computations, July 2002

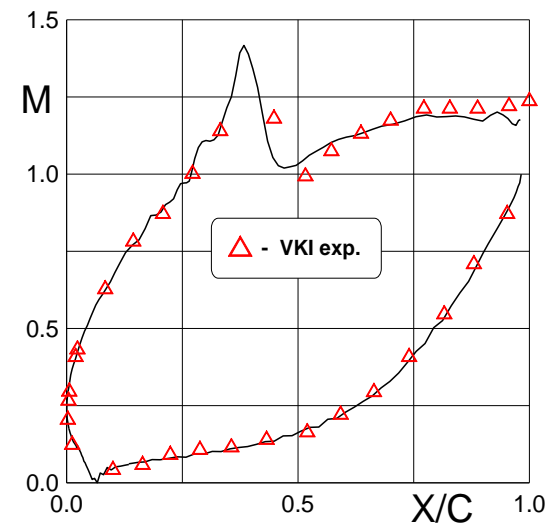
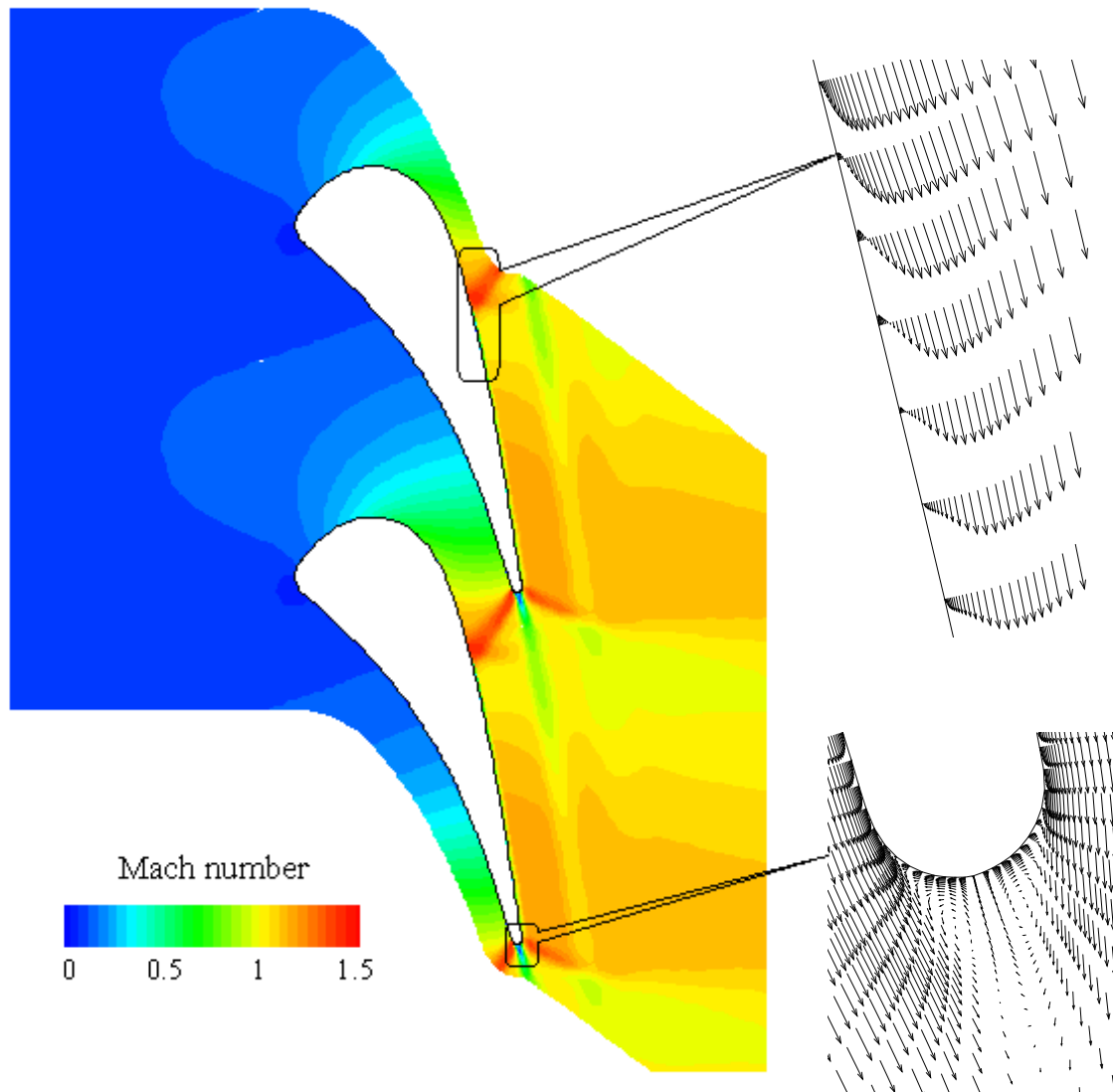
Euler equation solution for transonic flow around the NACA-0012 airfoil at $M_\infty=0.8$ and $\alpha=1.25^\circ$



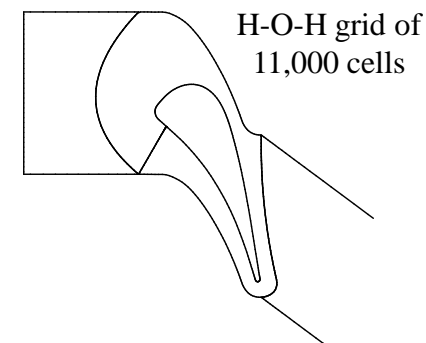
Data source	O-type grid	C_L	C_D
SINF code	42x161	0.3717	0.02716
Same	84x321	0.3577	0.02286
Same	164x641	0.3569	0.02224
Swanson, Radespiel and Turkel, <i>AIAA-Pap. No 97-1945</i> , 1997	128x768	0.3582	0.02278

Numerical simulation of transonic turbine cascade flow

(H-CUSP 2nd-order scheme; Spalart-Allmaras turbulence model; $Re=10^6$)

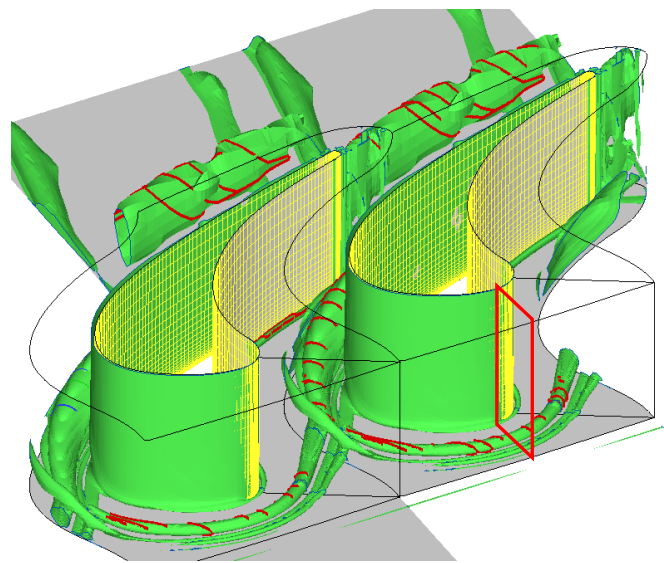


Pressure distribution over the blade (isentropic M)



