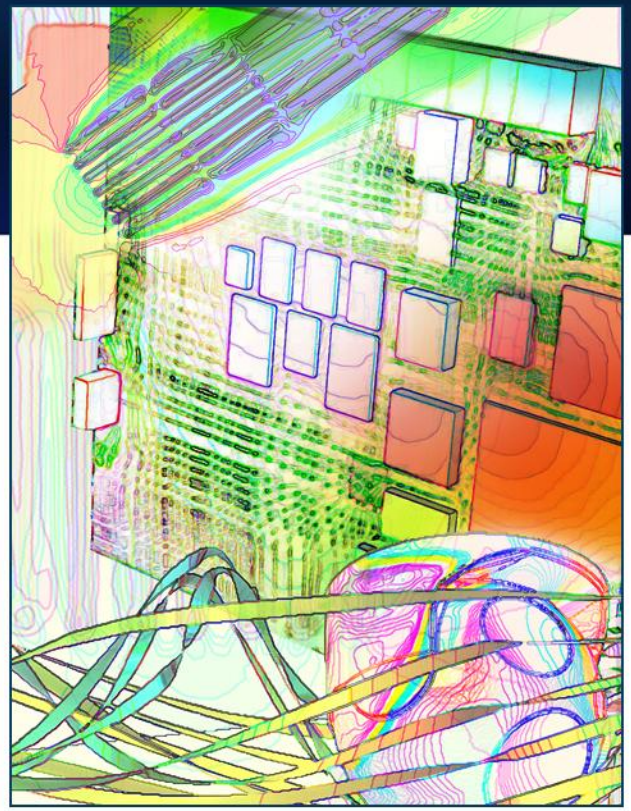
Технология FloEFD (основные принципы и функциональные возможности)



Думнов Геннадий Евгеньевич
Заместитель директора по науке

1 Ноября 2012

Mentor Graphics®

ОСНОВНОЙ МОДУЛЬ

(функциональность для всех продуктов – одинакова)

FLOW SIMULATION *(CFW) для SW*

FloEFD *(EFD.LAB) на базе SW (поставляется совместно с SW OEM)*

FloEFD for V5 *(EFD.V5) для CATIA*

FloEFD for Creo *(EFD.Pro) для Creo*

FloEFD for NX *для Siemens NX*

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МОДУЛИ

(поставляются только для FloEFD продуктов)

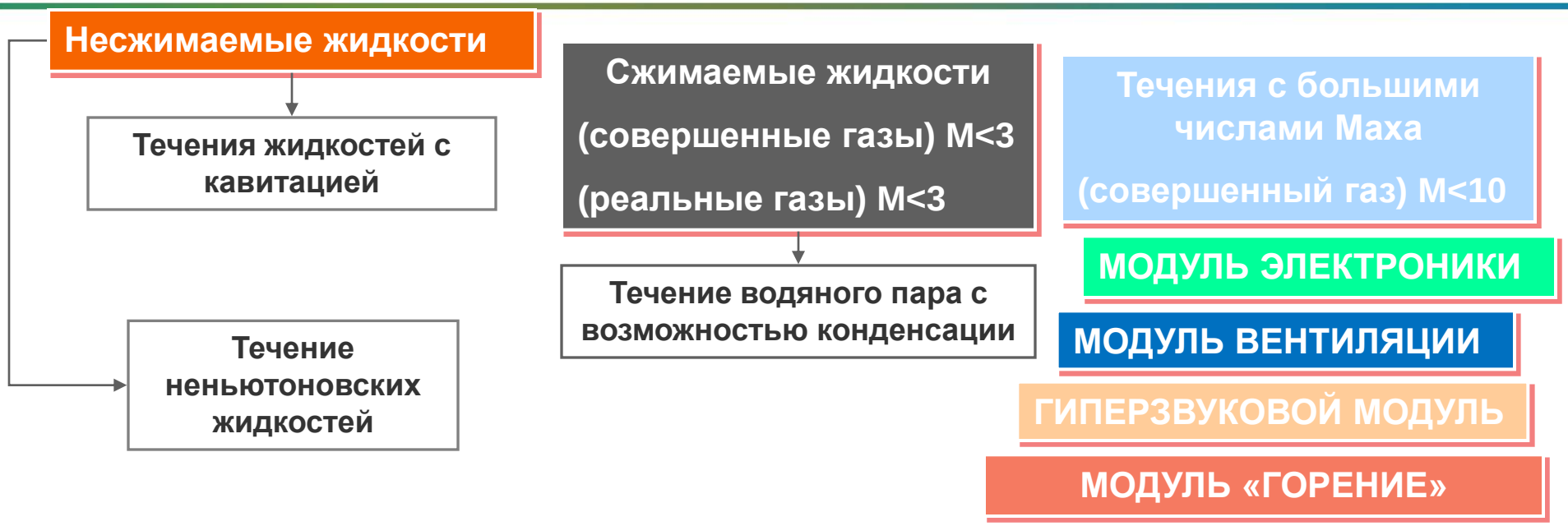
***Модуль Electronics –* «Электроника»**

***Модуль Adv CFD –* «Гиперзвук и Горение»**

***Модуль –* «Вентиляция»**

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ FloEFD ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ОПЦИИ:

- стационарный или нестационарный расчет
- теплопроводность в жидкостях и твердых телах (изотропная и анизотропная)
- радиационный теплообмен между телами, полупрозрачные тела
- конвекция и естественная конвекция
- вращение (турбины, насосы, вентиляторы)
- движение частиц
- «пассивный» скаляр

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ УПРОЩЕННЫЕ МОДЕЛИ:

- вентиляторы и теплообменник с вентилятором
- контактное сопротивление (тепловое и электрическое)
- термо-электрический элемент (TEC)
- пористые среды и перфорированные пластины

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Основные решаемые уравнения

- *Уравнения неразрывности, движения и энергии*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i$$

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial P}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho\varepsilon + S_i u_i + Q_H$$

$$H = h + \tfrac{1}{2} u_i u_i \qquad \tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}$$

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

- *Уравнения для турбулентной энергии и диссипации турбулентности*

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k)=\frac{\partial}{\partial x_i}((\mu+\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_i})+S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_i}((\mu+\mu_t)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i})+S_\varepsilon$$

$$S_k=\tau_{ij}^R\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\varepsilon+\mu_t P_B \qquad S_\varepsilon=C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}(f_1\tau_{ij}^R\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\mu_t C_B P_B)-C_{\varepsilon 2}f_2\frac{\rho\varepsilon^2}{k}$$

$$P_B=-\frac{g_i}{\sigma_B\rho}\frac{\partial\rho}{\partial x_i} \quad \sigma_B=0.9 \quad C_B=\frac{1\ при\ P_B>0}{0\ в\ остальных\ случаях}$$

$$\mu_t=f_\mu C_\mu\frac{\rho k^2}{\varepsilon}$$

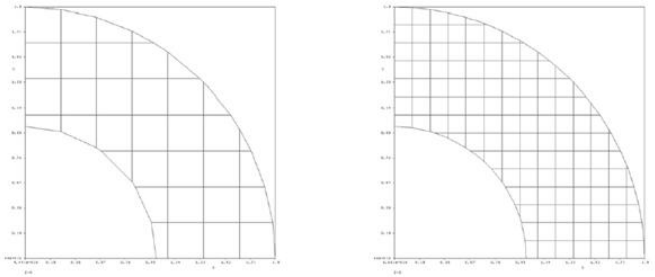
$$f_\mu=(1-\exp(-0.025R_y))^2(1+\frac{20.5}{R_T}) \quad R_T=\frac{\rho k^2}{\mu\varepsilon} \quad R_y=\frac{\rho\sqrt{k}y}{\mu}$$

$$f_1=1+(\frac{0.05}{f_\mu})^3 \quad f_2=1-\exp(-R_T^2) \quad C_\mu=0.09 \quad C_{\varepsilon 1}=1.44 \quad C_{\varepsilon 2}=1.92 \quad \sigma_\varepsilon=1.3 \quad \sigma_k=1$$

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

НЕСКОЛЬКО СЛОВ О СЕТКЕ

• *Уравнения решаются на неструктурированных адаптированных к телу прямоугольных сетках*



(a) N_{cells}=138 (b) N_{cells}=507

(c) N_{cells}=1928 (d) N_{cells}=7549

Преимущества

• Простота записи уравнений

• Возможность описания геометрии любой сложности

• Возможность построения алгоритма автоматического построения сетки

Недостатки

• Трудности расчета пристеночных течений

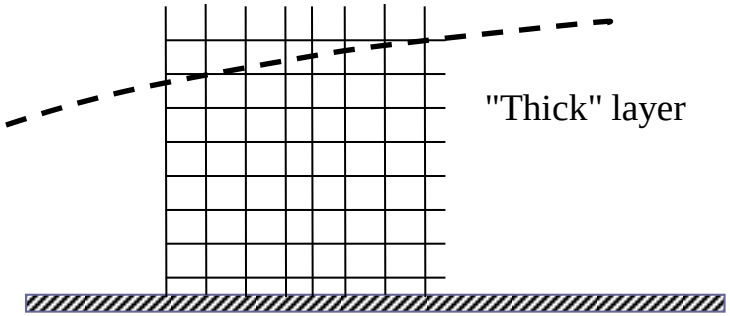
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет течения в пристеночной области

Использование теории пограничного слоя для расчета течений в пристеночной области

Влияние сетки на используемую модель

- Внутри слоя находятся более ~10 ячеек – используется модель “Thick” boundary layer
- Внутри слоя менее 3 ячеек – используется модель “Thin” boundary layer
- Промежуточная ситуация



Сеточная структура вызывает появление разных типов пограничных слоев, что требует различных методов их решения

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет течения в пристеночной области (продолжение)

Используются два типа пристеночных функций:

• при $\delta<3h$ (δ - толщина пограничного слоя, h – размер пристеночной ячейки) для определения τ_w (напряжения трения) и q_w (теплового потока) используются решения интегральных уравнений пограничного слоя

• при $\delta>10h$ используются стандартные пристеночные функции, основанные на универсальном профиле скоростей Van-Driest

• в промежуточной области используется взвешивание двух решений

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет реальных газов

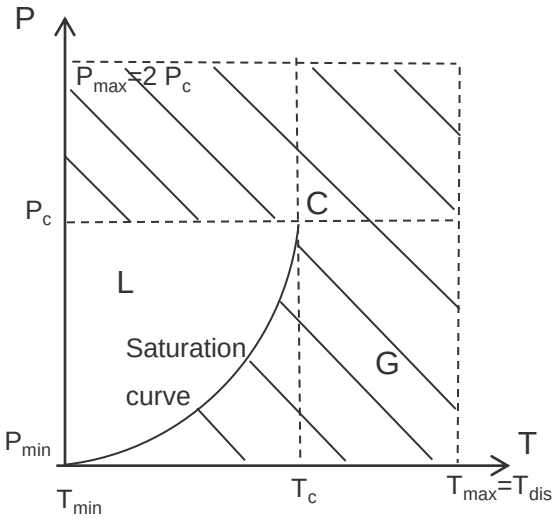
Уравнение состояния Redlich-Kwong и три его модификации используются для моделирования:

- *модификация Wilson*
- *модификация Barnes-King*
- *модификация Soave*

$$P_r = T_r \cdot \left(\frac{1}{Z-b} - \frac{a}{Z(Z+c)} \right)$$

$$P_r = \frac{P}{P_c}, T_r = \frac{T}{T_c}, Z = \frac{VP_c}{R_{univ}T_c}$$

$$a = a(T_r), b = b(T_r), c = c(T_r)$$



Для 13 наиболее распространенных жидкостей используется модифицированное уравнение состояния и расчеты по NIST:

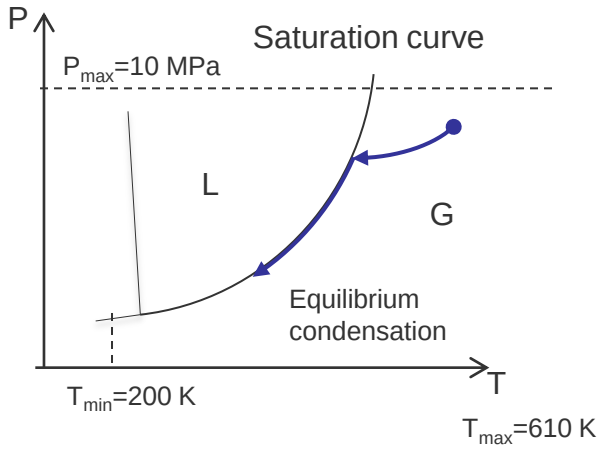
Вода, Двуокись углерода, Метан, Фреон 134a, Фреон RC318, Фреон R123, Фреон R22, Фреон R24, Фреон R245 fa, Азот, Пропан, Окись углерода, Амиак, Кислород

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Течения с фазовыми переходами

Пар с возможностью конденсации

$\rho = \rho(T, P)$



Кавитация (кипение)

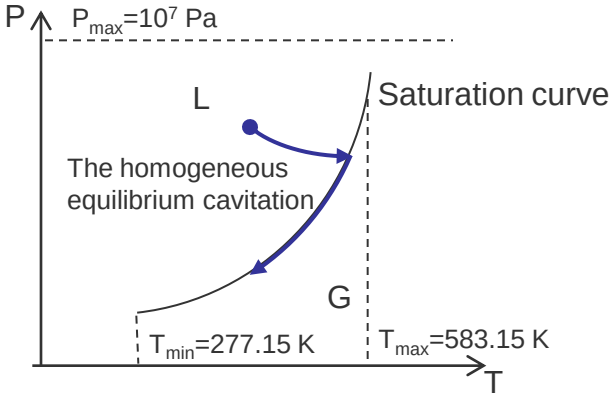
Вода с возможностью вскипания

(кипение, кавитация)

$\rho = \rho(T, P)$

Изотермическая кавитация жидкостей

$\rho = \rho(P),\ T = const$



© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Радиация

В продукте реализованы две модели радиации:

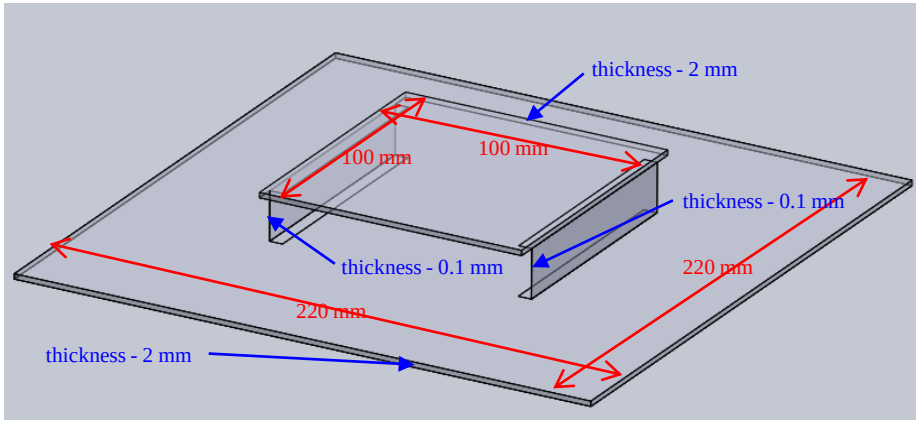
• **Лучевая модель радиации (DTRM)** – из каждой поверхностной сеточной ячейки (или из ячеек объединенных в кластер) в полусферу испускаются лучи. Эти лучи переносят с собой энергию излучения. При попадании одного из лучей на тело, переносимая им энергия или полностью отражается (при условии зеркального отражения), или полностью поглощается (ε=1 – абсолютно черное тело), или полностью диффузно отражается (ε=0 – белое тело), или частично поглощается и диффузно отражается (0<ε<1 – серое тело). Некоторые указанные тела могут быть абсолютно прозрачными. Рассматривается энергия излучения не разделенная по спектру.

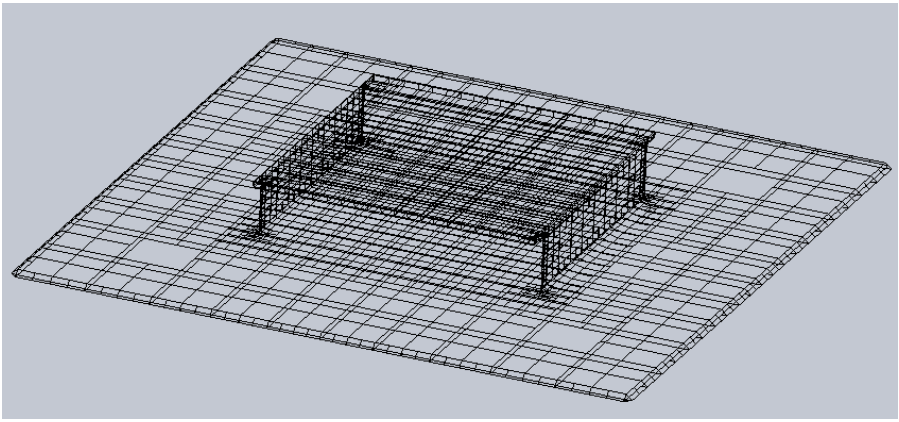
• **Модель дискретных направлений (DO)** – помимо основной расчетной сетки, выделяется ряд пространственных направлений, вдоль которых интегрируется уравнение распространения излучения. При этом, учитывается поглощение излучения в полупрозрачных телах, поглощение при зеркальном отражении, спектральный состав излучения.