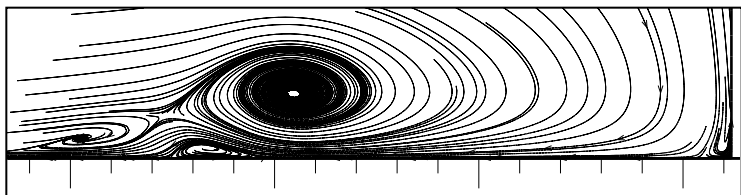
Вихревые структуры и теплообмен в турбинных решетках

Решетка NASA GRC

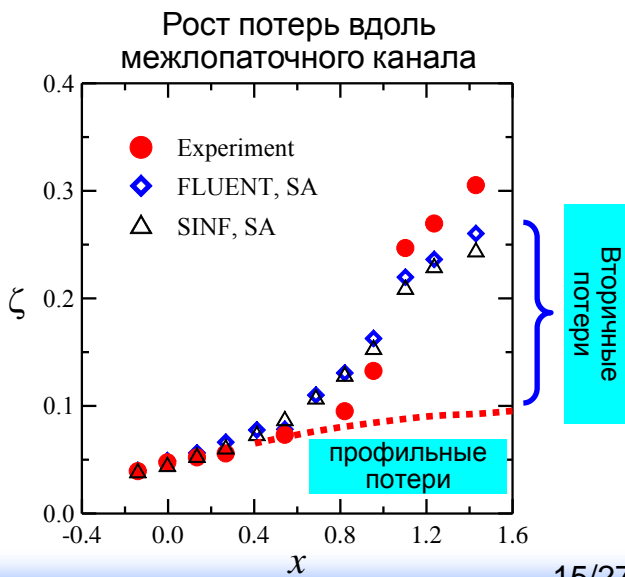
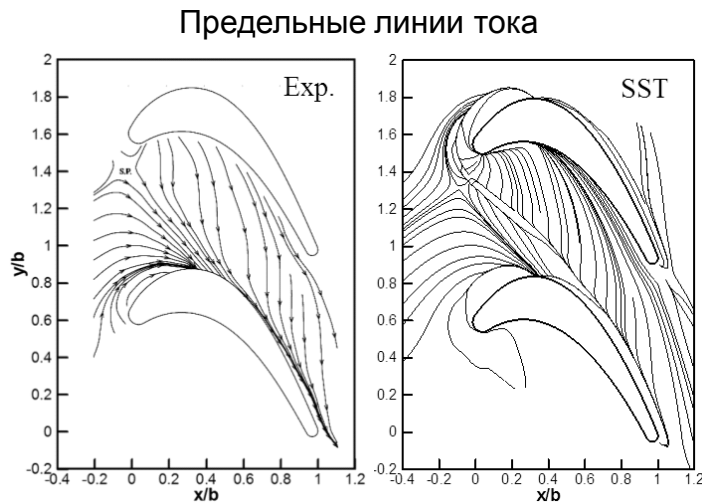
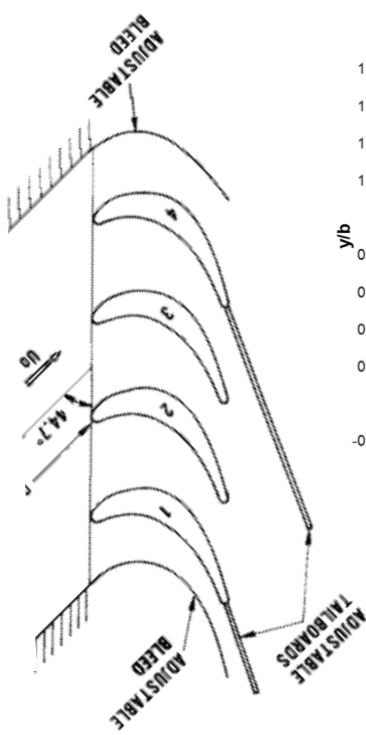


$$Q = -\frac{1}{2}u_{i/j}u_{j/i} = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|s\|^2) > 0$$

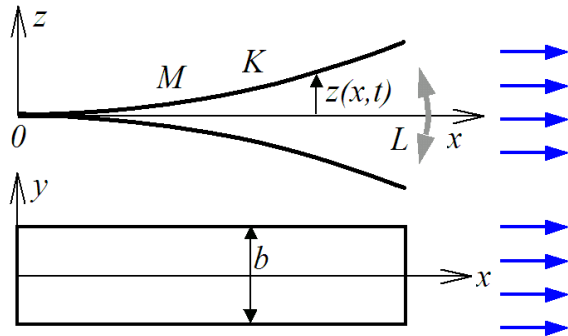
Сечение в области формирования подковообразного вихря



Решетка Langston



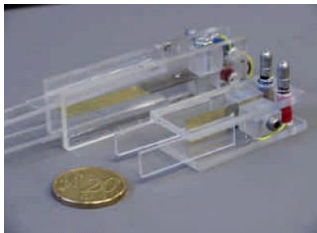
Течение, индуцированное колебаниями упругой пластины пьезоventилятора (деформируемые сетки + аэроупругость)



FV-ALE formulation
(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho (\vec{v} - \vec{v}_b) \cdot \vec{n} dS = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \int_S \rho \vec{v} ((\vec{v} - \vec{v}_b) \cdot \vec{n}) dS = \int_S (\underline{\underline{\tau}} \cdot \vec{n} + p \vec{n}) dS$$



Расчет движения (деформации) пластины

$$M \ddot{z} + K z_x^{(IV)} = q(x, t)$$

$$\ddot{\bar{z}} + K^* \bar{z}_x^{(IV)} = \frac{\bar{q}(x, t)}{M^*}, \quad \bar{q} = \frac{2q}{\rho \omega^2 L^4}$$

$$M^* = \frac{M}{\rho L^2}, \quad K^* = \frac{K}{M \omega^2 L^4}, \quad Re = \frac{\omega L^2}{\nu}$$

$$Re = 2 \cdot 10^5; \quad M^* = 10$$

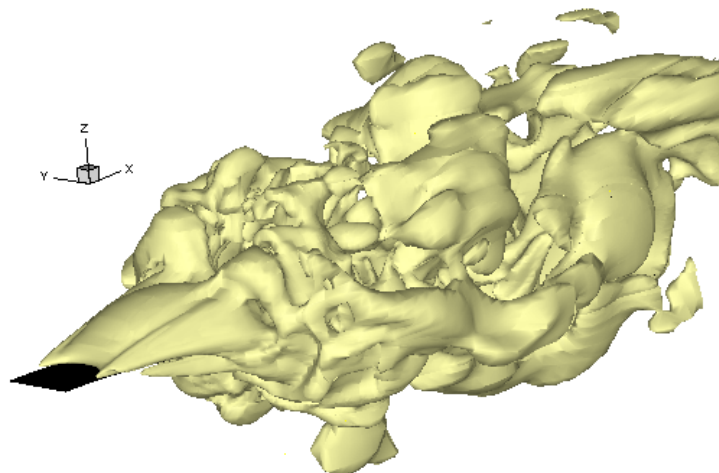
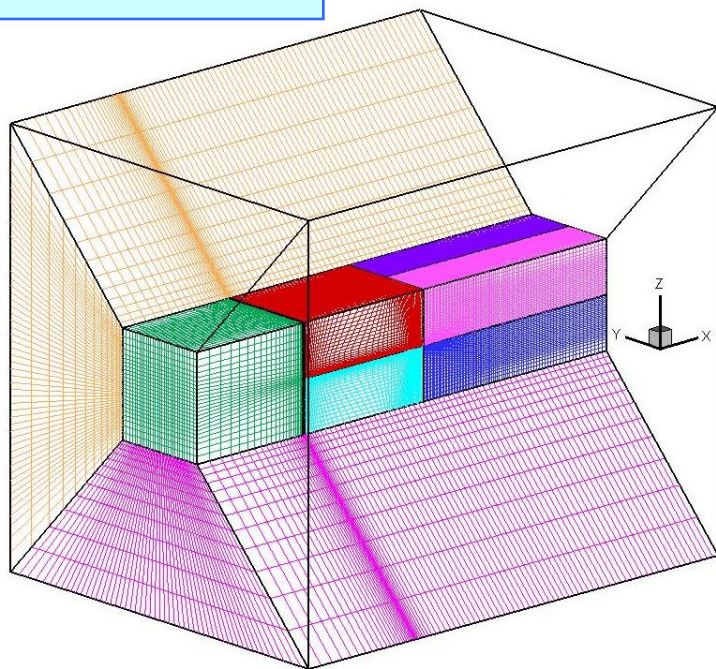
$$K^* = 0.0809 \text{ (1st mode)}$$

$$b = 0.25L; \quad Z_{max} \approx 0.1L$$

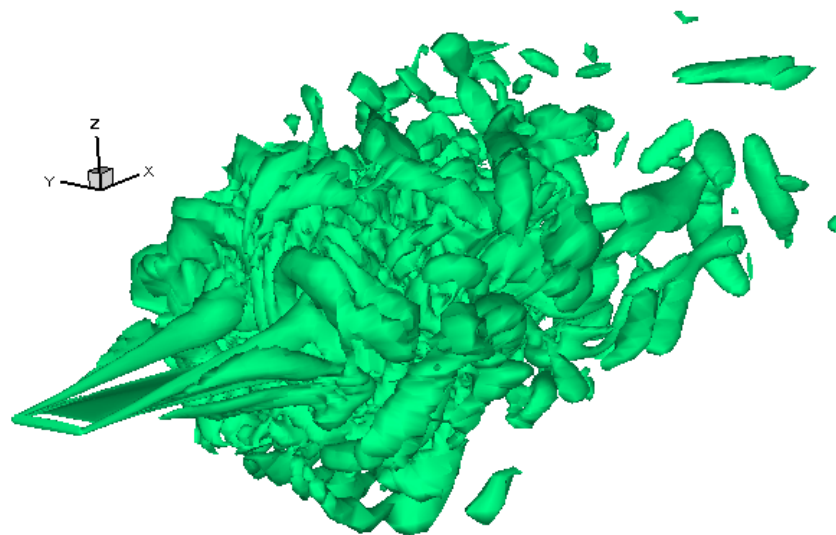
Течение, индуцированное колебаниями упругой пластины пьезовентилятора

Axial velocity

Domain: $3 \times 3 \times 4$ L
Grid: 1.5 mln. cells

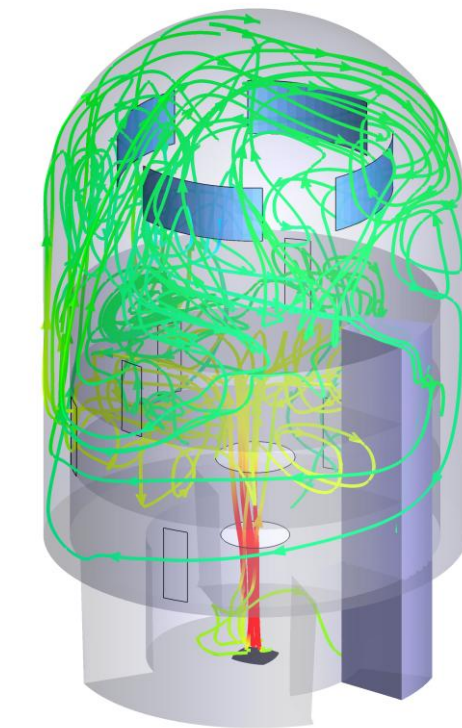
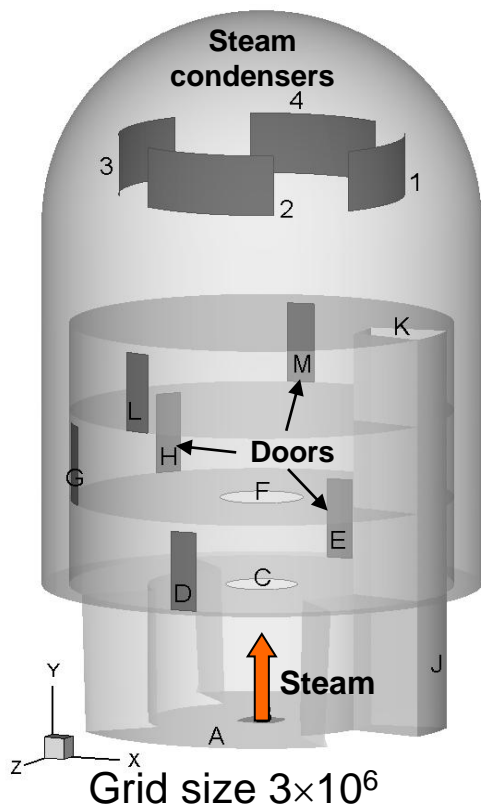


Q - criterion

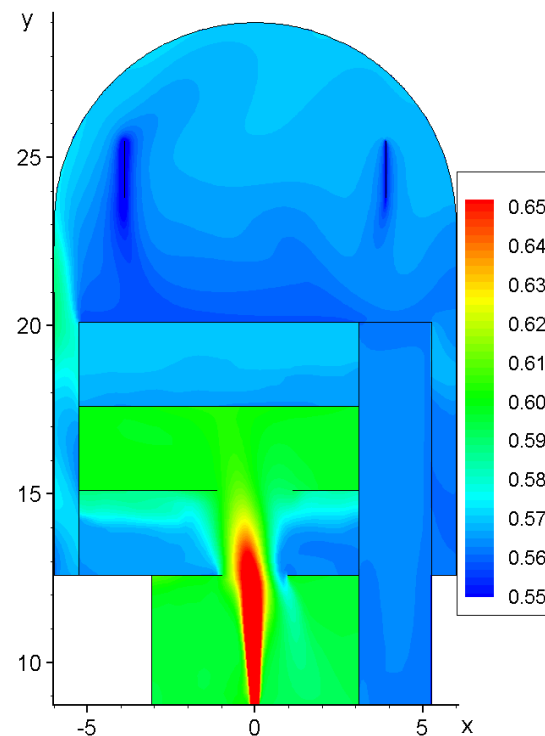


Тепломассоперенос в модели контейнмента АЭС

в условиях, типичных для проектной аварии



Streamlines (temperature)