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

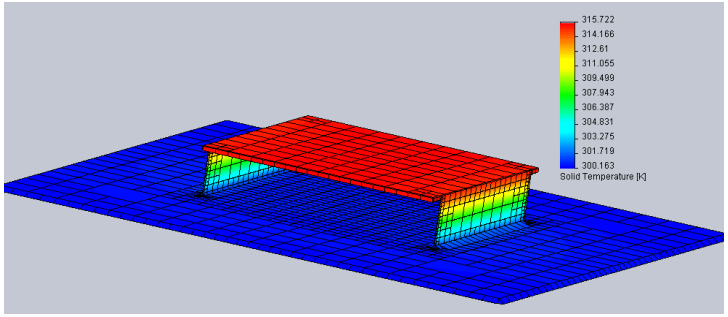
Инженерная технология расчета распространения тепла в тонких стенках

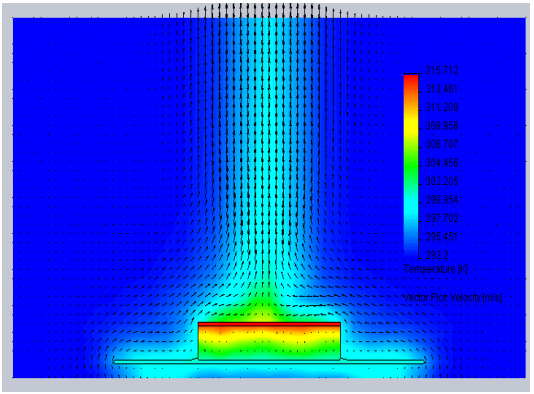
Для проведения тепловых расчетов в тонких стенках, которые не разрешены сеткой, создана специальная технология решения уравнения теплопроводности

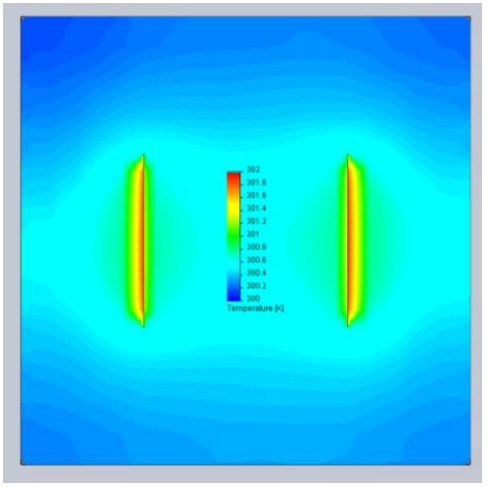




На верхней блоке задан тепловой источник - 5 W



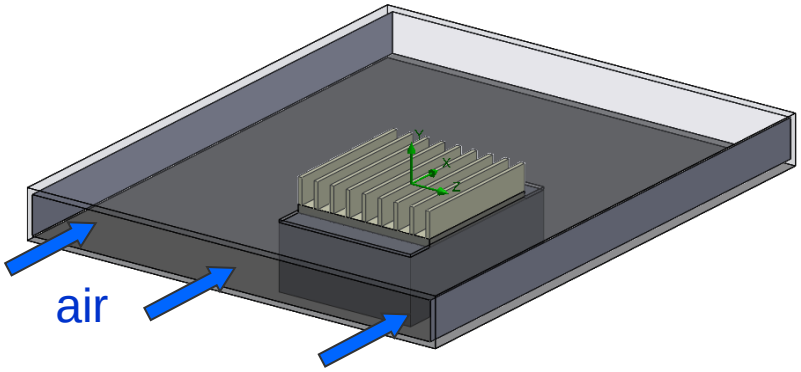


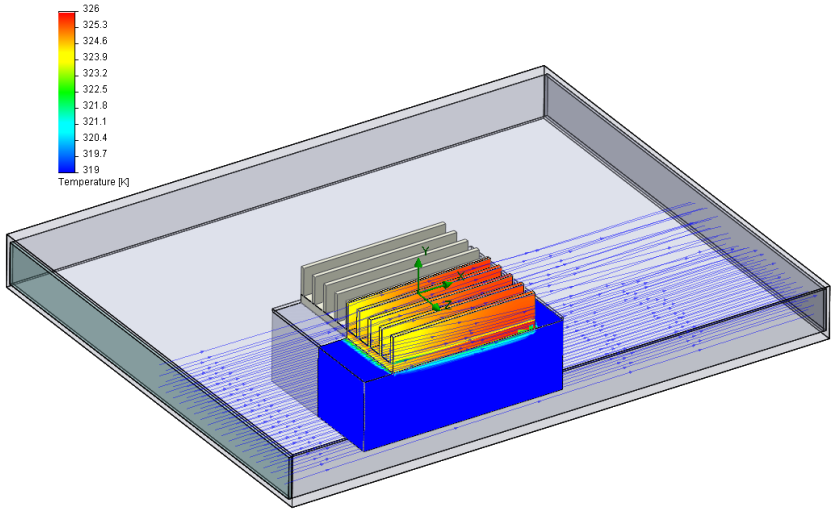


© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

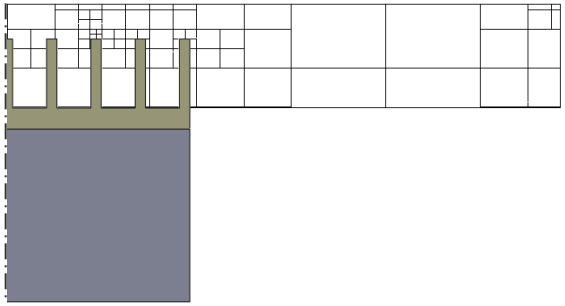
Инженерная технология расчета течения в тонких каналах

Для расчетов течений в каналах, поперечное сечение которых не разрешено сеткой, создана специальная инженерная технология расчета





Computational mesh generated with RRL=1:



V, m/s	0.9		1.3		1.6		1.9	
$R_{t\ exp}$, K/W [1]	3.72		3.20		2.91		2.69	
Mesh resolution	RRL=1*	RRL=5**	RRL=1	RRL=5	RRL=1	RRL=5	RRL=1	RRL=5
$R_{t\ calc}$, K/W	3.714	3.77	3.213	3.22	2.969	2.93	2.78	2.70
δ, %	0.2	1.3	0.4	0.6	2	0.7	3.3	0.3

*** Около 3900 ячеек, ** около 176 000 ячеек**

1. Jonsson, H. and B. Palm, 1998, Thermal and Hydraulic Behavior of Plate Fin and Strip Fin Heat Sinks under Varying Bypass Conditions, Proc. 1998 InterSociety Conf. on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM ´98), IEEE, pp. 96-103, ISBN 0.7803-4475-8

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ

В настоящее время в FloEFD работает равновесная модель горения. Это означает, что при смешении горючего и окислителя происходит химическая реакция, скорость которой – бесконечна, т.е. продукты реагируют до образования равновесного состава.

Чтобы обеспечить возможность расчета предварительно перемешанных смесей разработана модификация равновесной модели с ограничением скорости образования равновесных продуктов сгорания. Для этого, вводится условная

необратимая реакция вида:

$$M_O + M_F \xrightarrow{K(T)} M_p$$

и дополнительное уравнение переноса продуктов этой реакции.

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

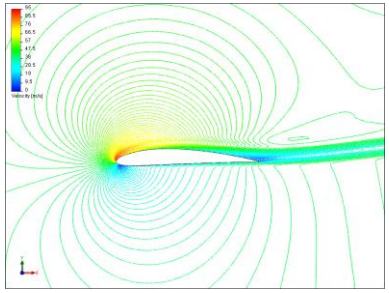
Mentor Graphics®

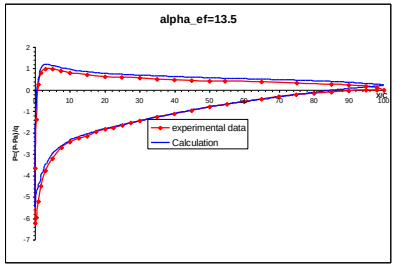
www.mentor.com

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ

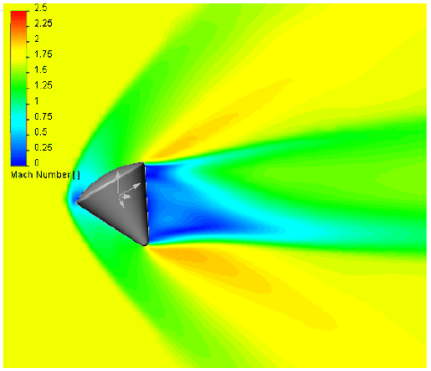
FloEFD РЕШАЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ПОЛЕТА ЛА

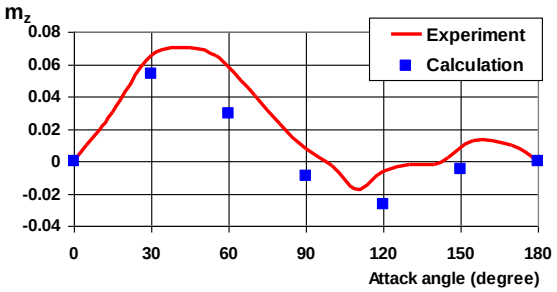
Дозвуковые течения



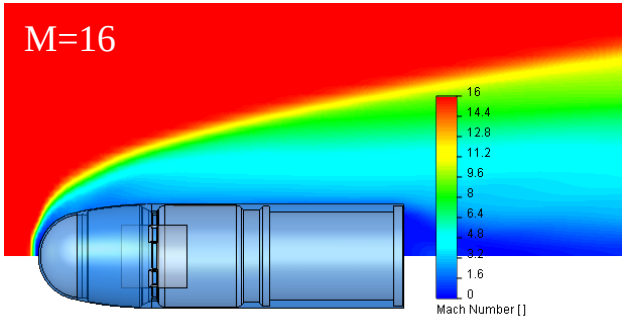


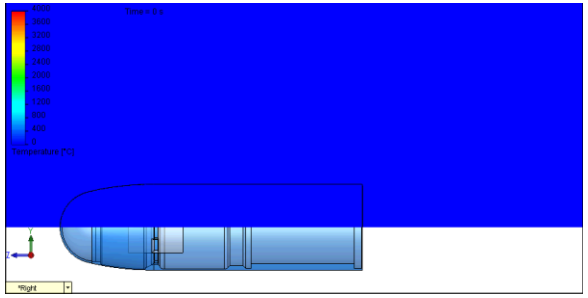
Сверхзвуковые течения





Гиперзвуковые течения



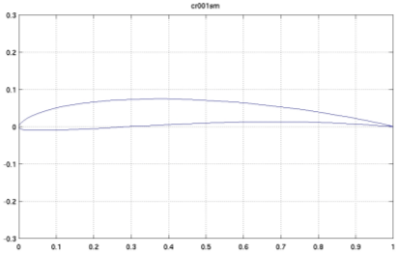


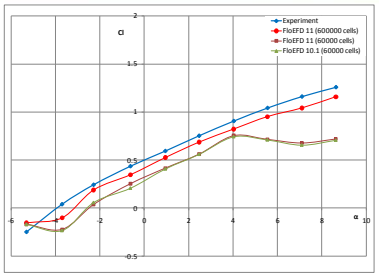
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет обтекания профилей CR-001 и SD 7003

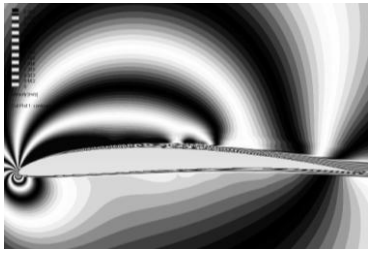
CR-001

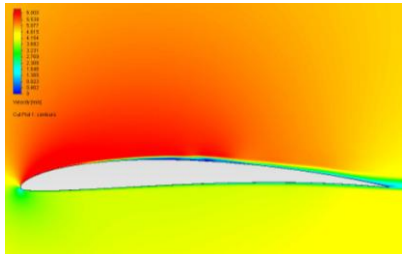
P=101325 Pa, t=20 C.
Re = 298800



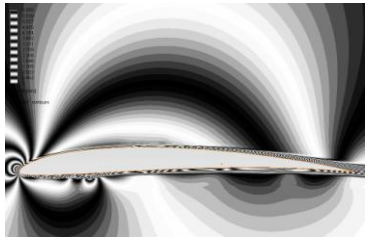


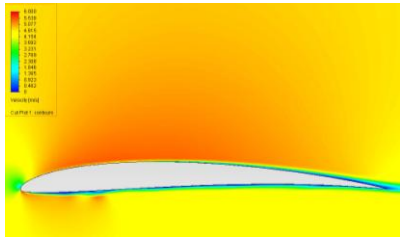
коэффициент подъемной силы от угла атаки для профиля CR-001





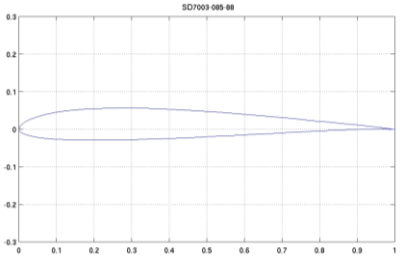
Поле скорости при α=4.03°

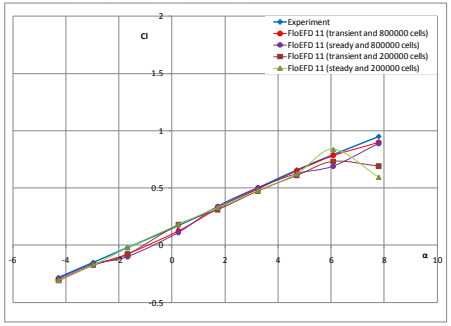




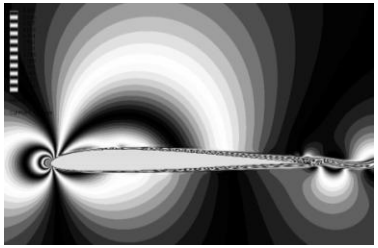
Поле скорости при α=-0.62°

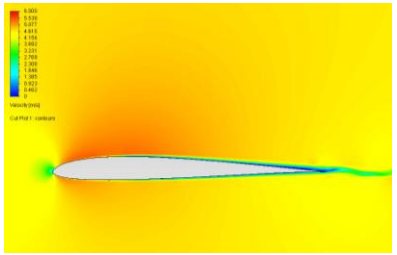
SD 7003



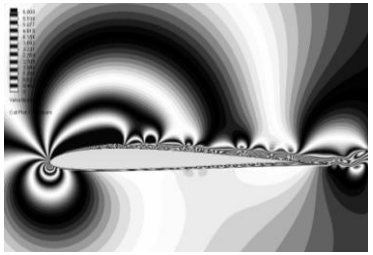


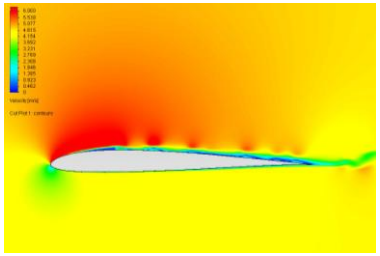
коэффициент подъемной силы от угла атаки для профиля SD 7003





Поле скорости при α=0.24°

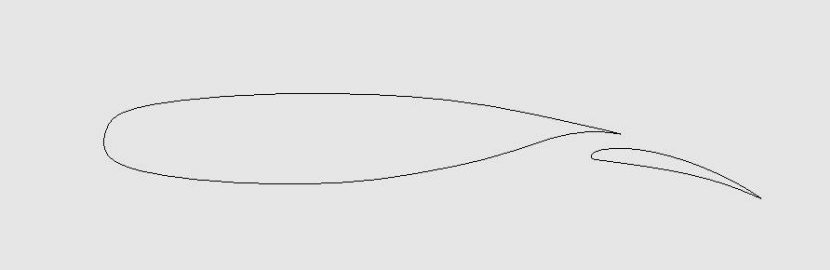




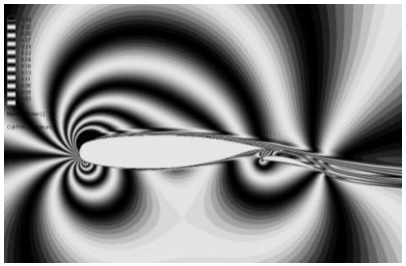
Поле скорости при α=4.71°

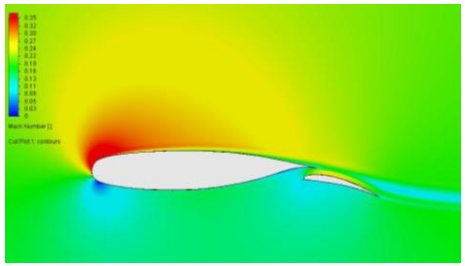
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет обтекания профиля NLR 7301 с закрылком

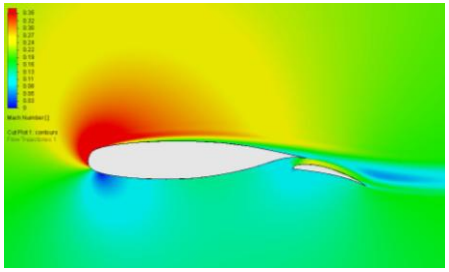


$M = 0.185$, $\rho_\infty = 0.72295$ кг/м^3, $T_\infty = 300$ К,
$Re = 2.51*10^6$

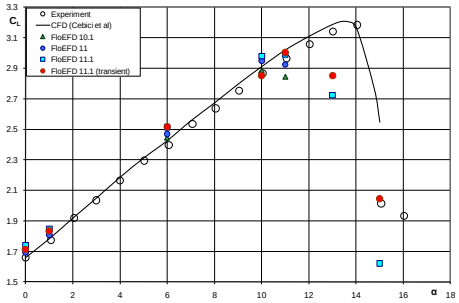




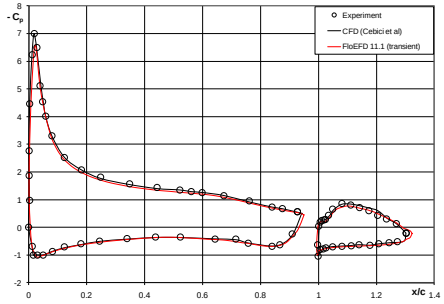
Распределение числа Маха при α=6°



Распределение числа Маха при α=11°



зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки



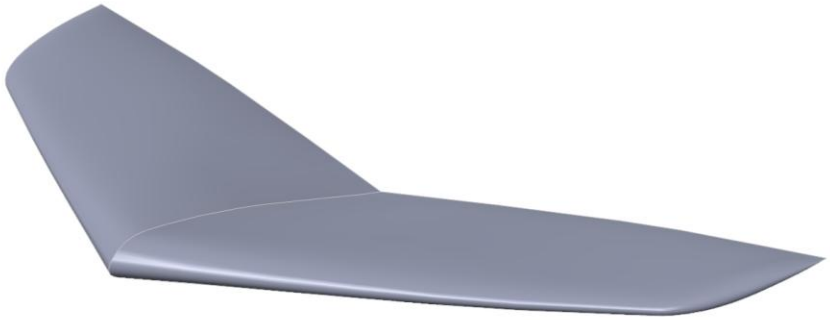
коэффициента давления (α = 6°)

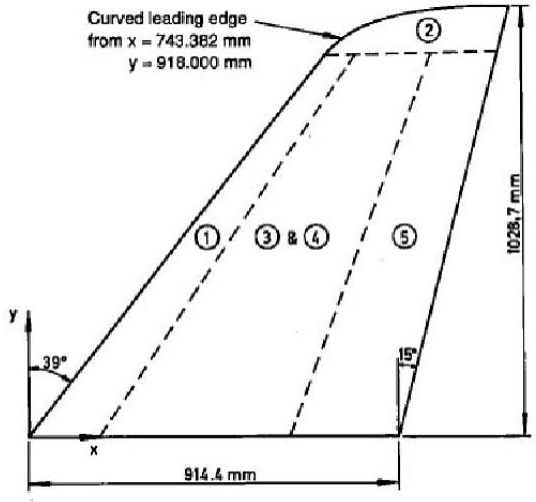
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет обтекания крыла RAE M2155

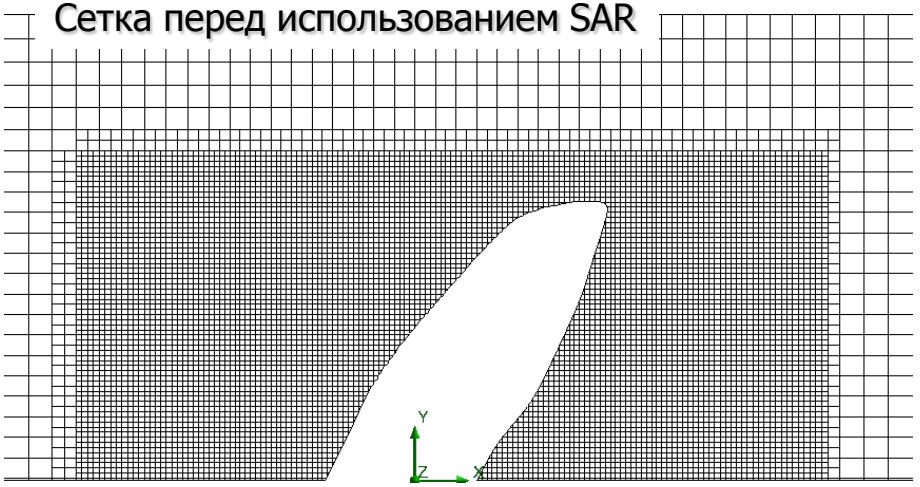
M=0.6, M=0.7

При решении задачи использовалась процедура “Solver adaptive refinement” (SAR)

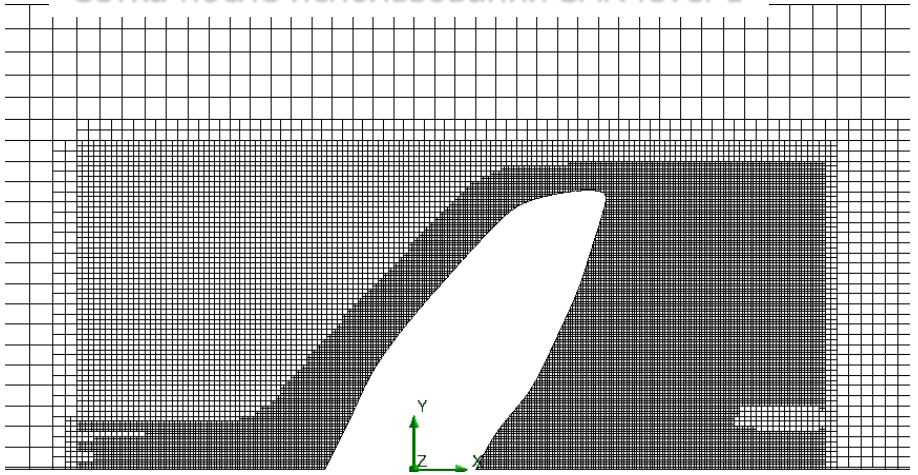




Сетка перед использованием SAR



Сетка после использования SAR level 1

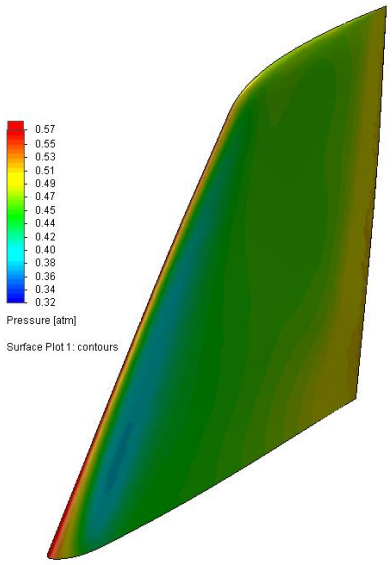


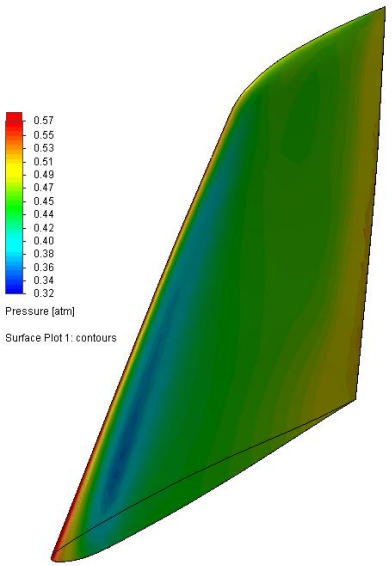
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