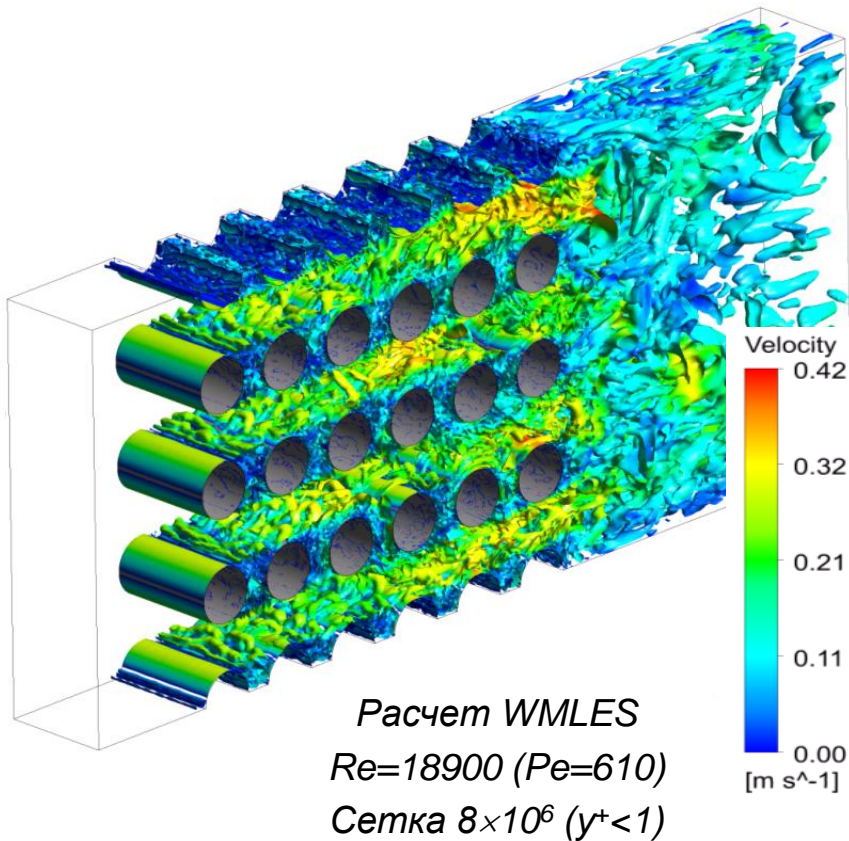


Steam mass fraction

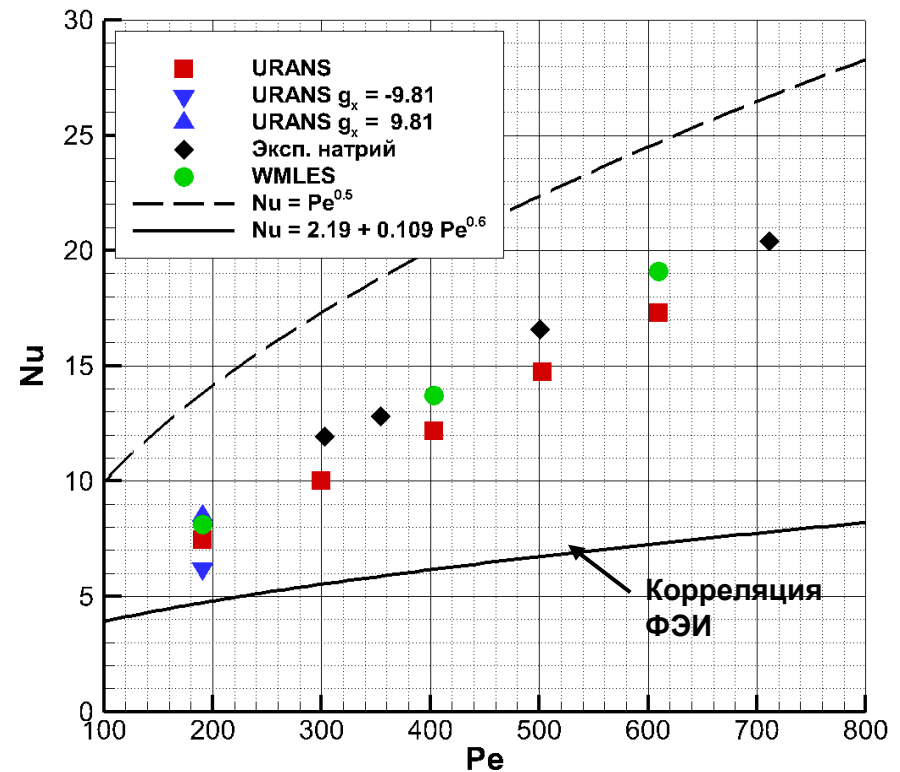
Value	Experiment	CFD
Total heat flow, kW	316	310
Pressure, kPa	374 ± 2	370
Temperature, °C	122 ± 2	120

Теплообмен сплава Рb-Vi в поперечно обтекаемом пучке труб

Изоповерхность Q-критерия
окрашенная по скорости потока



Расчетные и экспериментальные
данные по числу Нуссельта

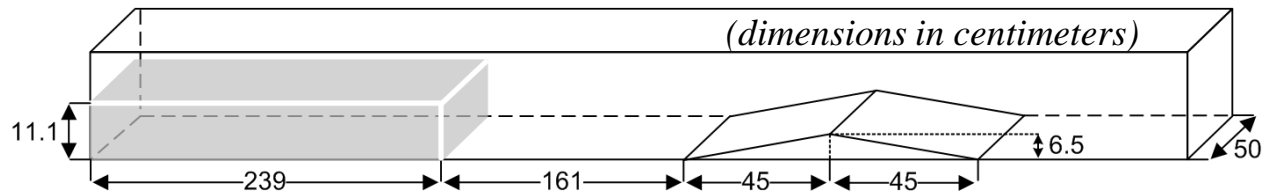


Последние достижения (2014-2015г)