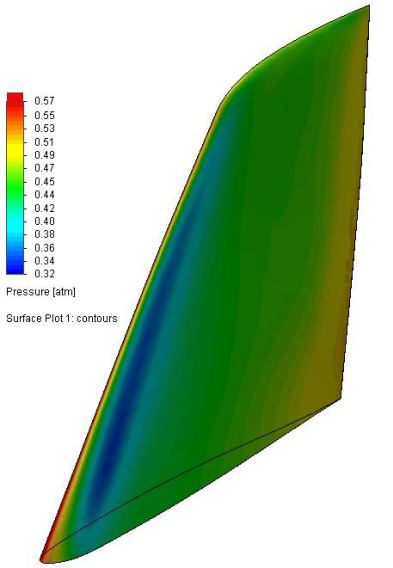
Расчет крыла RAE M2155

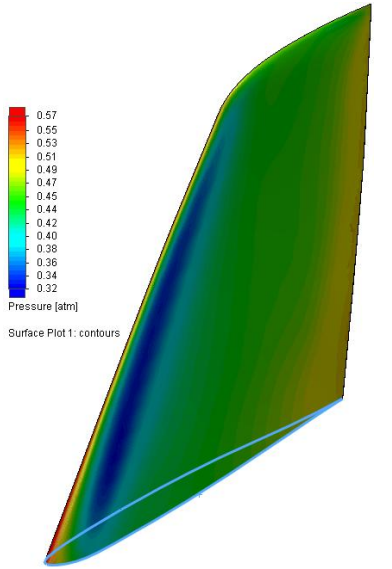
(продолжение)

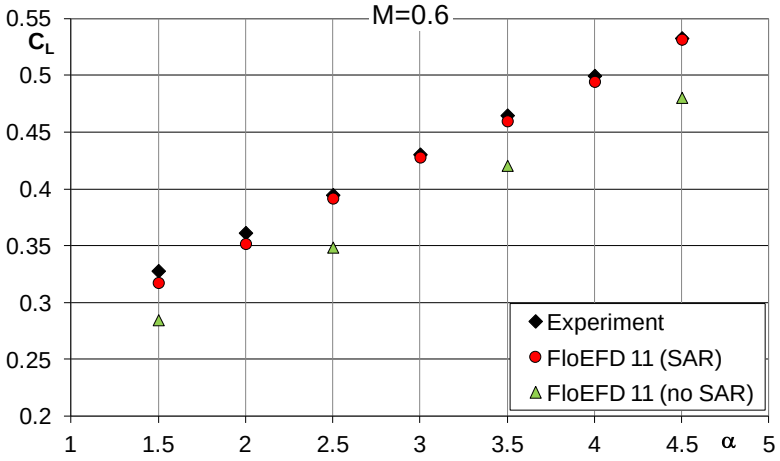
FloEFD 11 α=1.5°	FloEFD 11 α=2.5°	FloEFD 11 α=3.5°	FloEFD 11 α=4.5°

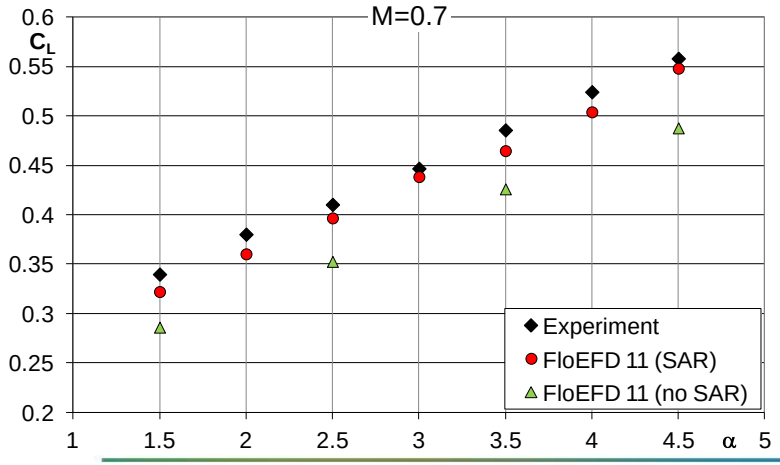






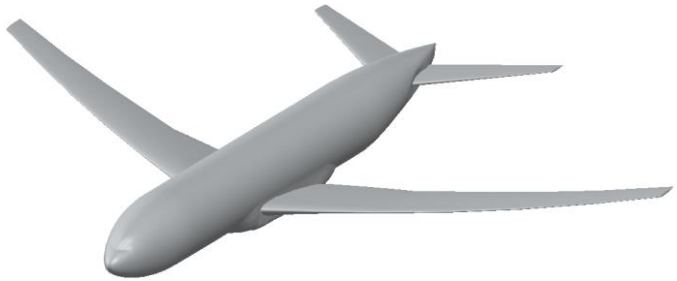


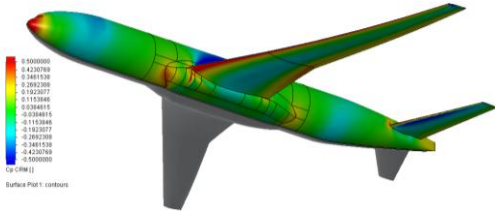


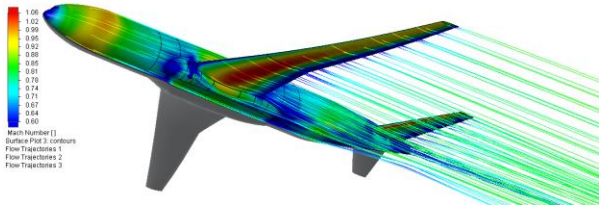


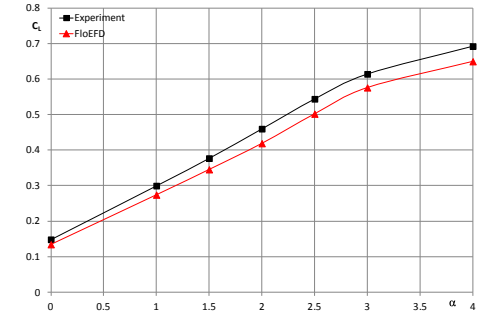
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

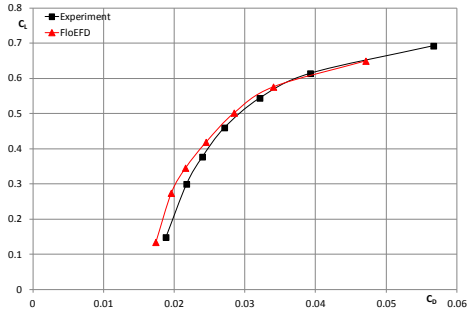
Расчет обтекания 3D модели NASA Common Research Model при M=0.85

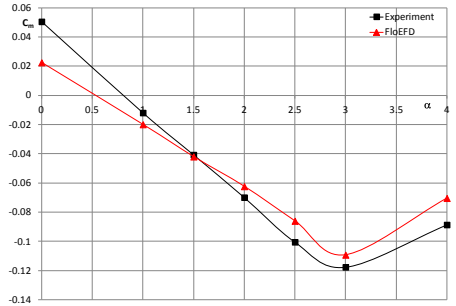


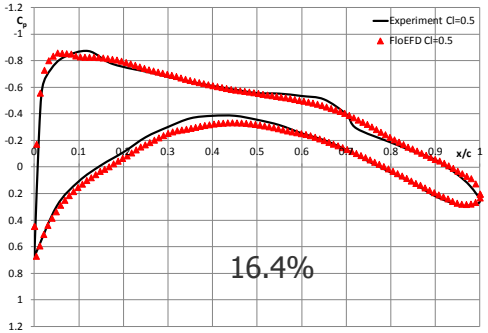


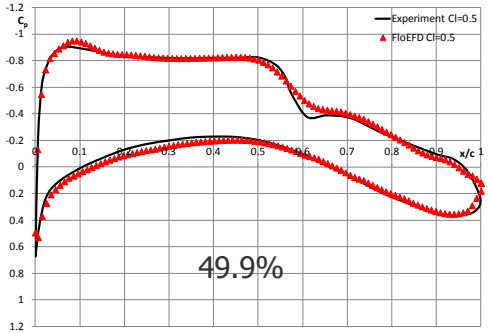


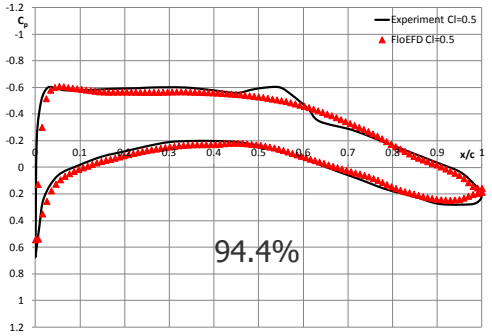










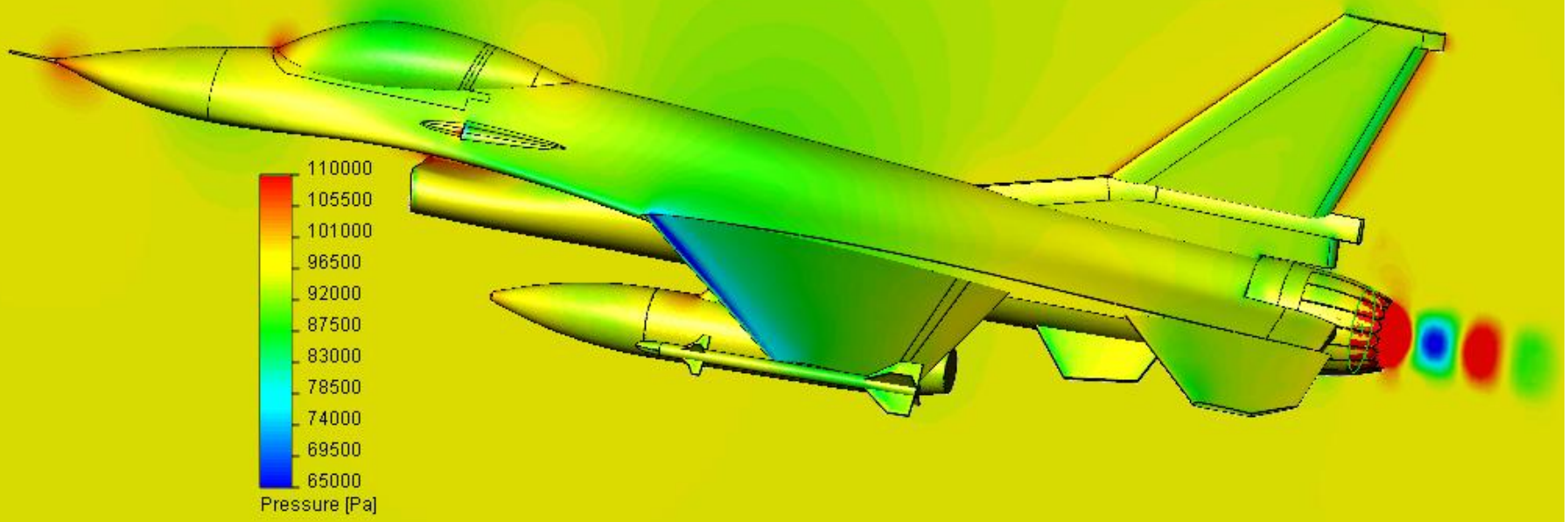


© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет обтекания 3D модели самолета F-16

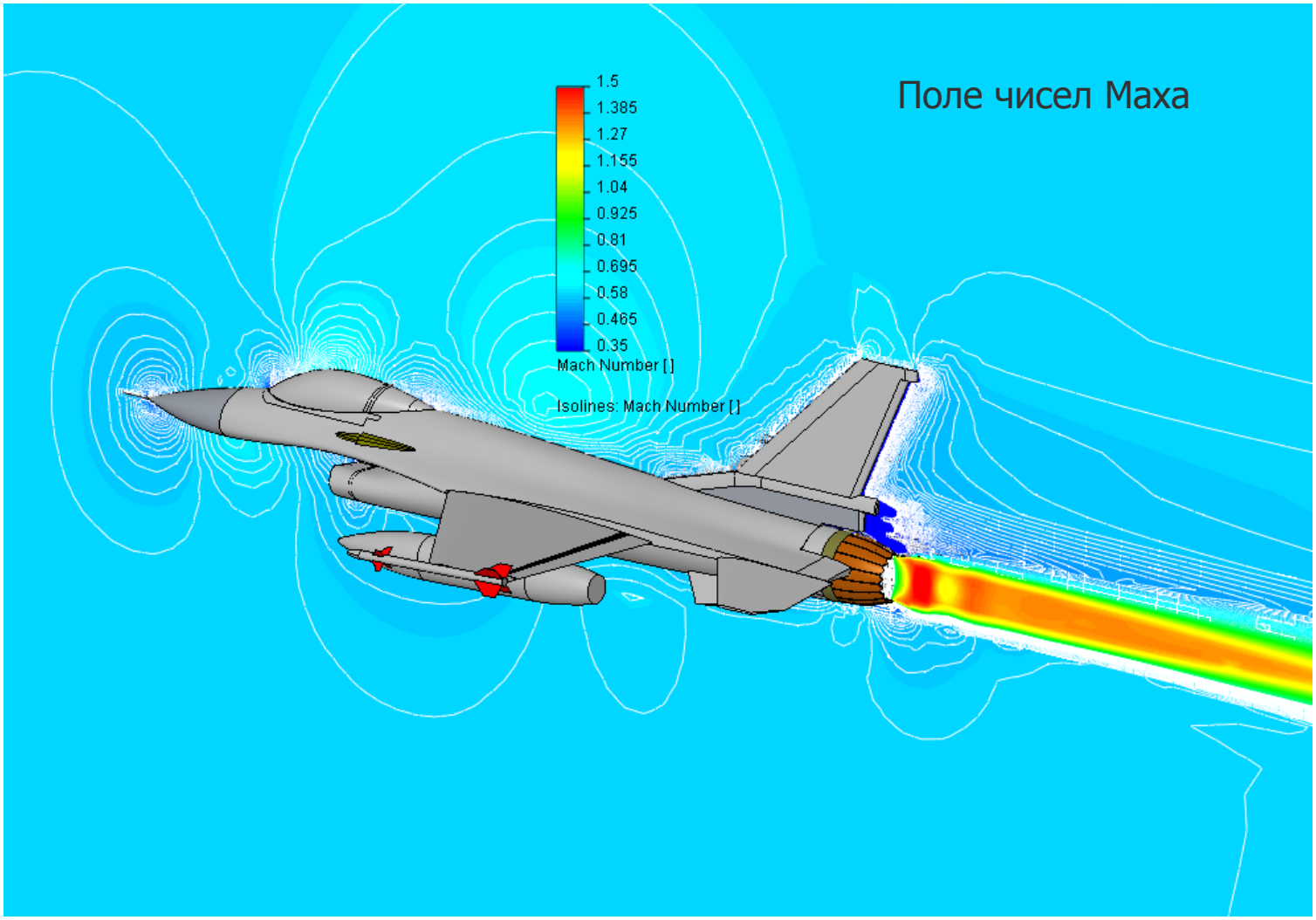
$M=0.6 \quad \alpha=5^{o}$

Поле давлений



© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

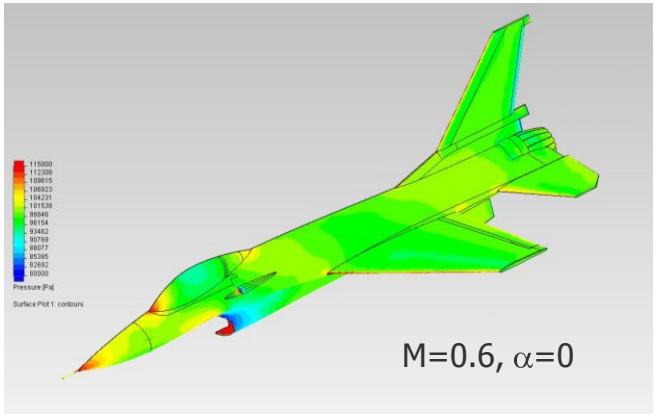
Расчет обтекания 3D модели самолета F-16 (продолжение)

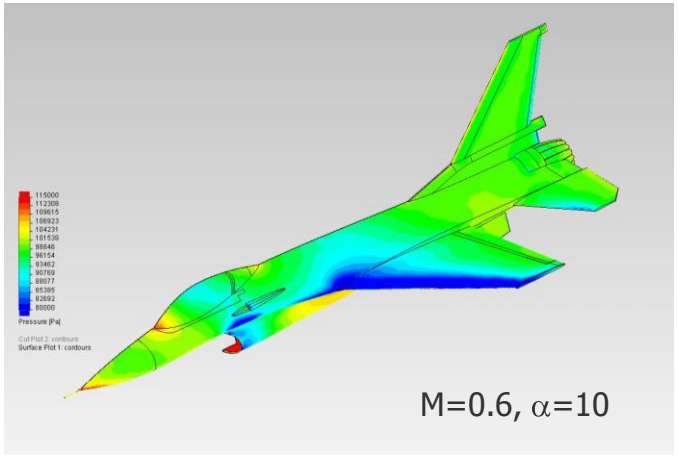


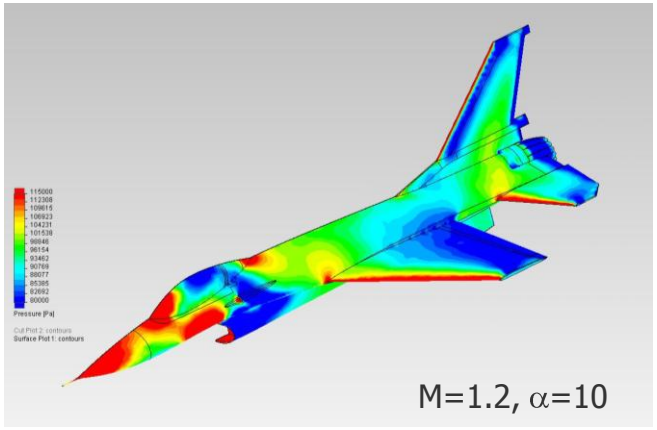
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

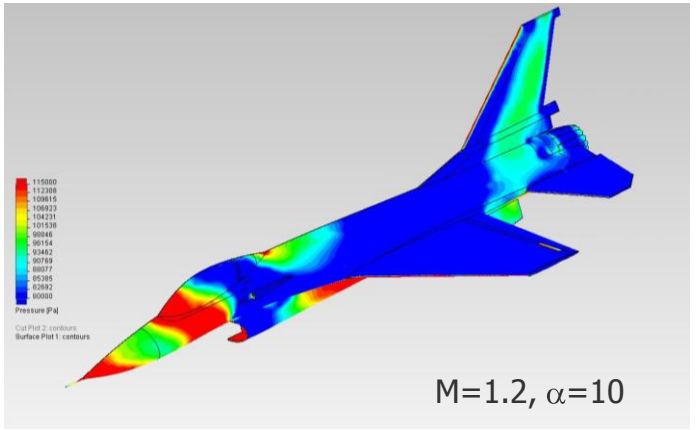
Расчет обтекания 3D модели самолета F-16 (продолжение)

Распределение давления на поверхности F-16



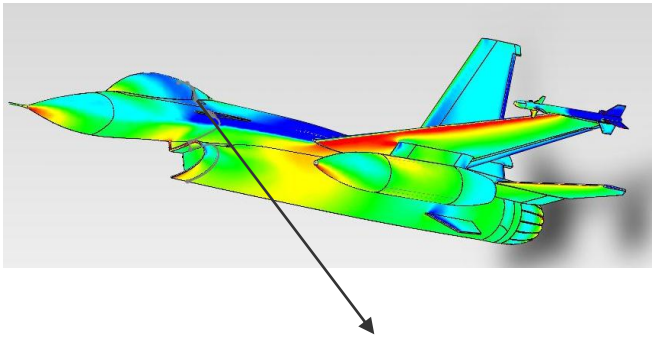


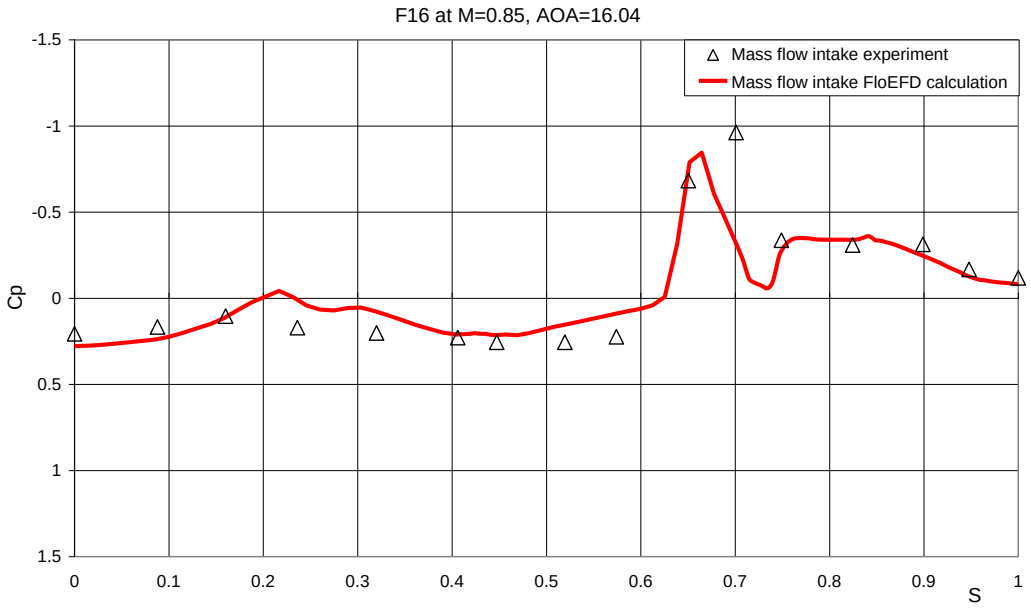




© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

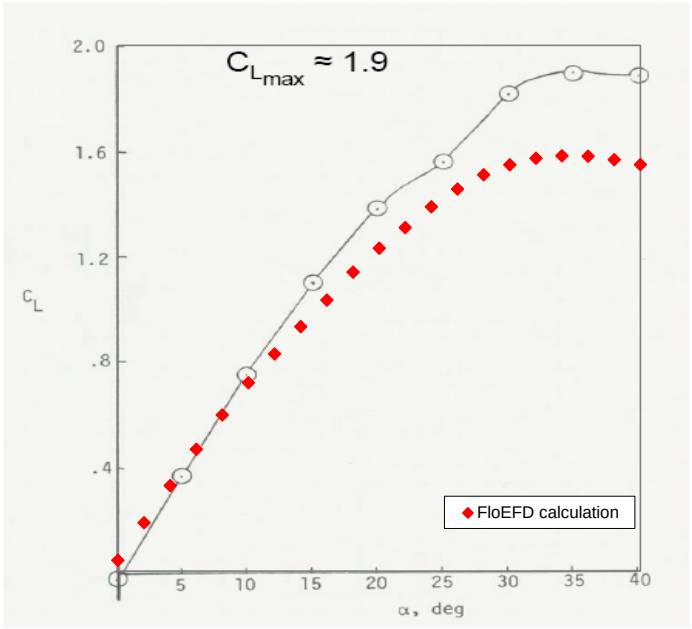
Расчет обтекания 3D модели самолета F-16 (продолжение)





Сравнение рассчитанного и измеренного коэффициента давления вдоль кривой, указанной на рисунке.

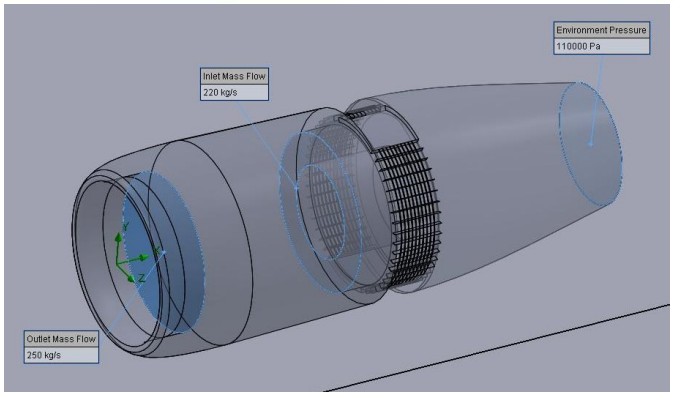
Коэффициент подъемной силы для M=0.6

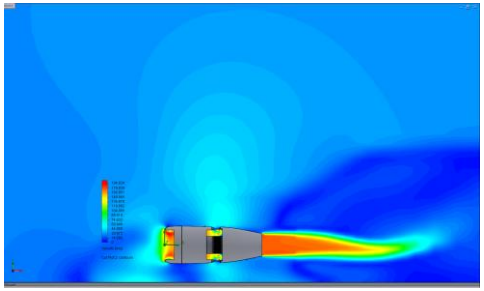


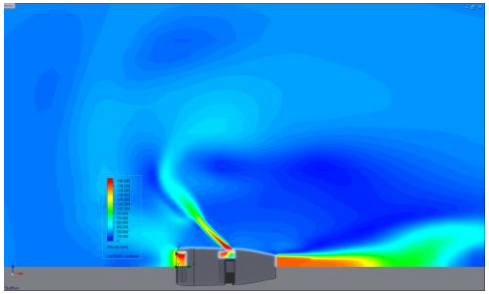
Nguyen, Luat T. et.al. Simulator Study of Stall/Post-Stall Characteristics of a Fighter Airplane With Relaxed Longitudinal Static Stability. NASA Technical Paper 1538. Dec. 1979.

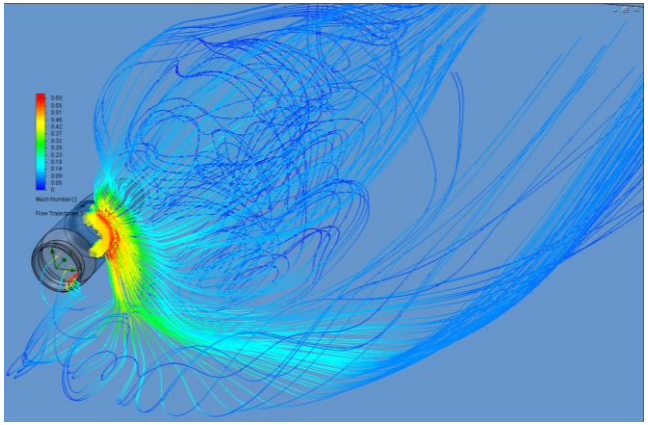
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет устройства реверса тяги

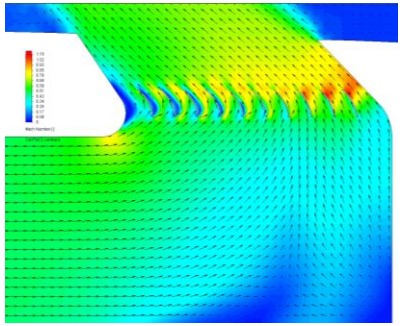








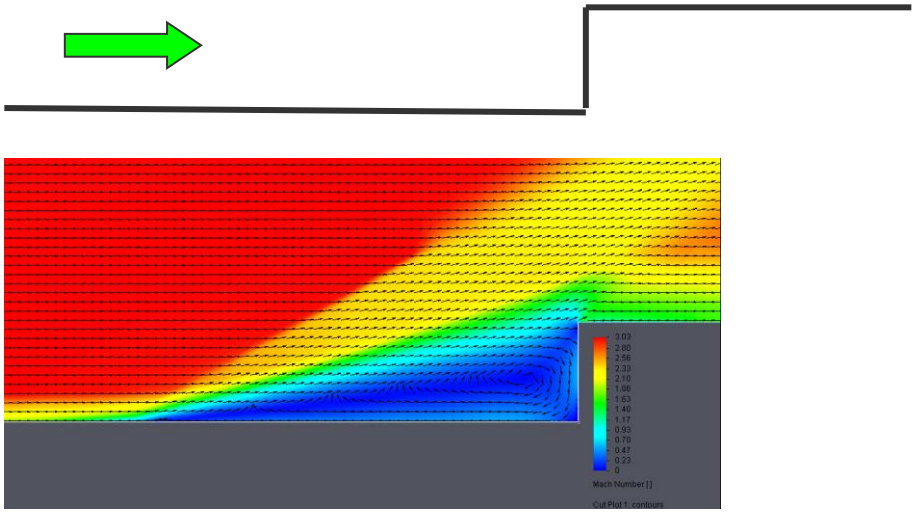
Параметр	FloEFD 11.2	ANSYS (FLUENT)
P_{total} - P_{ref}, Pa	47 000	47 000
T_{total}, K	349.5*	350.9
T_{st}, K	335.6	336.2
M_{in}	0.457	0.468
m_{in}, kg/s	218.7	222.6
I_{in}, N	-63 533	-64 171
$F_{chamber}$, N	43 792	42 611
F_{blade}, N	56 507	60 492
R_{jet}, N	36 767	38 932
$\delta_{disch\ coef}$, %	**-1.75**	0
δ_{thrust}, %	**-5.56**	0

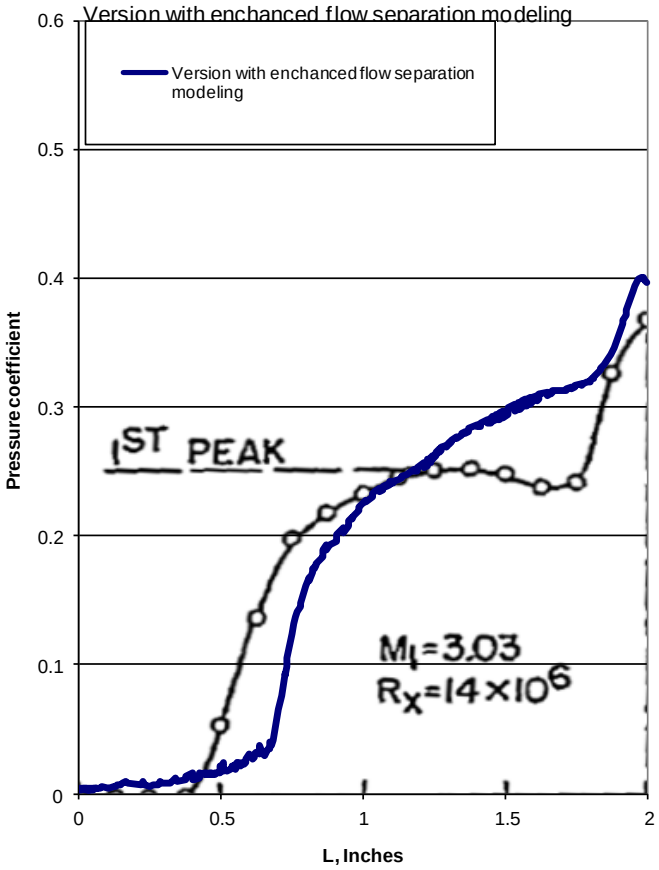


© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Отрыв перед ступенькой*

M=3.03; $P_0=10^6$ Pa; T_0=293.2 K





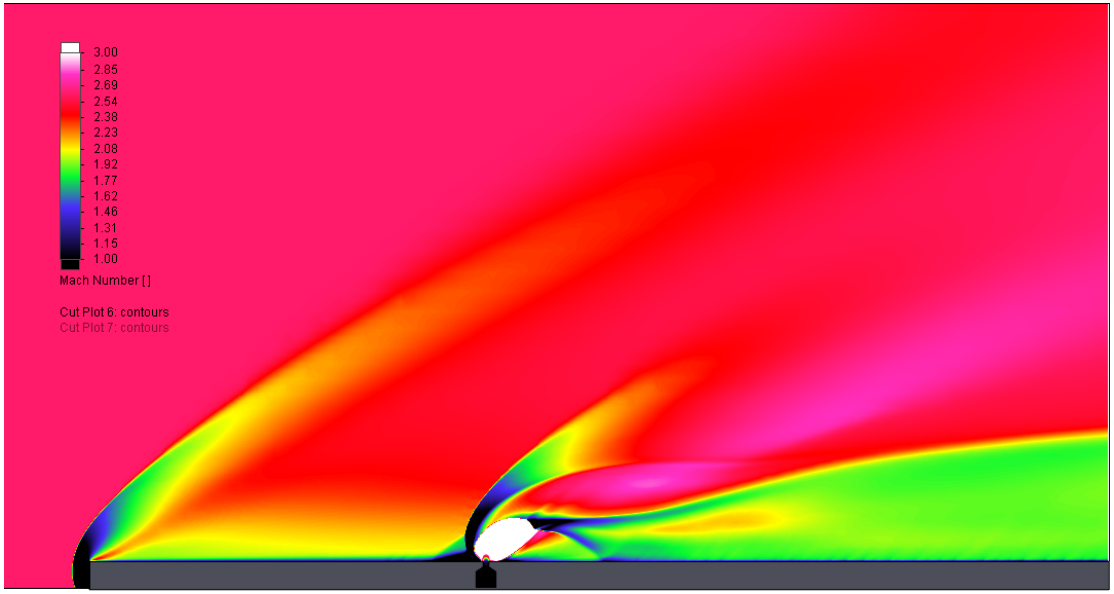
*__Reference__: Smith H.E. The flow field and heat transfer downstream of a rearward facing step in supersonic flow 1967 ARL-67–0056.

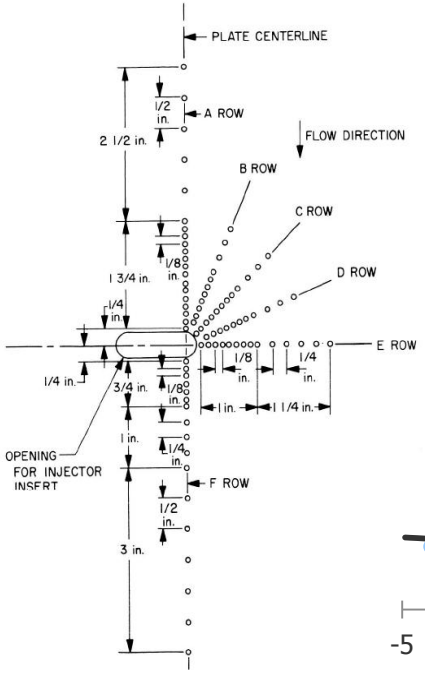
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

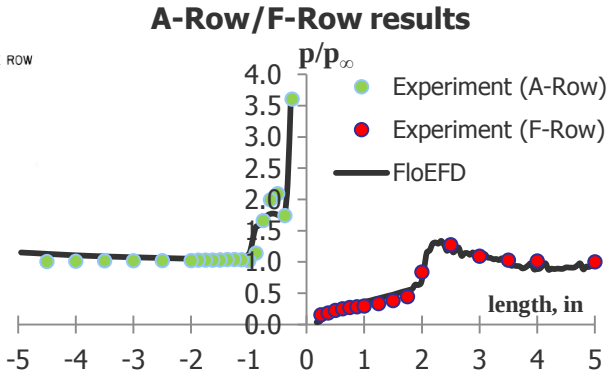
Расчет взаимодействия сверхзвукового потока с поперечно вдуваемой струей*

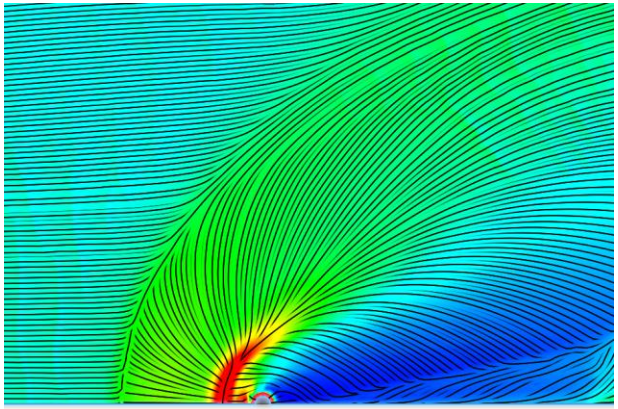
M_∞=2.61; P_∞=6729 Pa; T_∞=133 K

P_{oj}=20.67 bar; T_{oj}=296.4 K





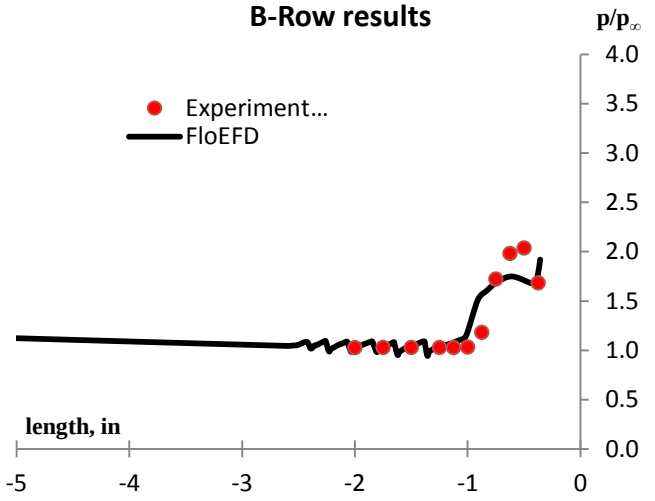


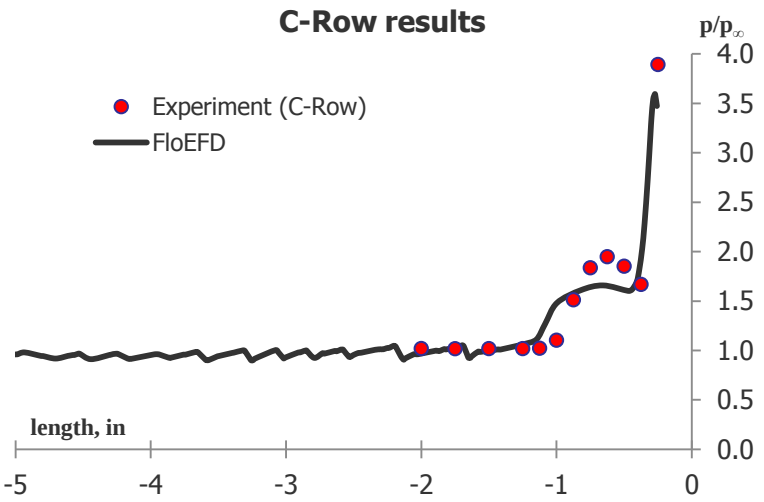


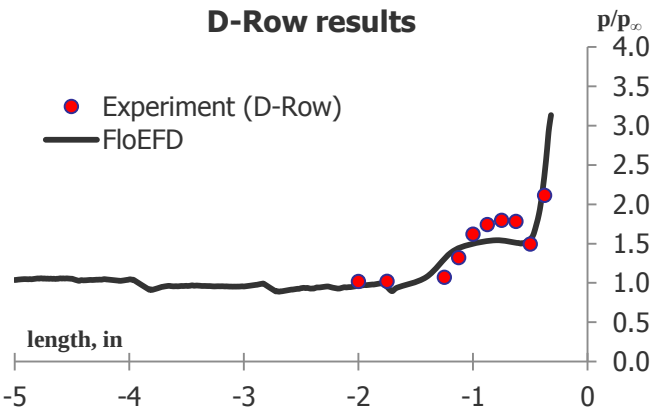
* Dowdy, M.W. and Newton, J.F., "Investigation of Liquid and Gaseous Secondary Injection Phenomena on a Flat Plate with M = 2.01 to M = 4.54," JPL-TR-32-542, Dec. 1963.