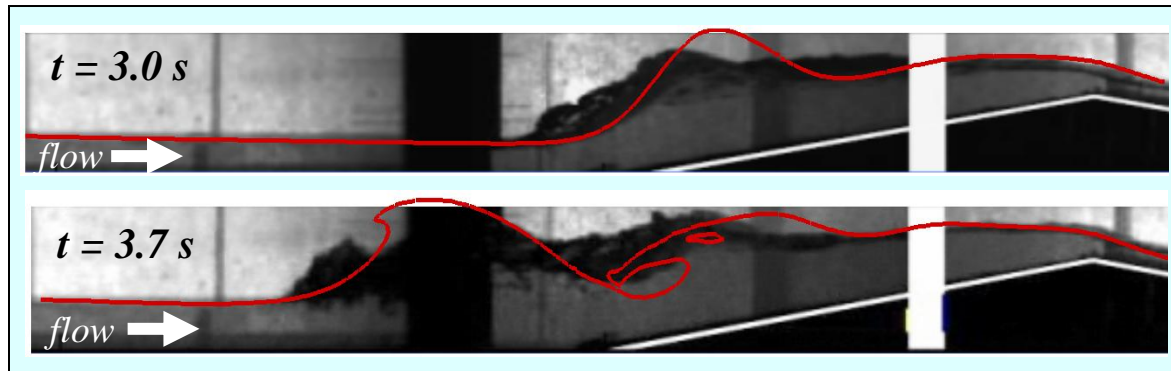
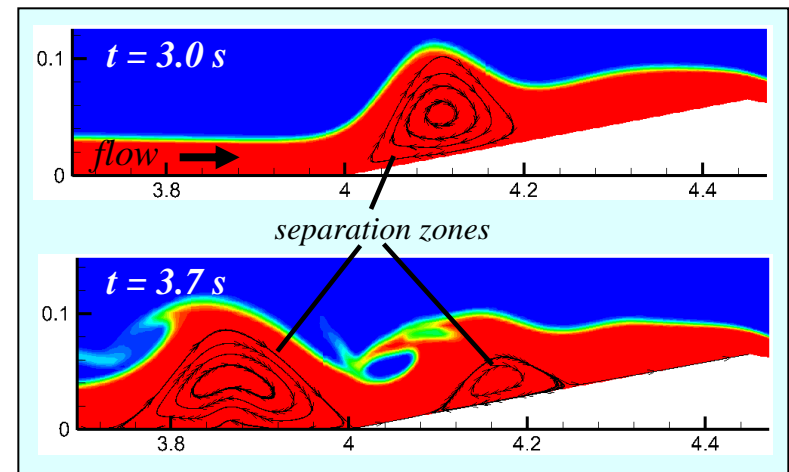
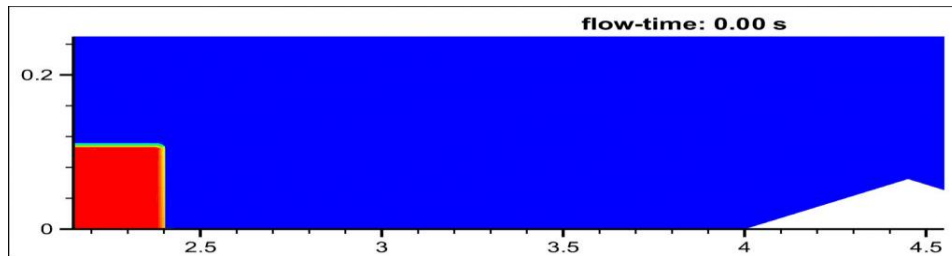
Течения со свободной поверхностью (метод VOF)

Triangular obstacle test case

Experimental setup :
(Soares-Fraza, 2007)



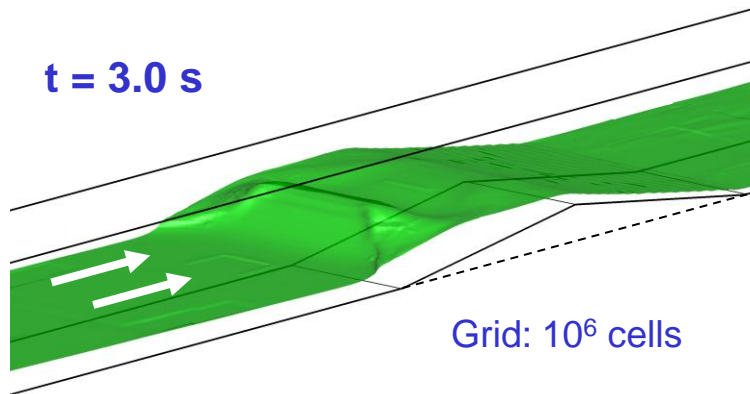
Results of 2D simulation ($Y^+ < 1$):



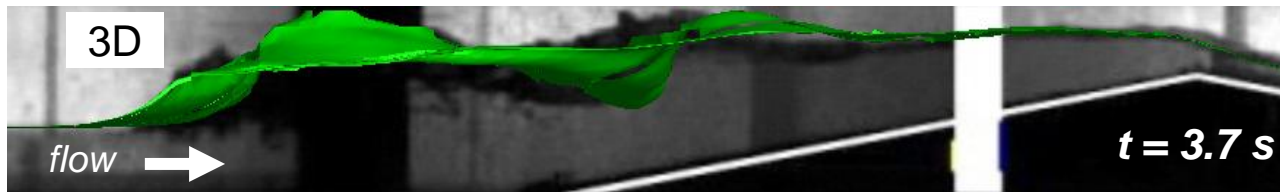
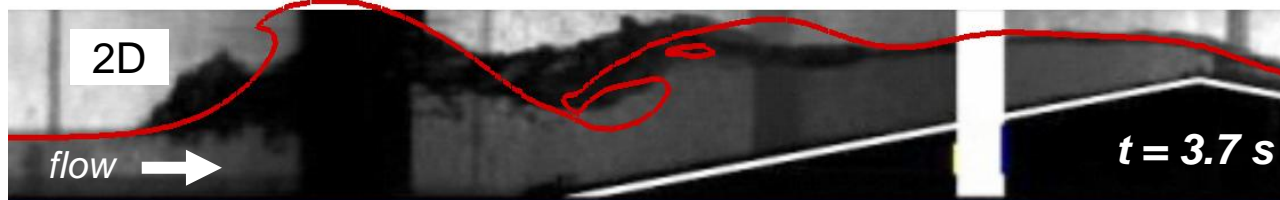
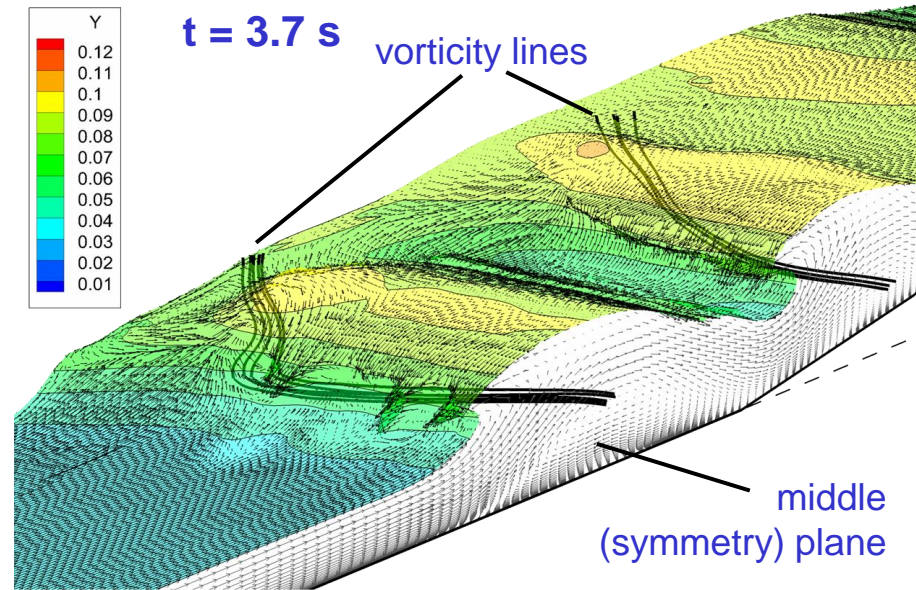
Wall friction effects are well pronounced:

- several separation zones can arise
- these zones lead to formation of «hills» on free surface