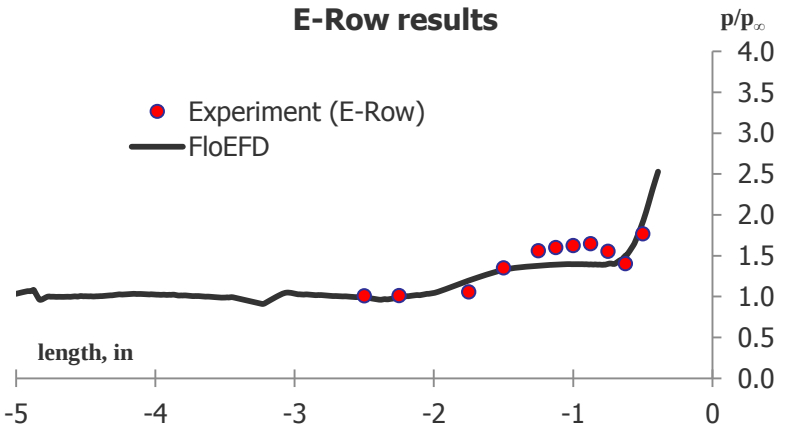
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет взаимодействия сверхзвукового потока с поперечно вдуваемой струей (продолжение)



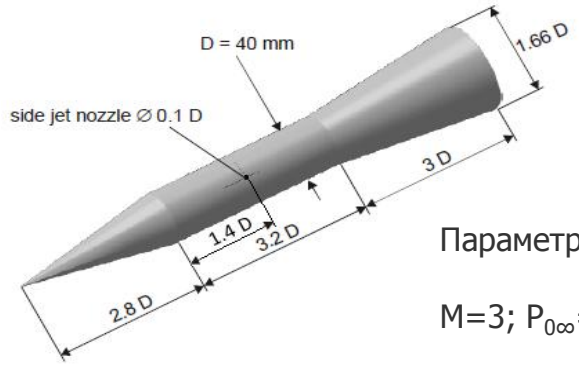






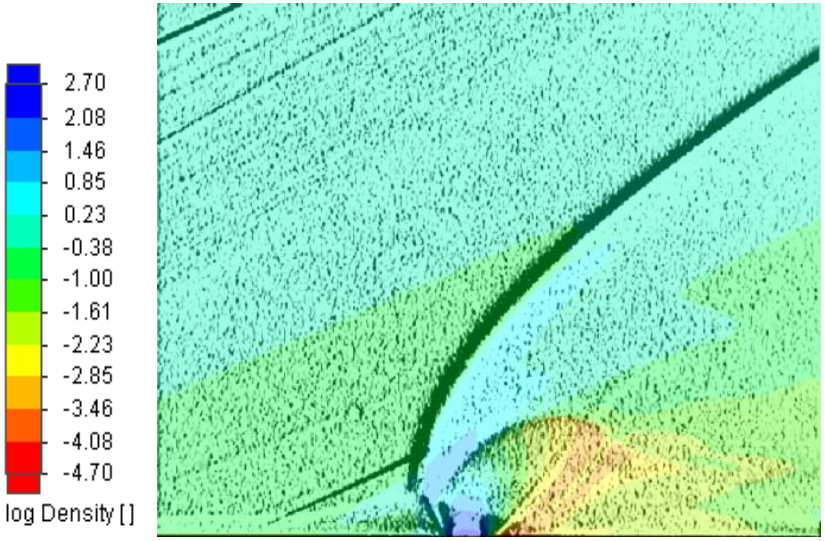
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

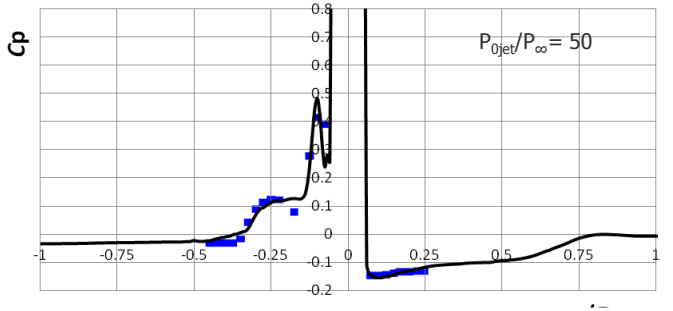
РАСЧЕТ СТРУЙНЫХ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ УЧАСТКЕ КОРПУСА

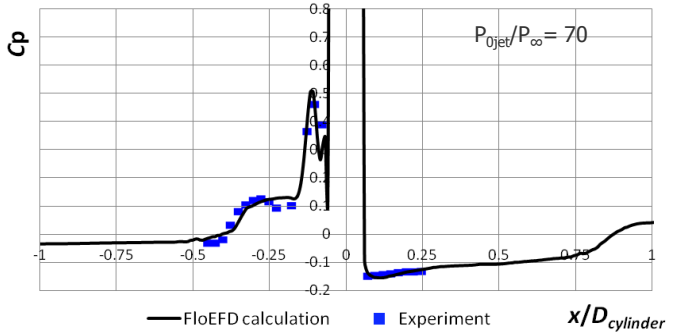


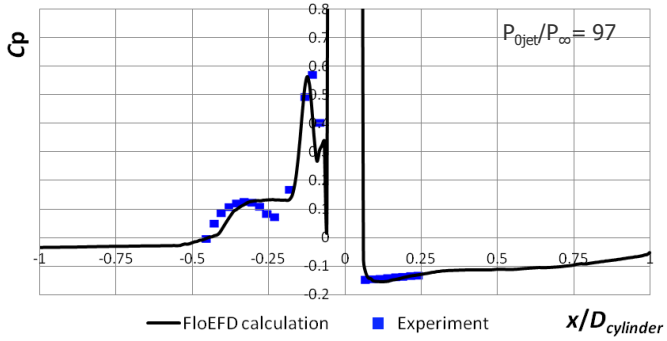
Параметры набегающего потока

M=3; $P_{0\infty}$= 0.716 МПа, $T_{0\infty}$=288.5 K





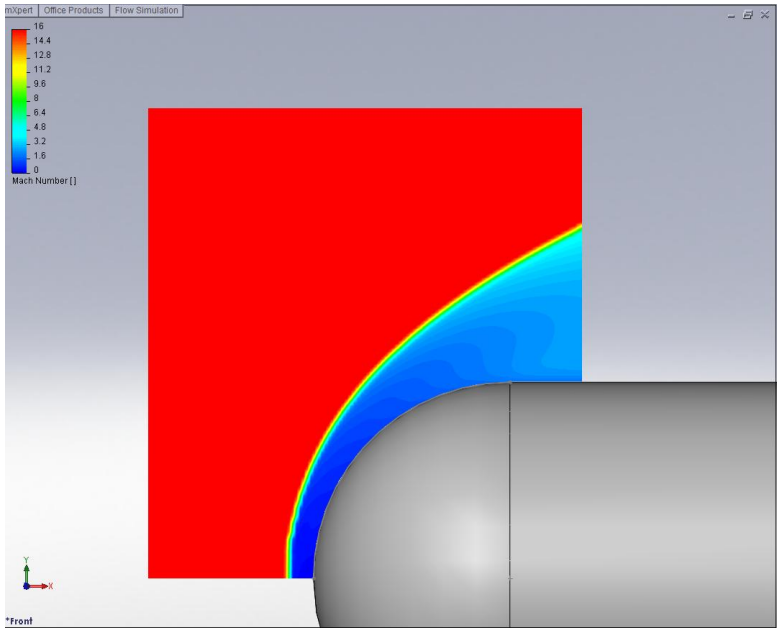


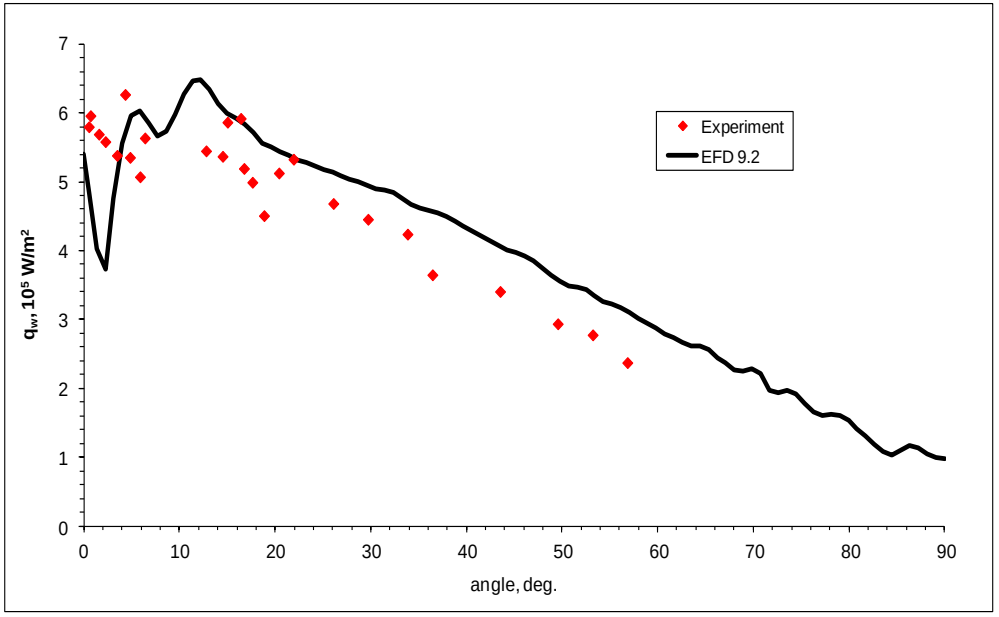


© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

*Расчет гиперзвукового обтекания затупленного цилиндра**

Набегающий поток - M = 16.34, T = 52 K, T_w = 294 K, P = 82.95 Pa



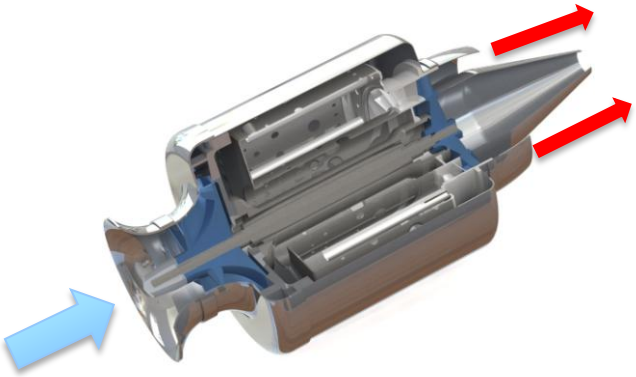


Сравнение расчетного и измеренного теплового потоков на сферическом затуплении

*Reference: AIAA Journal vol.31 №7 p. 1215

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

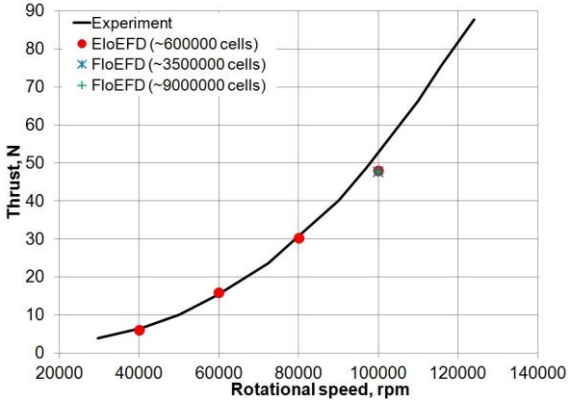
Расчет микро турбореактивного двигателя KJ 66

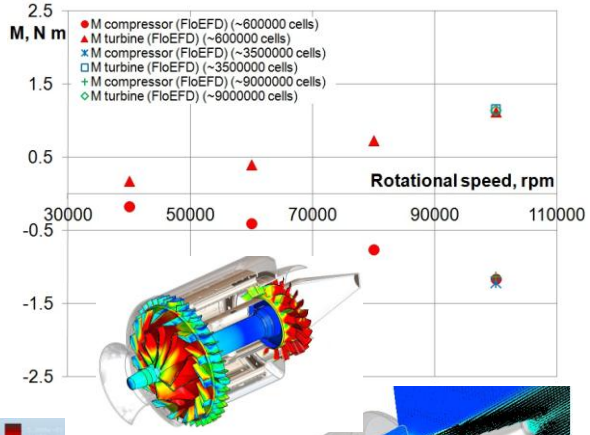


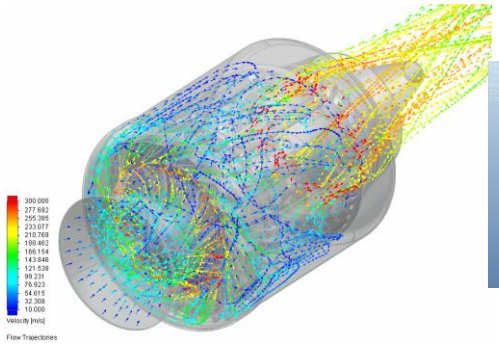
Расчет двигателя проводился как единого элемента

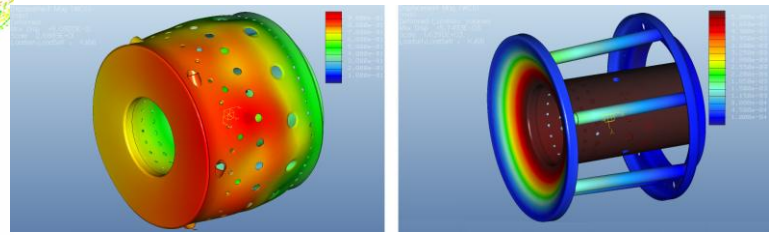
Окислитель – атмосферный воздух
Горючее – керосин

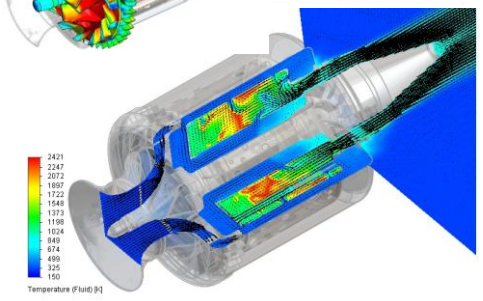
Материалы конструкции – алюминий, сталь, инконель









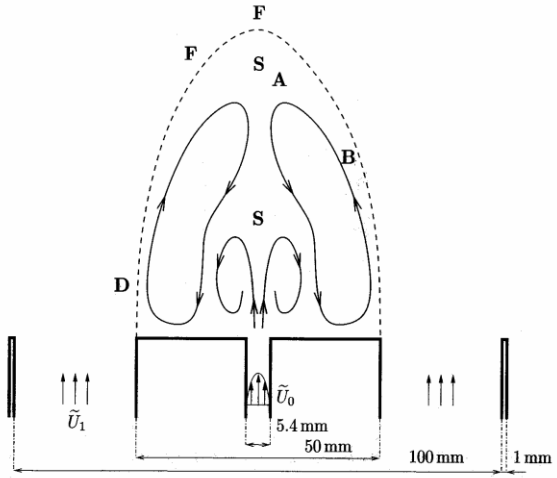


Расчет деформации конструкции камеры сгорания с использованием Pro/Mechanica

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ ГОРЕНИЯ

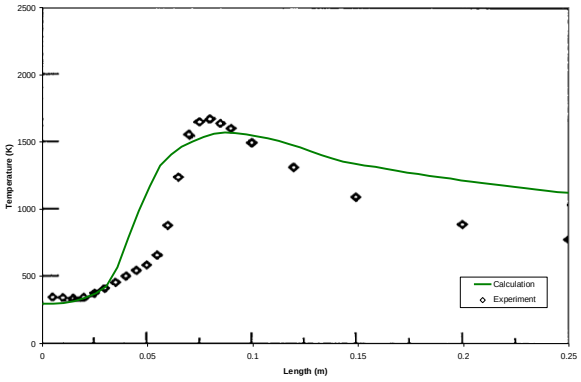
Испытания ERCOFTAC *

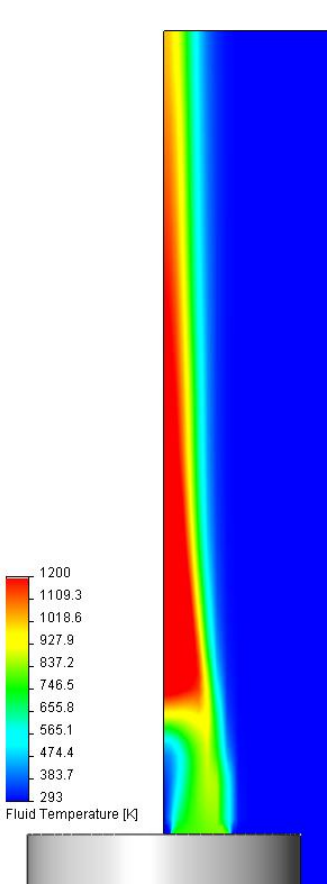


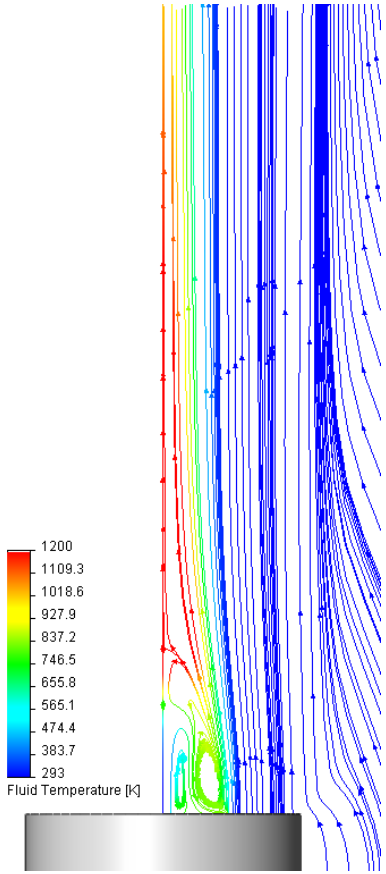
$\tilde{U}_1 = 21\,m/s \quad \tilde{U}_0 = 25\,m/s$

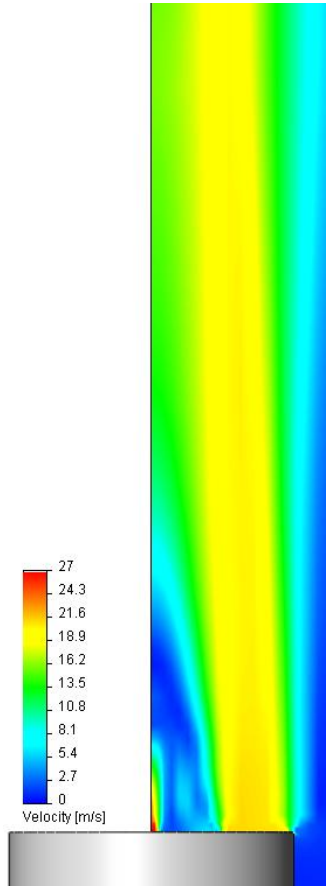
Surrounding velocity is $1\,m/s$

Fuel – methane; Oxidizer - air





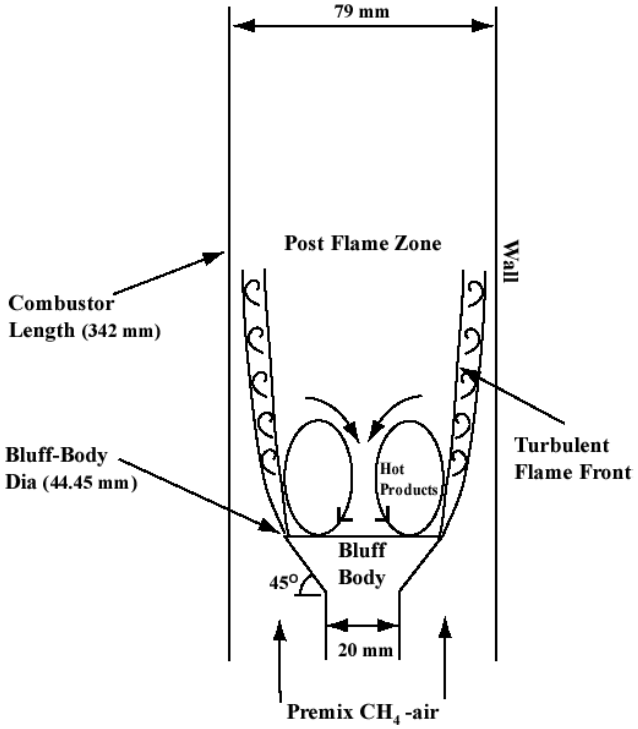




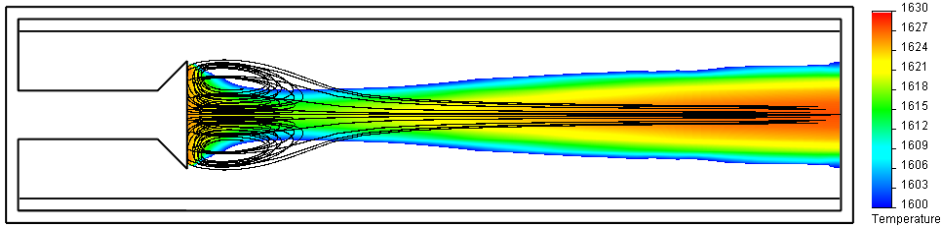
* Fallot, L., Gonzalez, M., Elamraoui, R. and Obounou, M. Modelling finite-rate chemistry effects in non-premixed turbulent combustion: test on the bluff-body stabilized flame", Comb. Flame, 1997, 110, pp. 298-318.