Triangular obstacle test case: 3D computation



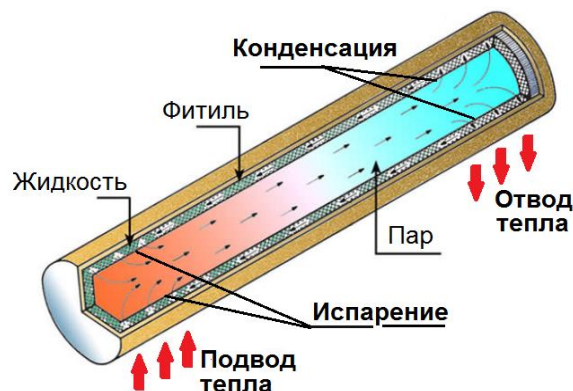
3D-effects are very pronounced



Much better agreement with the experiments is achieved on the base of 3D formulation

3D моделирование сопряженного теплопереноса в тепловых трубах

Аксиальные ТТ

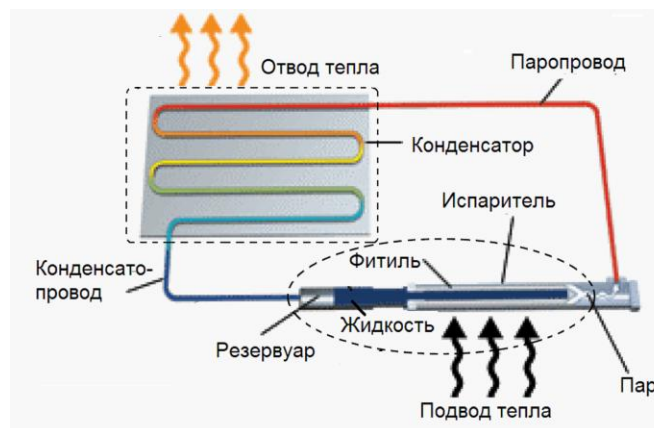
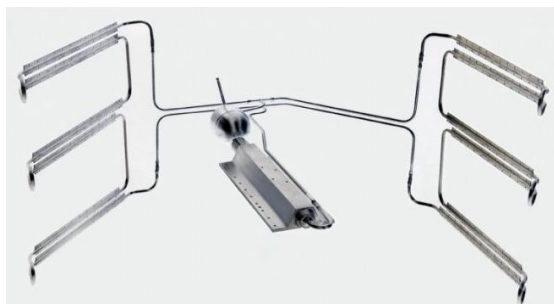


Пористый фитиль



Канавчатый фитиль

Контурные ТТ

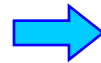


Математическая модель (код СКАТ³)

- 3D Навье-Стокс (жидкость, пар)
 - фильтрация в пористом фитиле
 - анизотропное твердое тело
 - испарение/конденсация на границе раздела фаз; поверхностное натяжение; сопряженный теплообмен
- } в любых сочетаниях

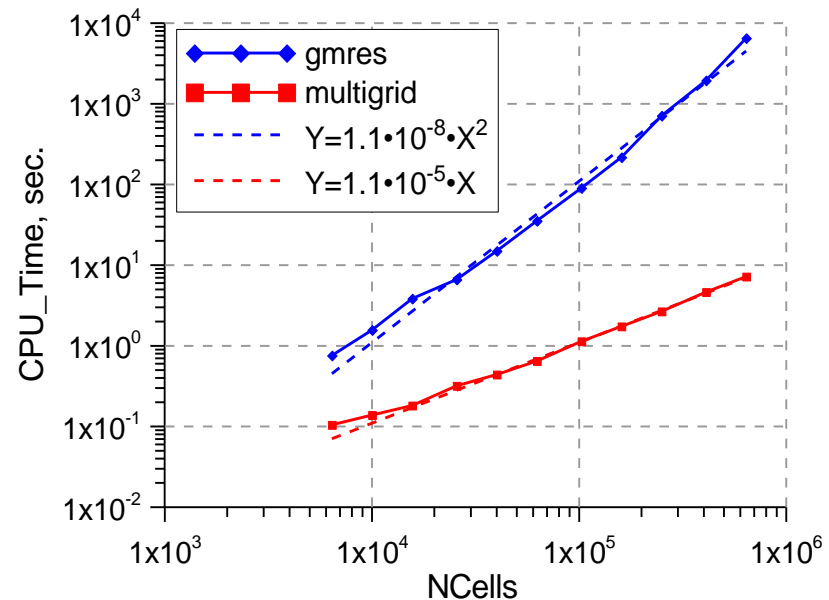
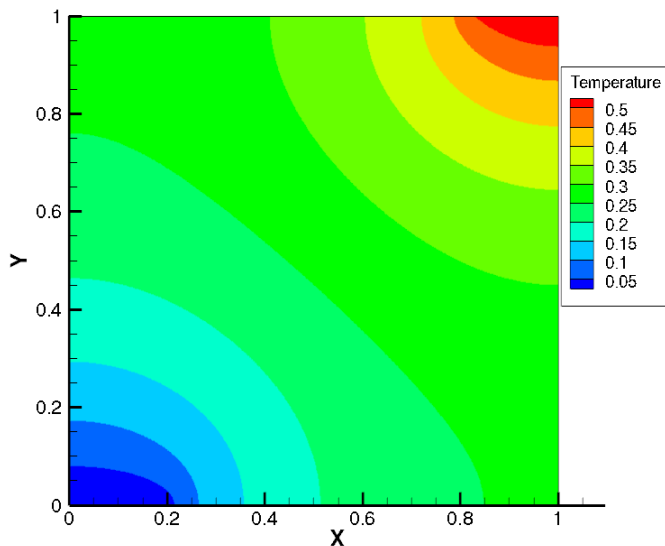
Многосеточный метод для решения уравнения Пуассона

Проблема! Долго решается
уравнение теплопроводности



Разработан многосеточный
метод на основе оригинального
алгоритма агломерации ячеек
(матрица связей + логика для более
«хороших» агломератов)

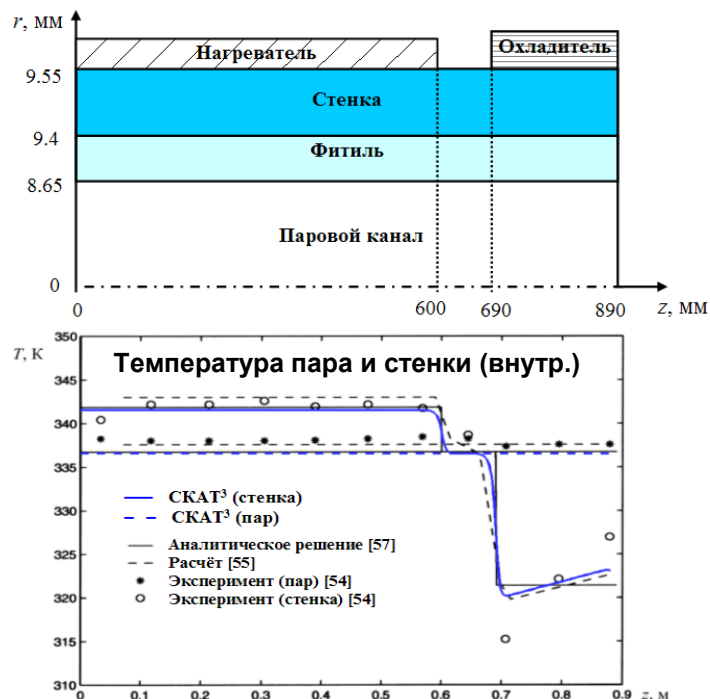
Эффективность многосеточного алгоритма



Расчеты для аксиальных ТТ

Осесимметричный (2D) расчет

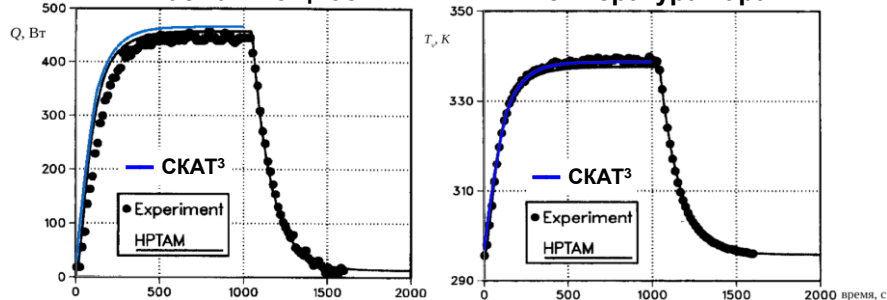
Эксперимент: Huang, El-Genk, Tournier (1993)



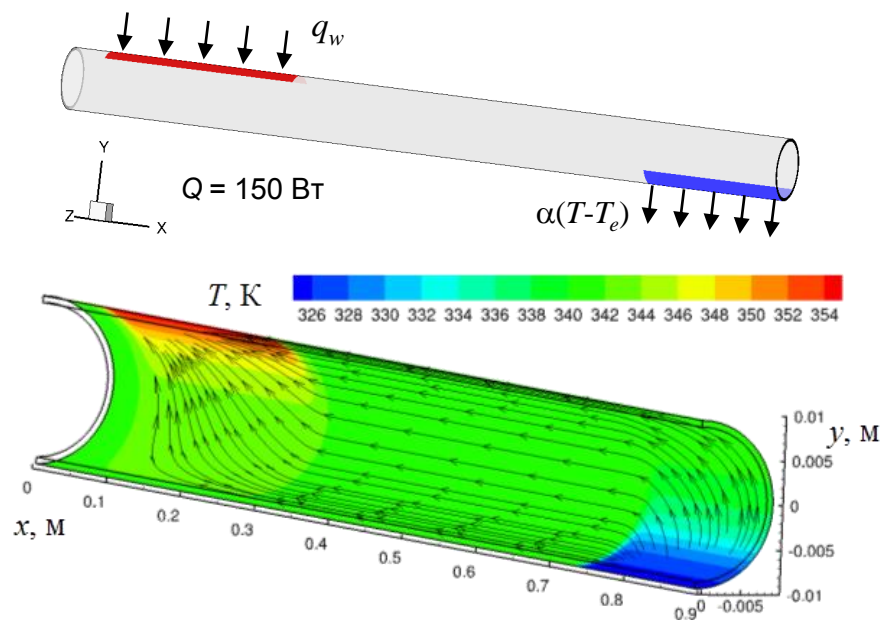
Нестационарный режим

Снимаемая мощность

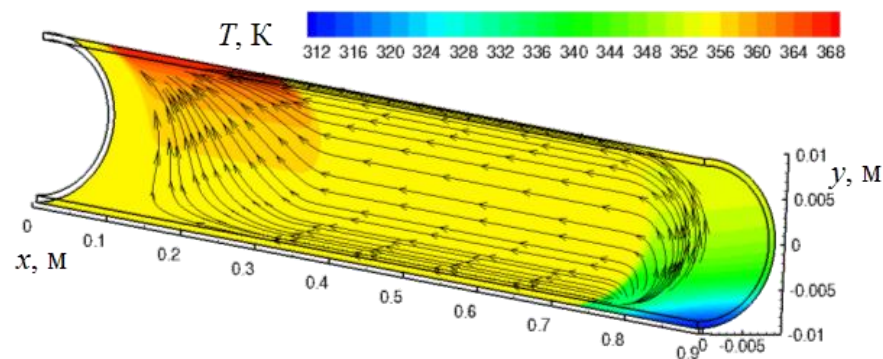
Температура пара



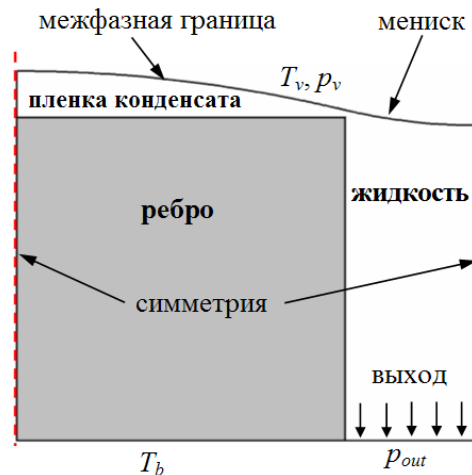
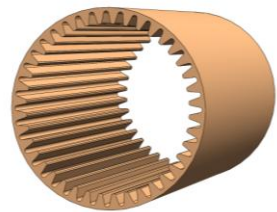
Влияние несимметрии теплоподвода



Влияние «лужи» в зоне конденсации



«Микроуровневое» моделирование тепломассопереноса при конденсации пара на ребрах канавчатого фитиля



Определение формы межфазной границы
(реализация на деформируемых расчетных сетках)

$$(\tilde{p}_l - p_v) + \sigma \cdot \kappa = 0$$

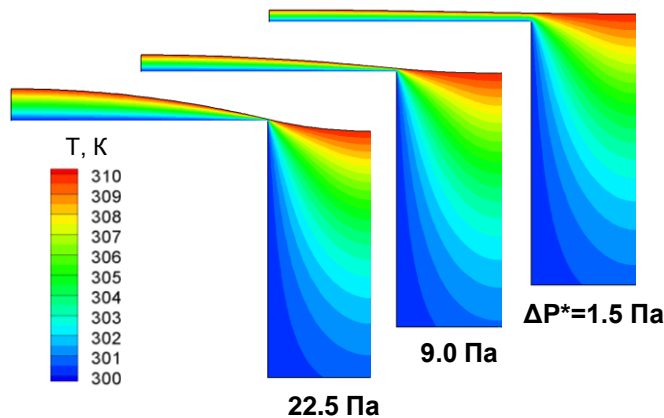
где $\kappa = \frac{d\alpha}{ds}$ $\tilde{p}_l = p_l - \tau_{nn}$

$$\Rightarrow \alpha(s) = \int_0^s \frac{\langle \tilde{p}_l \rangle - \tilde{p}_l}{\sigma} \cdot ds$$