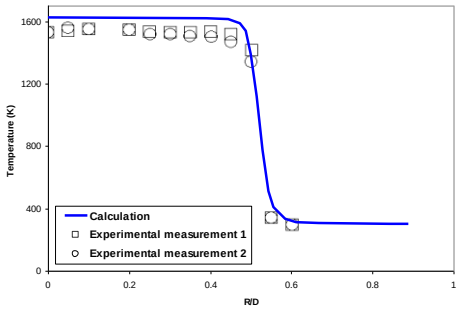
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

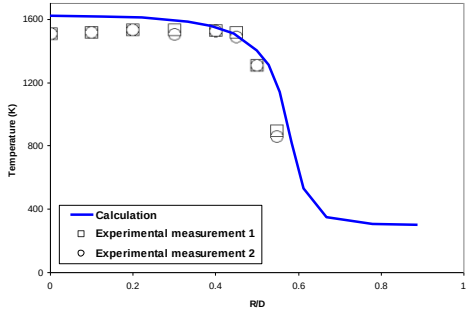
Горение предварительно перемешанной метоно-воздушной смеси*



Компонент	*Массовая доля, %*
Топливо (Метан)	**3.29**
Окислитель (Воздух)	**96.71**



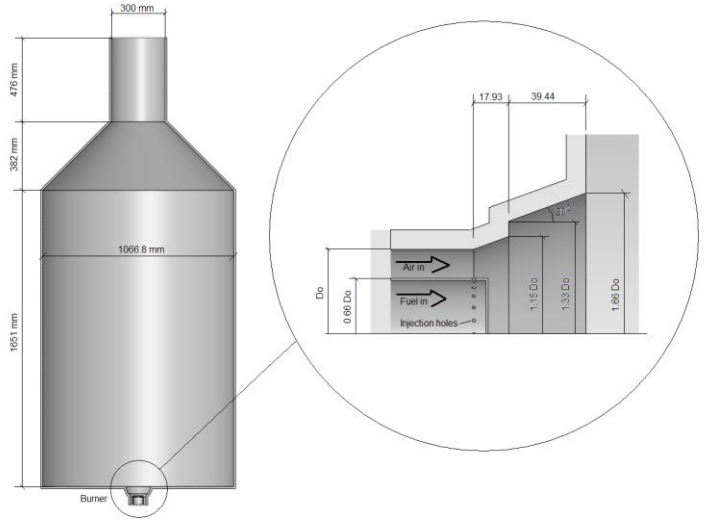


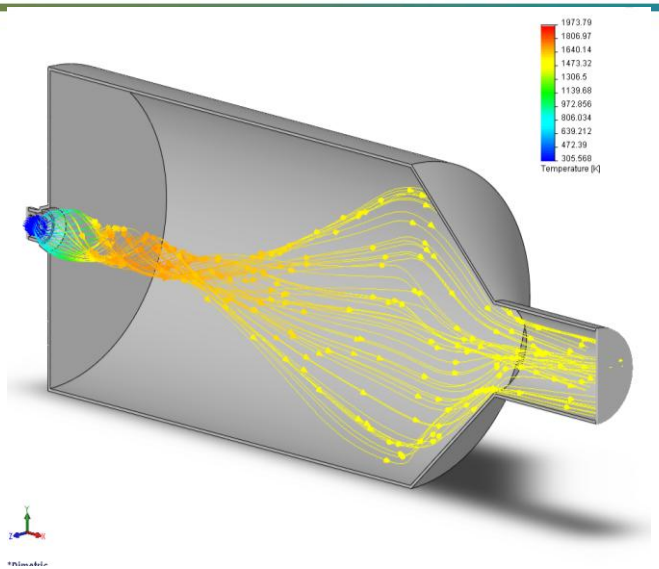


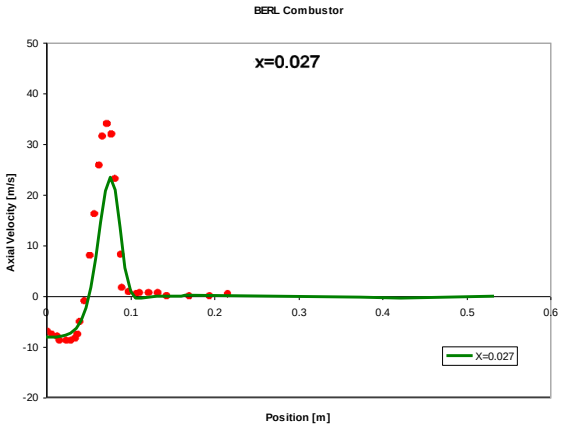
* Nandula, S.P., Pitz, R.W., Barlow, R.S., and Fiechtner, G.J., (1996), “Rayleigh/Raman/LIF Measurements in a Turbulent Lean Premixed Combustor”, AIAA 96-0937, 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, January 15-18, 1996

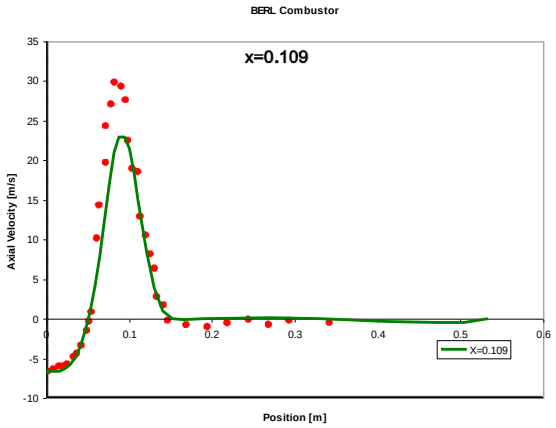
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

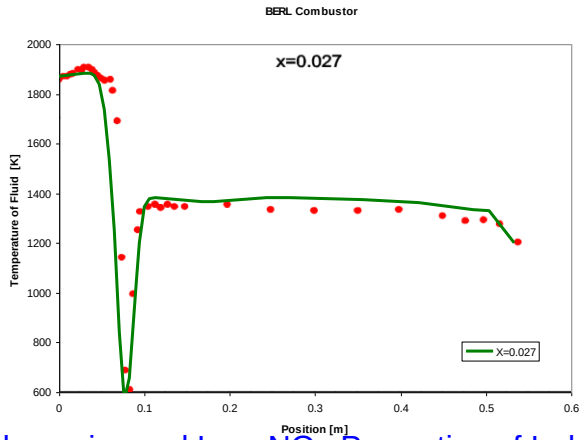
Расчет вихревой форсунки (природный газ/воздух)*







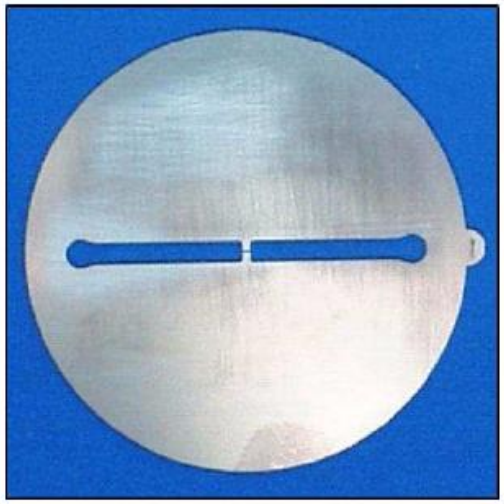


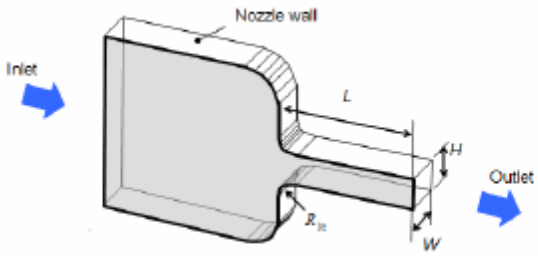


* Sayre A, N. Lallemant, J. Dugue, R. Weber, 1994, Scaling Characteristics of Aerodynamics and Low-NOx Properties of Industrial Natural Gas Burners, The SCALING 400 Study, Part IV: The 300 kW BERL Test Results, IFRF Doc No F40/y/11, International Flame Research Foundation, The Netherlands.

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

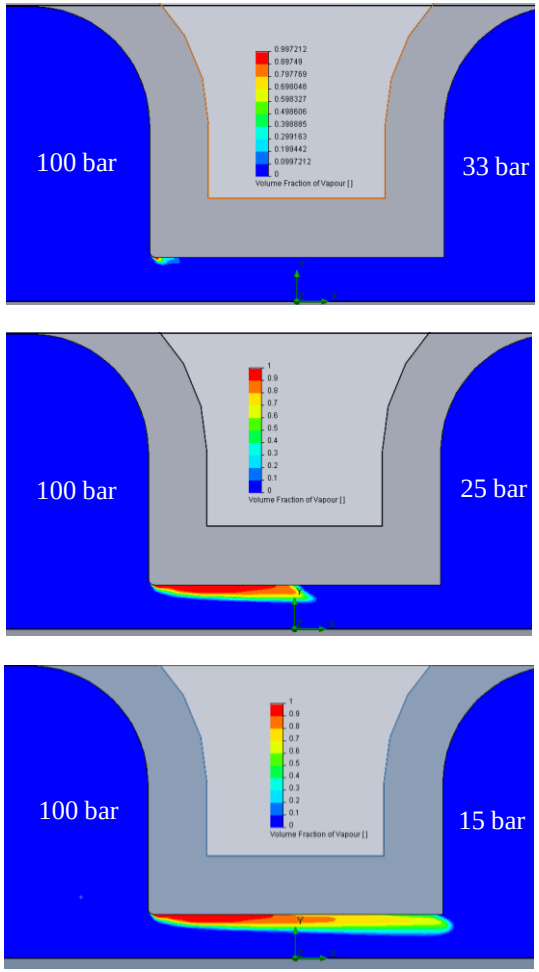
НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ КАВИТАЦИИ



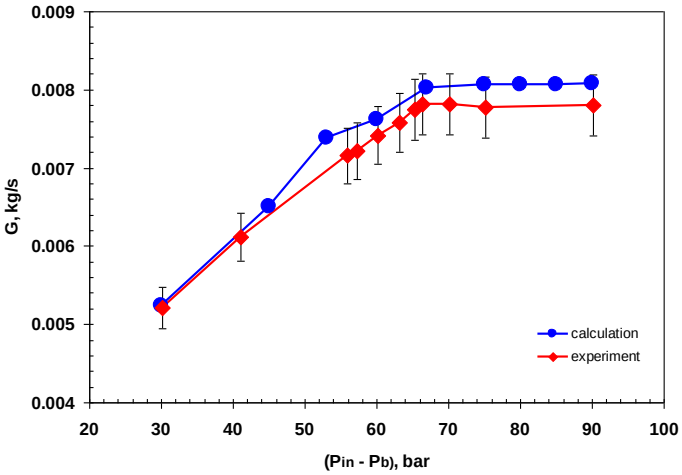


L=0.001 m, H=0.000299 m,

W=0.0003 m, Rin=0.00002 m



*Кавитация дизельного топлива в топливной форсунке **

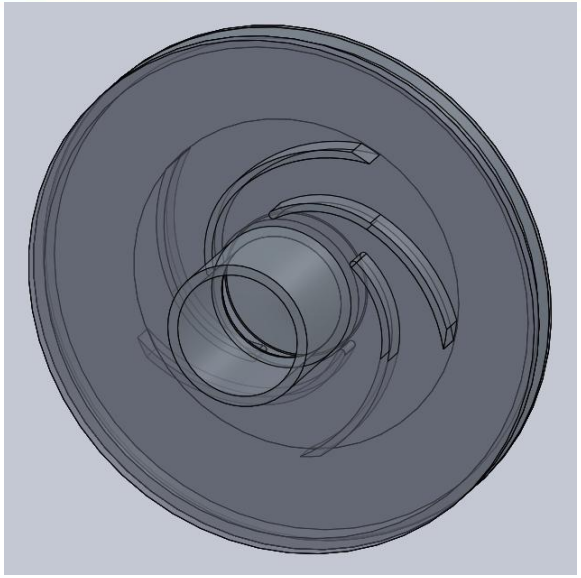


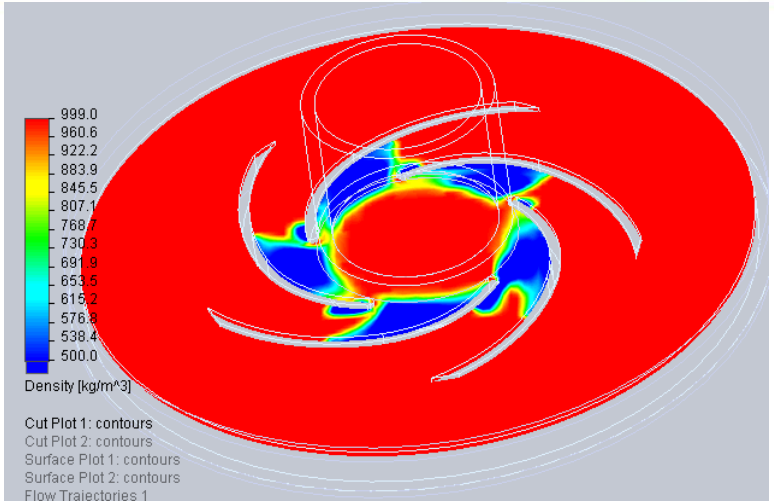
Зависимость расхода от перепада давлений (давление перед форсункой фиксируется)

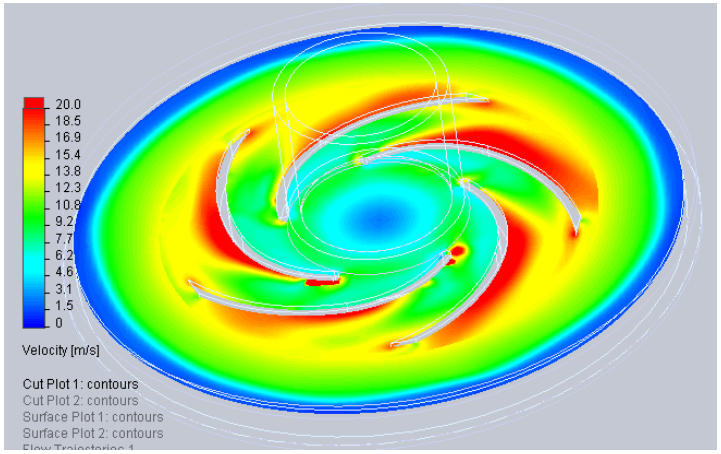
* Winklhofer, E., Kull, E., Kelz, E., and Morozov, A., 2001, "Comprehensive Hydraulic and Flow Field Documentation in Model Throttle Experiments Under Cavitation Conditions." ILASS Europe 2001.

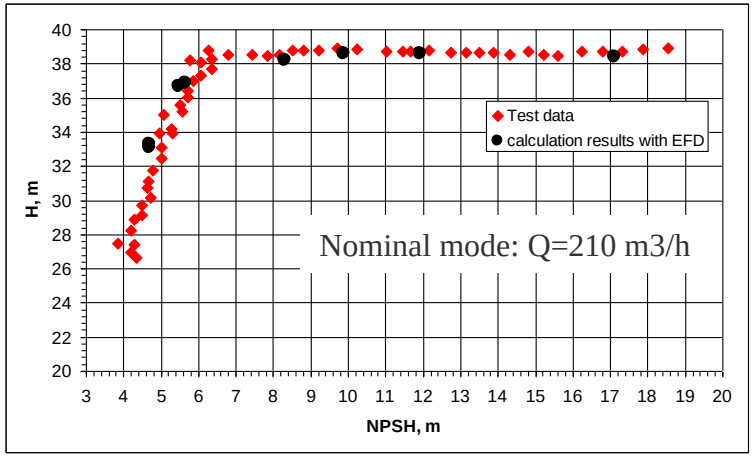
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Насос с кавитацией *







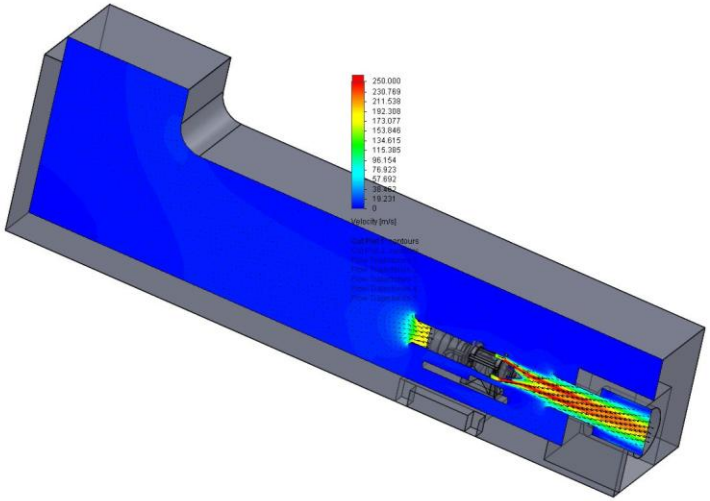


*M.Hofman, B.Stoffel, O.Coutier-Delgosha, R.Fortes-Platella, Jl.Reboud, Experimental and numerical studies on a centrifugal pump with 2D-curved blades in cavitation condition, CAV2001:session B7.005

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

ПРИМЕРЫ НЕКОТОРЫХ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

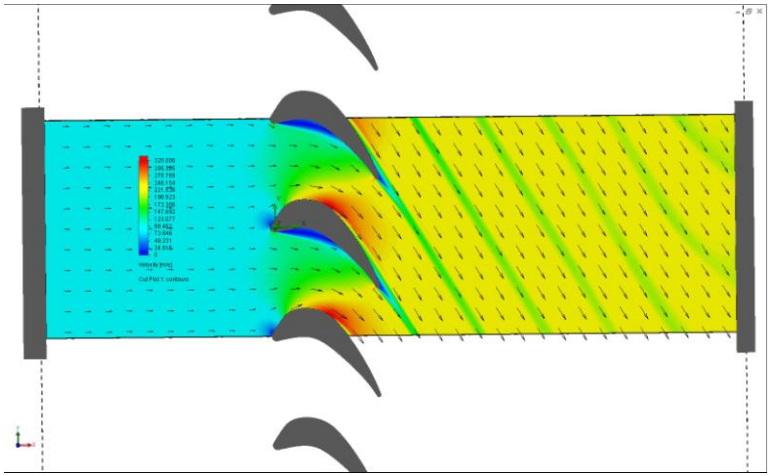
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ НА СТЕНДЕ