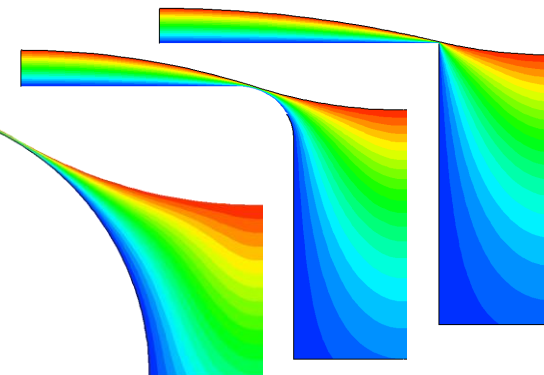
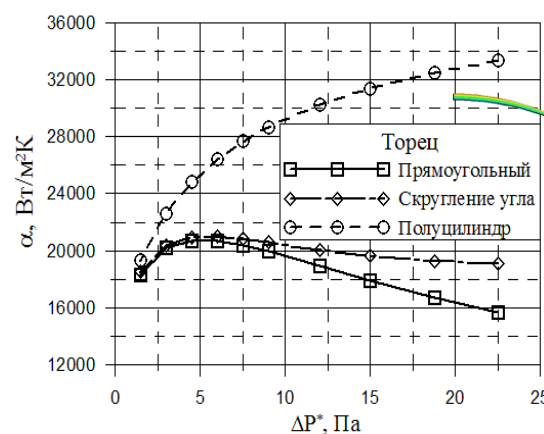
где $\langle \tilde{p}_l \rangle = \frac{1}{S} \int_0^S \tilde{p}_l(s) ds$

Влияние перепада давления пар-жидкость

$$\Delta P^* = p_v - p_{out}$$

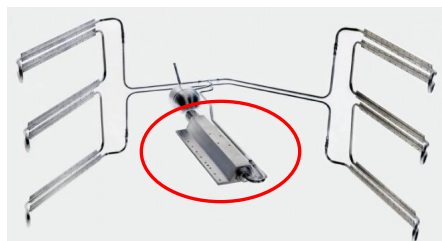


Влияние формы ребра

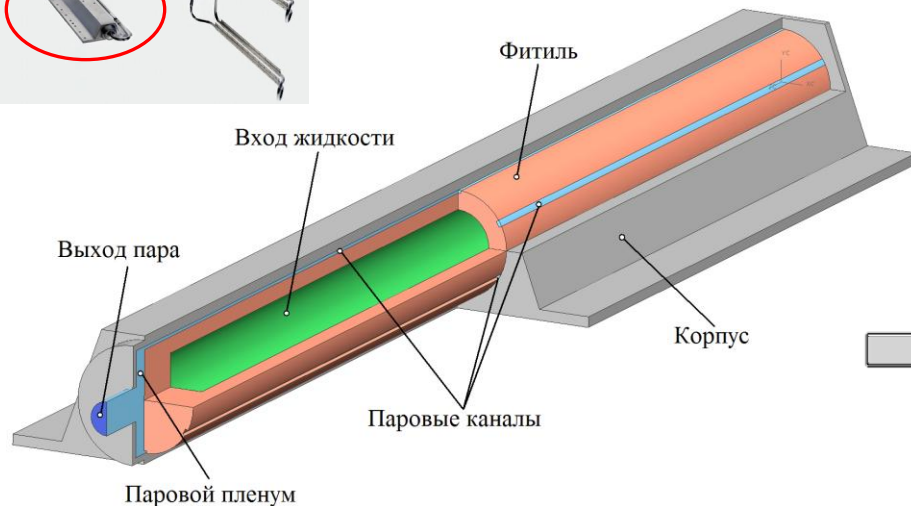


Тепломассоперенос в модели испарителя КТТ

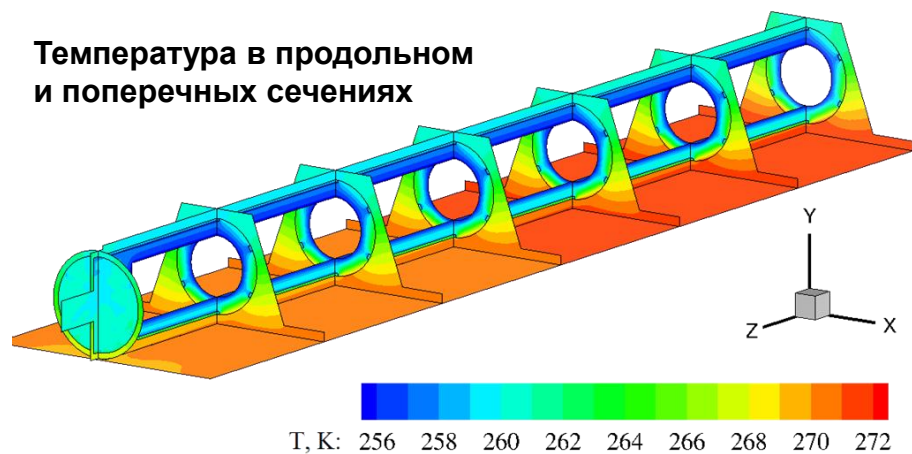
Прототип: СОТР
микроспутника TacSat-4



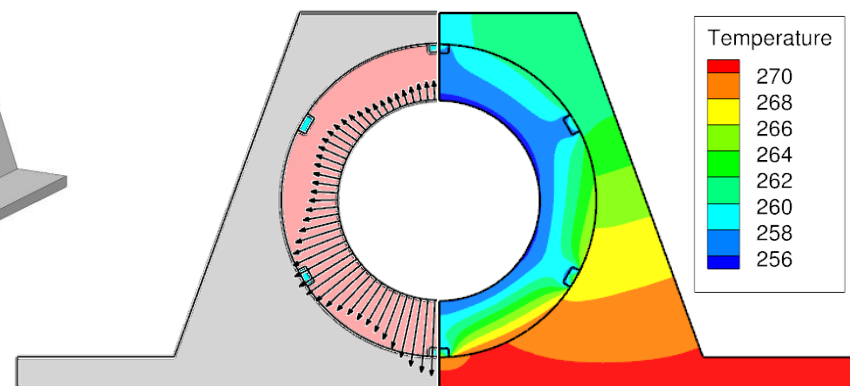
Сетка 1.3×10^6



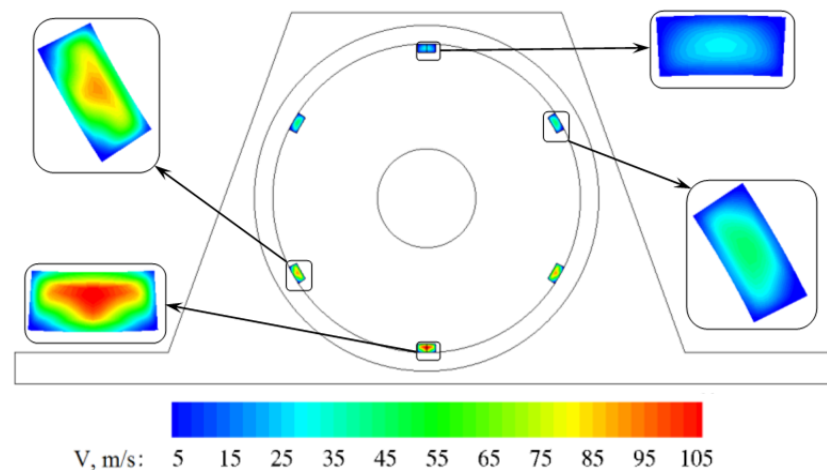
Температура в продольном
и поперечных сечениях



Температура и скорость втекания
жидкости в поперечном сечении



Скорость пара в паровых каналах



Спасибо за внимание!