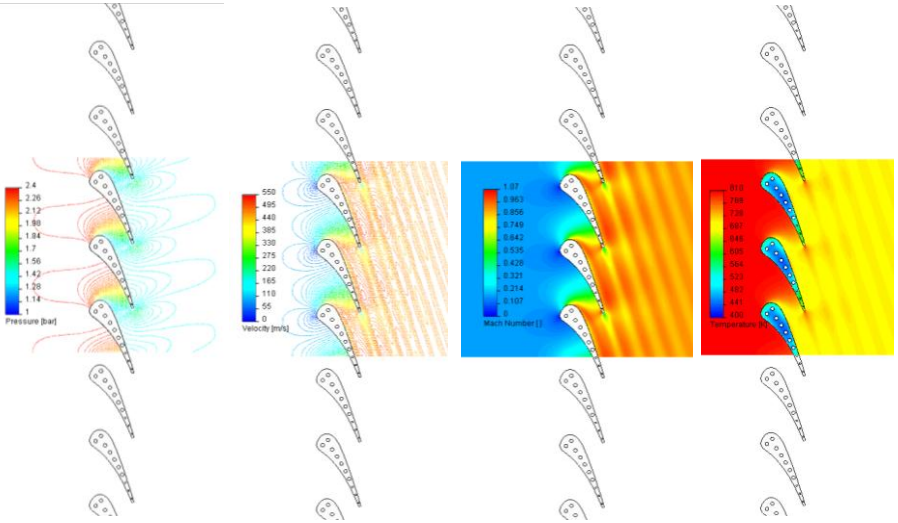
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

РАСЧЕТ ОБТЕКАНИЯ ПЛОСКОГО РЯДА ЛОПАТОК

Неохлаждаемые лопатки

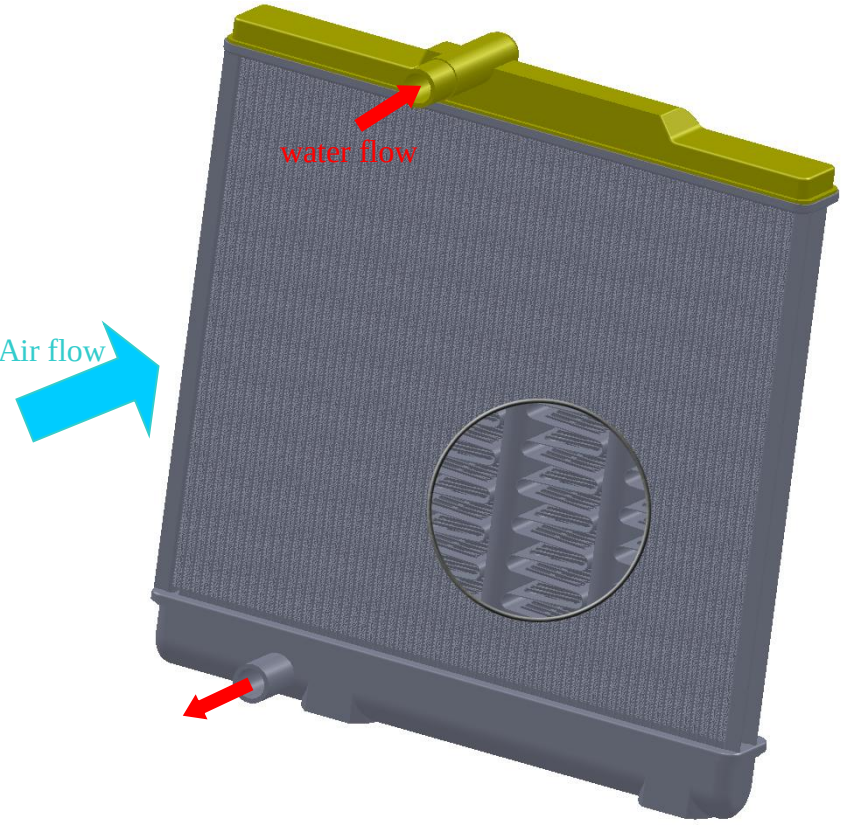


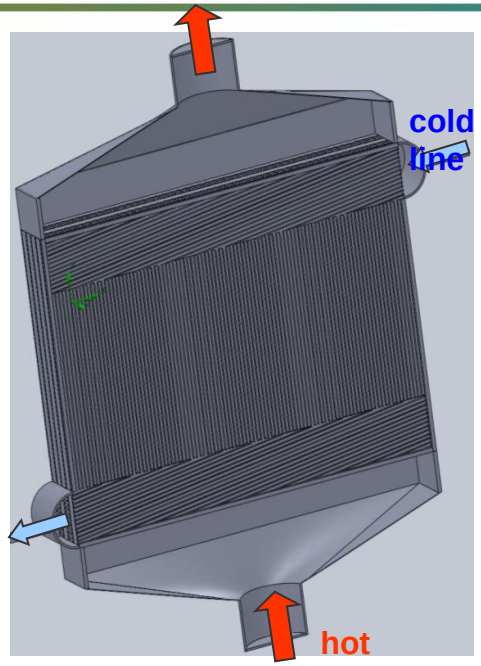
Охлаждаемые лопатки

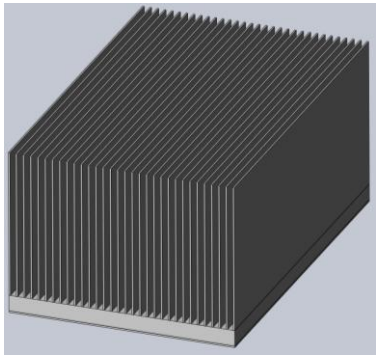


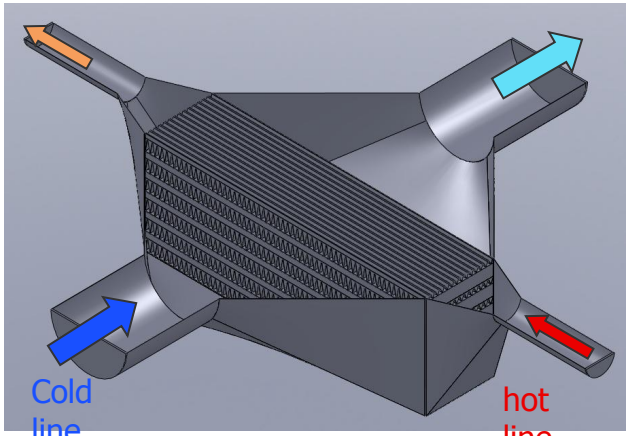
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

РАСЧЕТ ТЕЛООБМЕННИКОВ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ И НАЗНАЧЕНИЙ



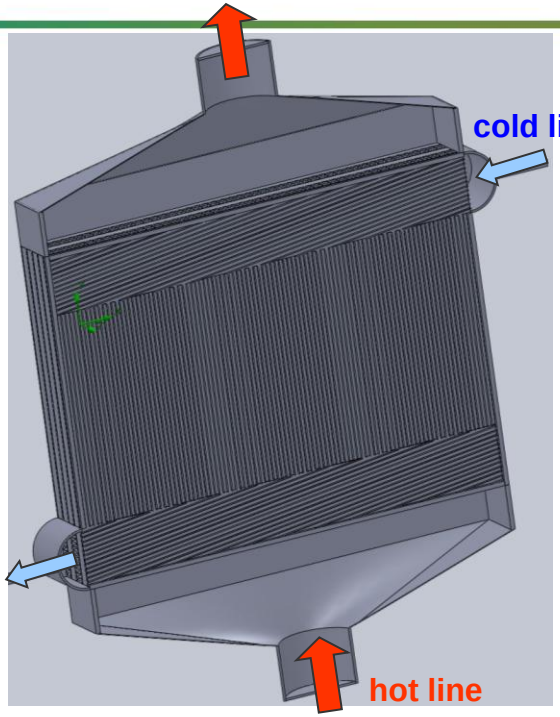


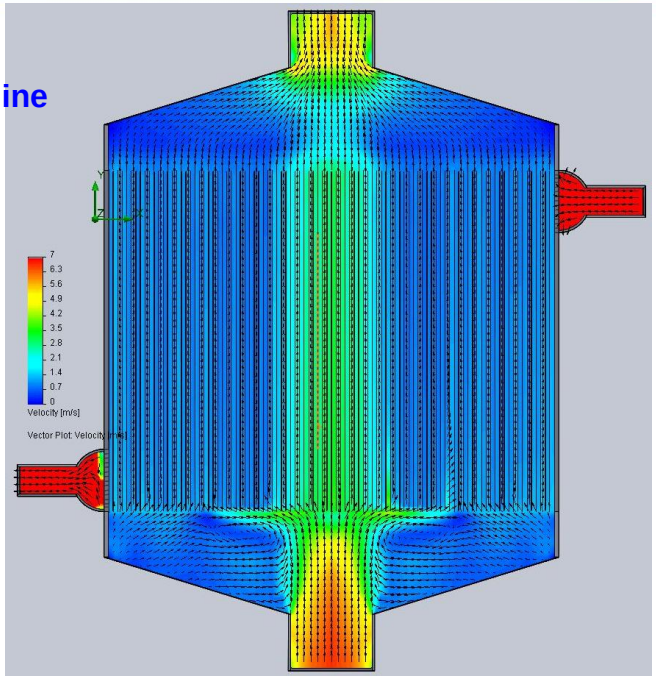


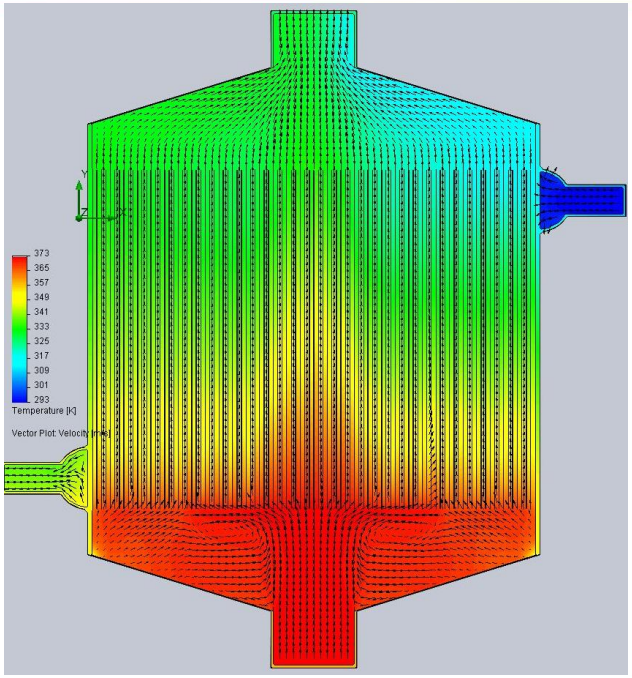


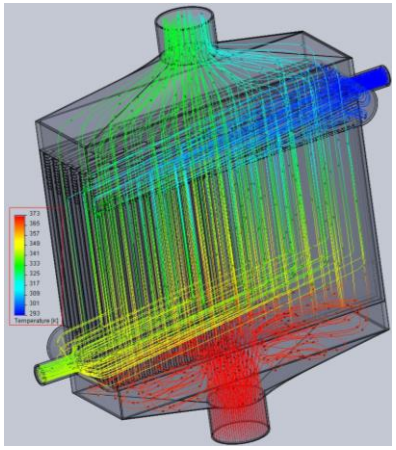
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Ребристо-пластинчатый теплообменник









Hot line: m=39.1 kg/h, t=100 C, рабочее тело - air

Cold line: m=36 kg/h, t=20 C, рабочее тело – air

Материал теплообменника - алюминий

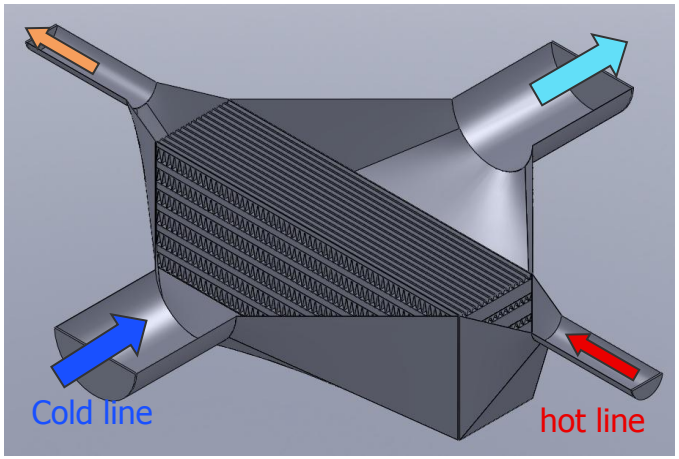
Сетка: автомат RRL4

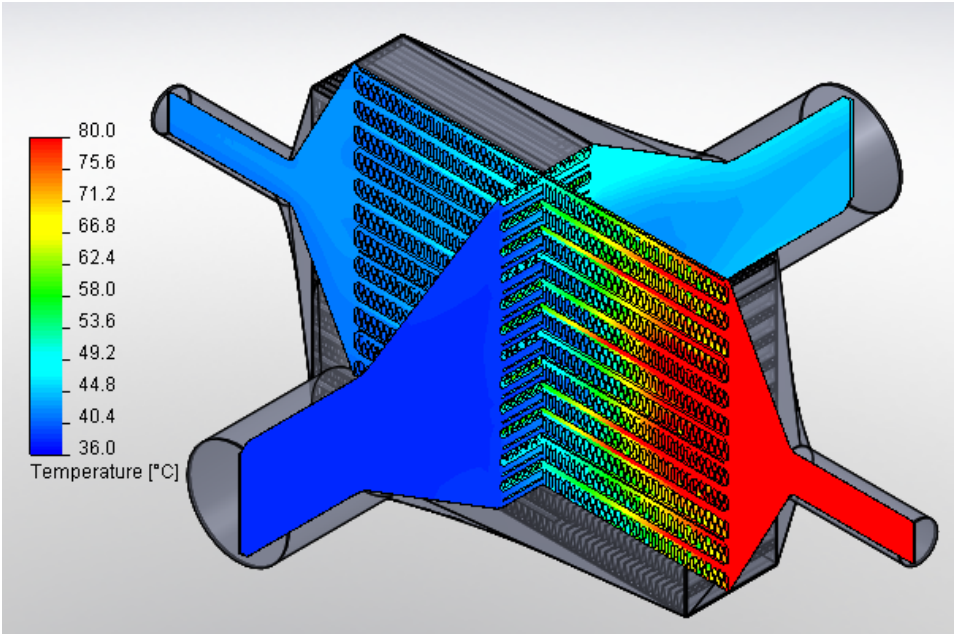
Число ячеек – 161 514

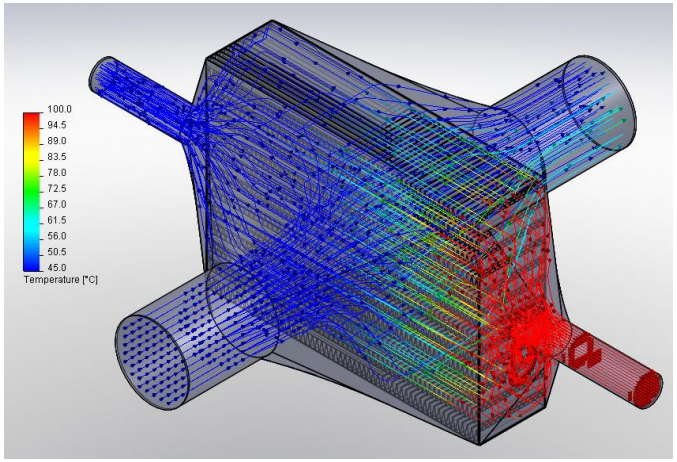
Расчет//инженерная оценка					
Hot line			Cold line		
ΔP, Pa	Q, W	Δt	ΔP, Pa	Q, W	Δt
56//66	475//500	43.3//45.6	6631//6785	475//500	45.3//49.6

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Алюминиевый поперечно-проточный пластинчато-ребристый теплообменник







Рабочее тело – воздух

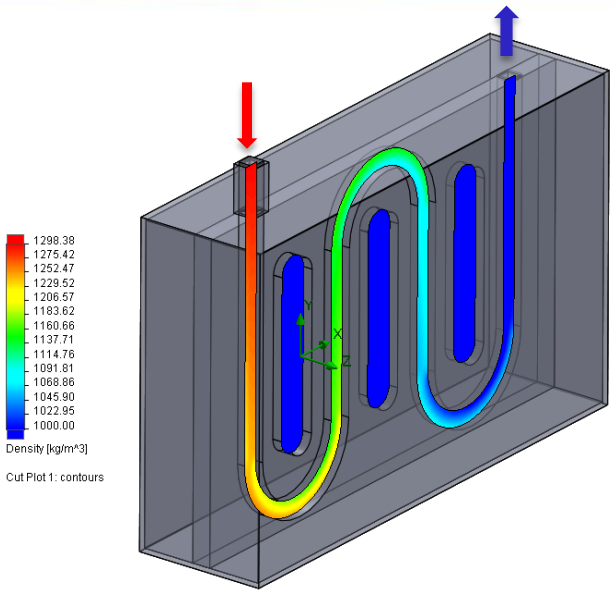
α=5.5 W/(m2K); t_∞=20 C

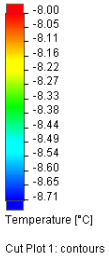
	RRL 3*	RRL 5**	Эксперимент
t^{cold}_{in}, C^0	38.06	38.06	38.06
t^{cold}_{out}, C^0	48.29	48.33	45.4
t^{hot}_{in}, C^0	159.7	159.7	159.7
t^{hot}_{out}, C^0	41.55	43.89	42.23

* - N=159 836; ** - N=1 000 272

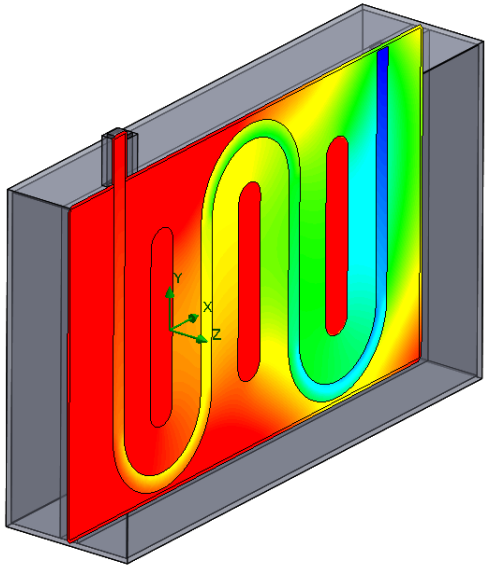
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет фазовых переходов в теплообменнике

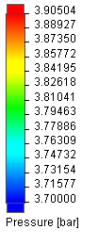


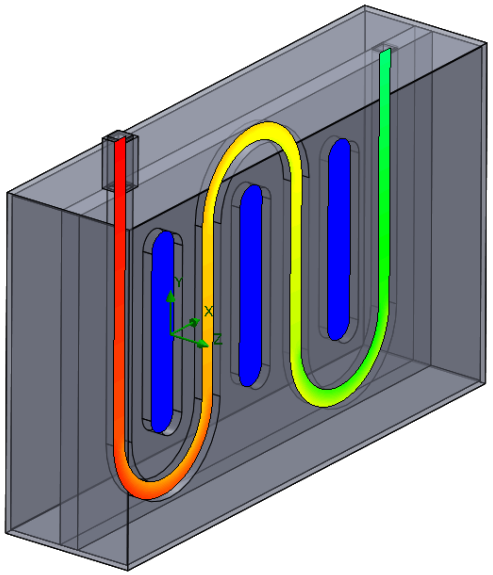


Модель испарителя, работающего на фреоне R22.
Входные условия: жидкий фреон при P=4 bar и t=-8 C



Условия на внешней поверхности бокса: α=10 W/(K*m2), t∞=20 C

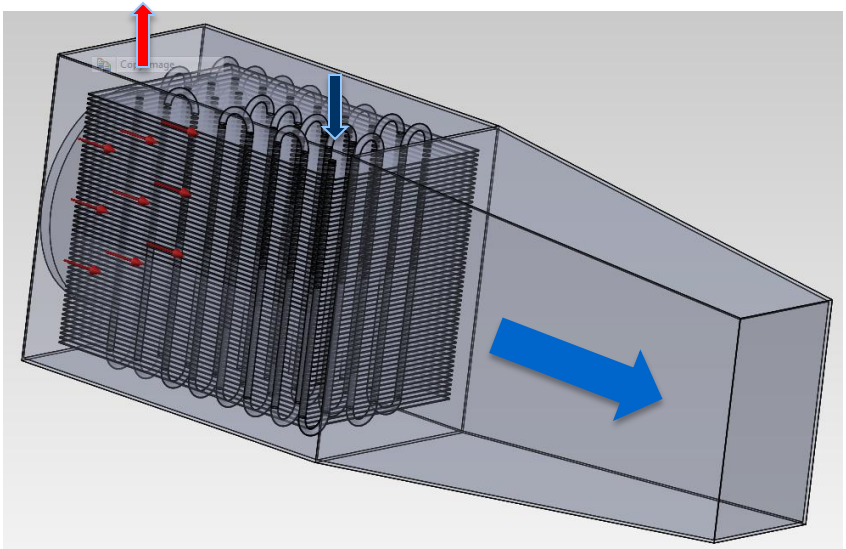


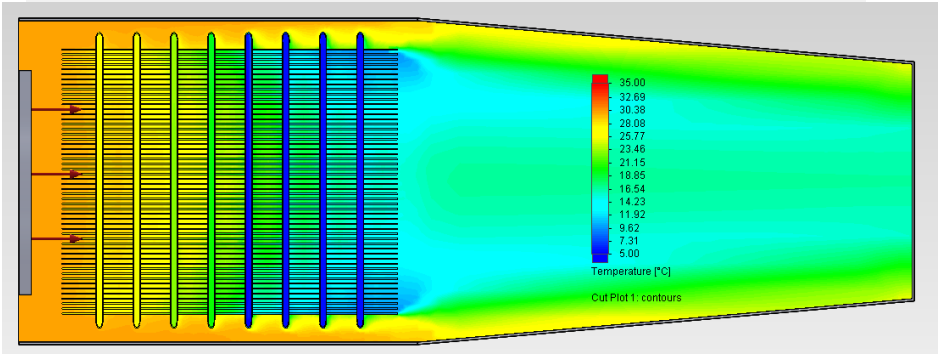


Давление фреона на выходе – 3.8 bar
Температура фреона на выходе – t=-8.6 C
Уменьшение температуры связано с испарением фреона

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Моделирование работы воздушного кондиционера





Граничные условия

Воздушная линия:

Fan: скорость на входе - 2.5 m/s

температура на входе - t=30 C

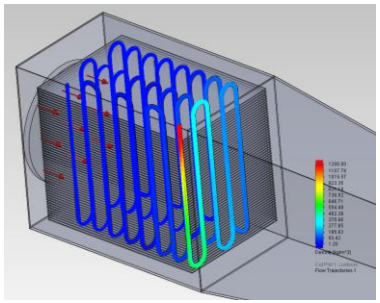
Выход: Давление – 101325 Pa

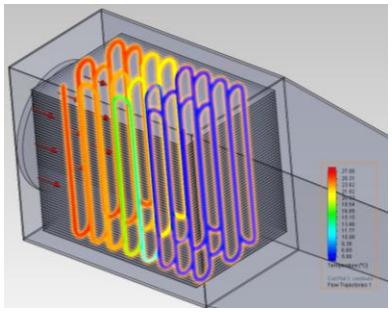
Линия фреона R22:

Вход: Давление – 6 bar,

Температура t=5 C - жидкость

Выход: Давление – 5.4 bar





Выходная температура воздуха – 18 C

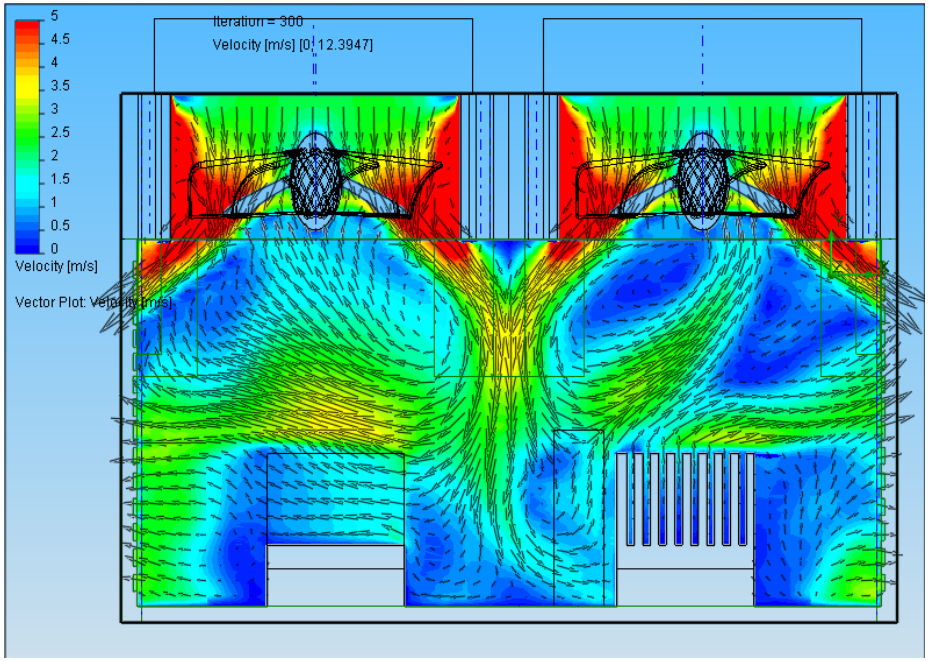
Выходная температура фреона R22 – 27 C - газ

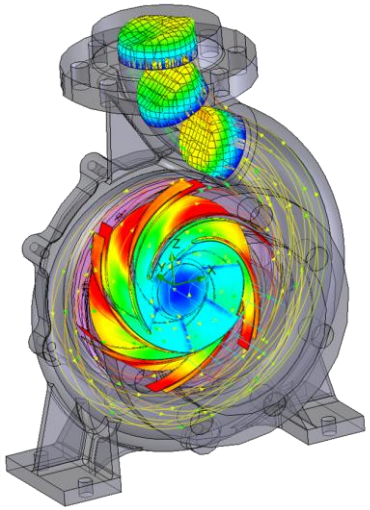
Расход воздуха ~ 3.8 m^3/min

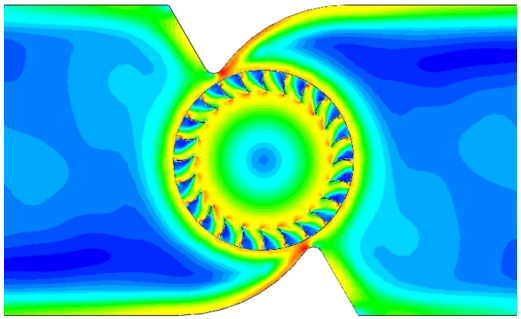
Расход фреона R22 ~ 5.4 g/s

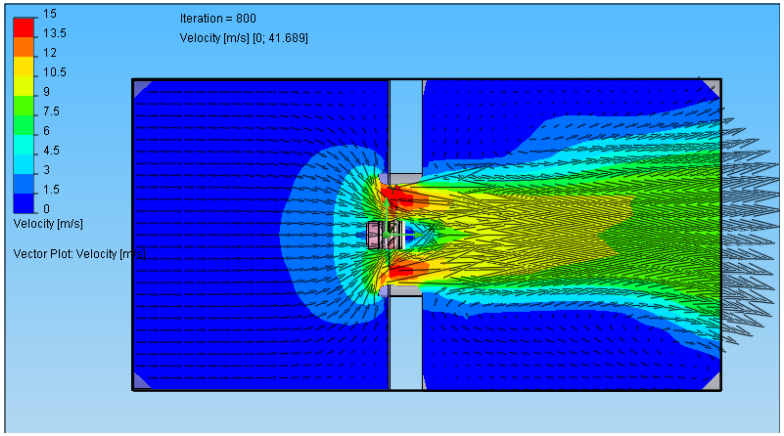
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

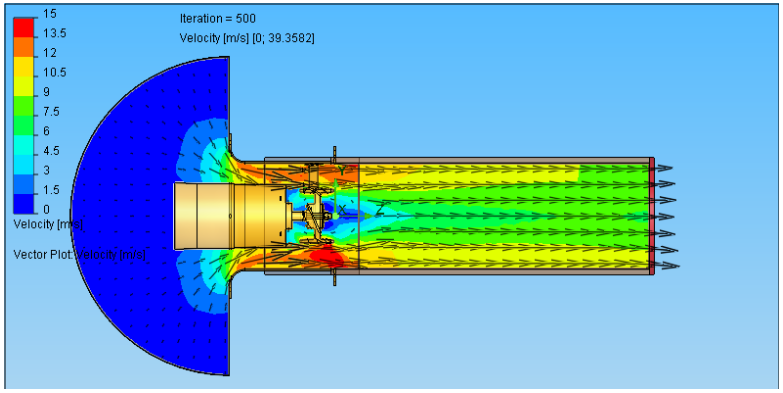
РАСЧЕТ НАСОСОВ, КОМПРЕССОРОВ, ВЕНТИЛЯТОРОВ





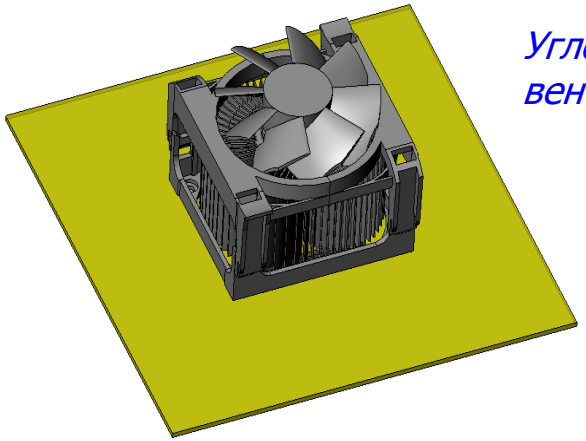




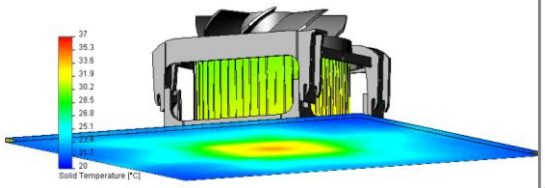


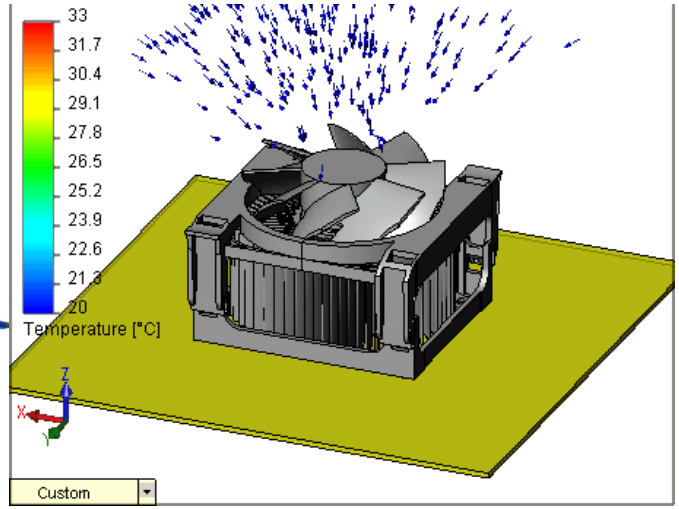
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

РАСЧЕТ ЧИПА, ОХЛАЖДАЕМОГО ВЕНТИЛЯТОРОМ

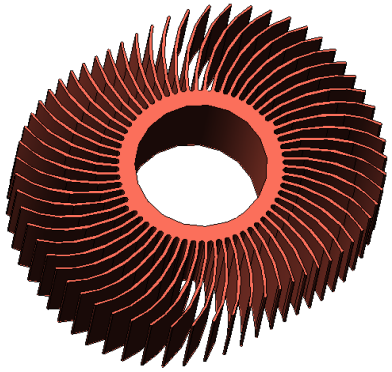


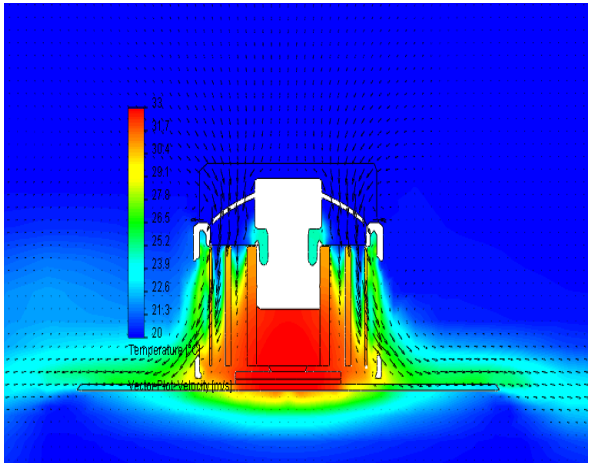
Угловая скорость вращения вентилятора – 4400 об/мин.





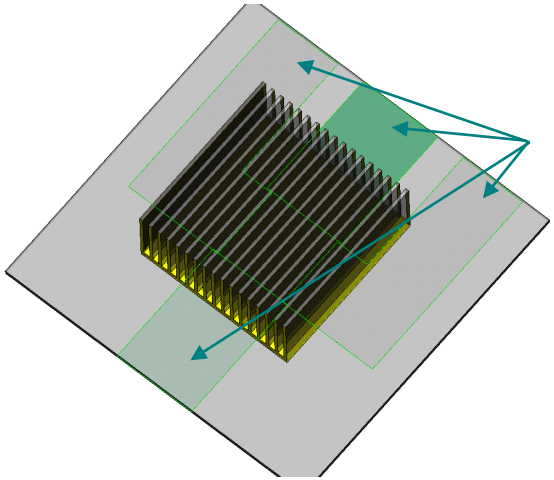
Die	[°C]	35
Substrate	[°C]	33
Solder and Air	[°C]	33
Bump and Uderfill	[°C]	35
Pcb	[°C]	25
Heatsink	[°C]	31





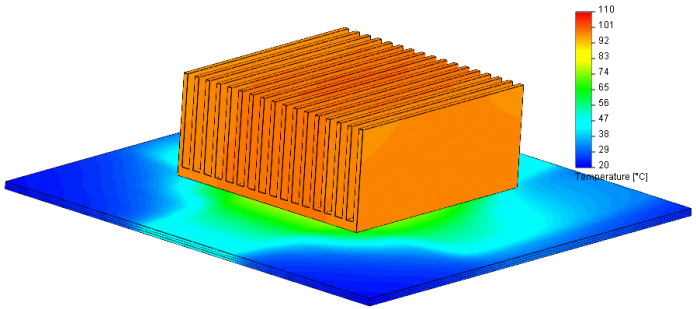
© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

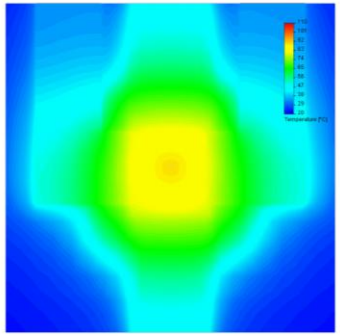
Расчет охлаждения чипа с моделированием тепловыделения от внутренних электрических линий

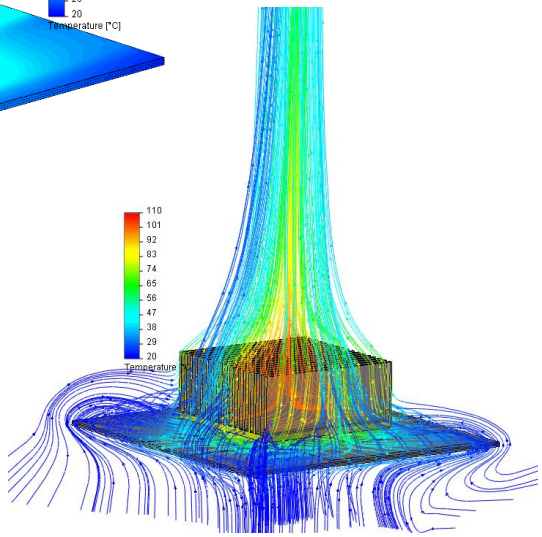


Плата имеет три слоя толщиной 0.5 мм

Между слоями нанесены дорожки из меди толщиной 50 мкм







Die	[°C]	103
Substrate	[°C]	88
Solder and Air	[°C]	87
Bump and Underfill	[°C]	103
Pcb 1 layer	[°C]	44
Heat sink	[°C]	99

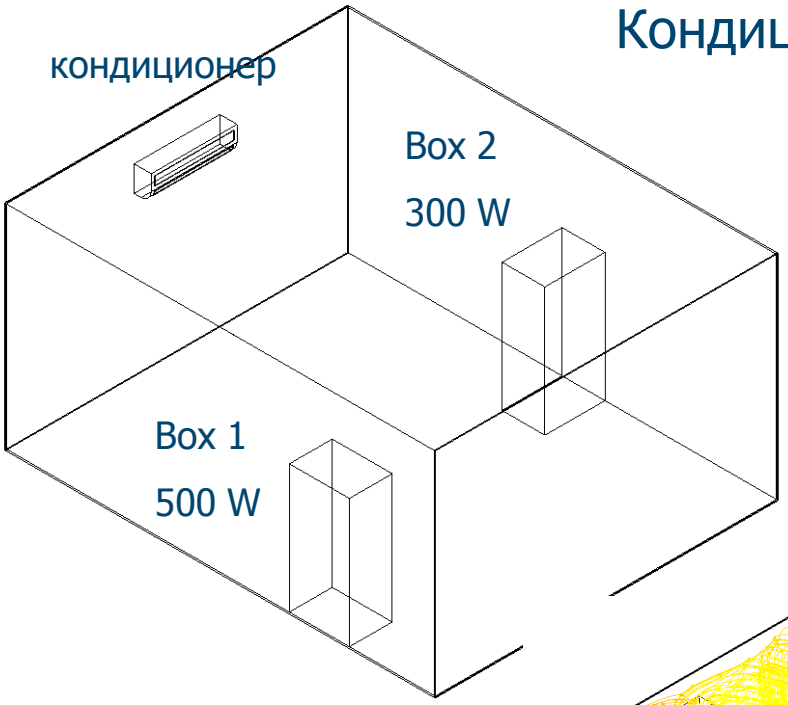
Number of mesh cells 252 724

Computational time ~ 2.1 h

© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Расчет вентиляции и кондиционирования помещений

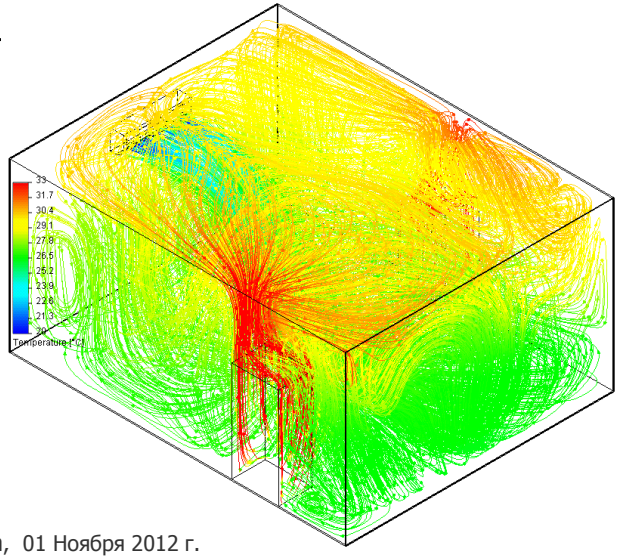
Кондиционирование комнаты с двумя боксами

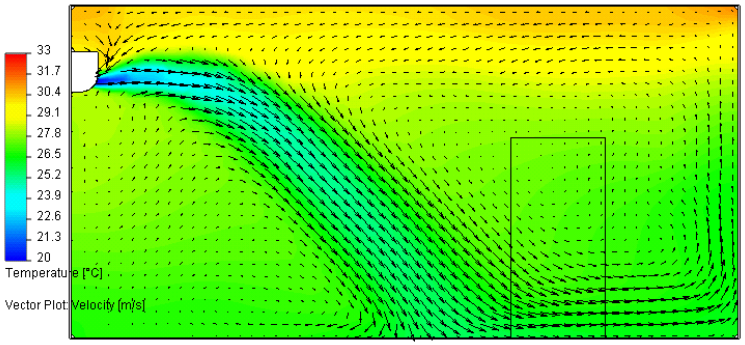


Кондиционируемая комната - теплоизолирована.

Box 1 выделяет 500 W and box 2 выделяет 300 W

Кондиционер работает при фиксированном расходе (0.07 m3/s) и выходной температуре - 20 C.





© 2010 Mentor Graphics Corp.
www.mentor.com

Mentor Graphics®

www.mentor.com