FloEFD™ for Creo

Обучающие примеры

Software Version 16

Rev. 10012017

© 2016 Mentor Graphics Corporation
All rights reserved.

This document contains information that is proprietary to Mentor Graphics Corporation. The original recipient of this document may duplicate this document in whole or in part for internal business purposes only, provided that this entire notice appears in all copies. In duplicating any part of this document, the recipient agrees to make every reasonable effort to prevent the unauthorized use and distribution of the proprietary information.

This document is for information and instruction purposes. Mentor Graphics reserves the right to make changes in specifications and other information contained in this publication without prior notice, and the reader should, in all cases, consult Mentor Graphics to determine whether any changes have been made.

The terms and conditions governing the sale and licensing of Mentor Graphics products are set forth in written agreements between Mentor Graphics and its customers. No representation or other affirmation of fact contained in this publication shall be deemed to be a warranty or give rise to any liability of Mentor Graphics whatsoever.

MENTOR GRAPHICS MAKES NO WARRANTY OF ANY KIND WITH REGARD TO THIS MATERIAL INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

MENTOR GRAPHICS SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY INCIDENTAL, INDIRECT, SPECIAL, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES WHATSOEVER (INCLUDING BUT NOT LIMITED TO LOST PROFITS) ARISING OUT OF OR RELATED TO THIS PUBLICATION OR THE INFORMATION CONTAINED IN IT, EVEN IF MENTOR GRAPHICS HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

U.S. GOVERNMENT LICENSE RIGHTS: The software and documentation were developed entirely at private expense and are commercial computer software and commercial computer software documentation within the meaning of the applicable acquisition regulations. Accordingly, pursuant to FAR 48 CFR 12.212 and DFARS 48 CFR 227.7202, use, duplication and disclosure by or for the U.S. Government or a U.S. Government subcontractor is subject solely to the terms and conditions set forth in the license agreement provided with the software, except for provisions which are contrary to applicable mandatory federal laws.

TRADEMARKS: The trademarks, logos and service marks ("Marks") used herein are the property of Mentor Graphics Corporation or other parties. No one is permitted to use these Marks without the prior written consent of Mentor Graphics or the owner of the Mark, as applicable. The use herein of a third-party Mark is not an attempt to indicate Mentor Graphics as a source of a product, but is intended to indicate a product from, or associated with, a particular third party. A current list of Mentor Graphics' trademarks may be viewed at: www.mentor.com/trademarks.

The registered trademark Linux® is used pursuant to a sublicense from LMI, the exclusive licensee of Linus Torvalds, owner of the mark on a world-wide basis.

End-User License Agreement: You can print a copy of the End-User License Agreement from: www.mentor.com/eula.

Mentor Graphics Corporation
8005 S.W. Boeckman Road, Wilsonville, Oregon 97070-7777
Telephone: 503.685.7000
Toll-Free Telephone: 800.592.2210
Website: www.mentor.com
SupportNet: supportnet.mentor.com/

Send Feedback on Documentation: supportnet.mentor.com/doc_feedback_form

Содержание

Список элементов FL-1

Базовый уровень

Течение воды в шаровом кране

Открытие модели A1-1
Создание проекта FloEFD A1-2
Задание граничных условий. A1-6
Задание инженерной цели A1-8
Задание настроек сетки A1-10
Запуск расчета A1-10
Наблюдение за расчетом. A1-11
Настройка прозрачности модели A1-13
Просмотр картин в сечении A1-13
Просмотр картин на поверхности A1-16
Просмотр изоповерхностей A1-17
Просмотр траекторий потока A1-18
Просмотр графиков A1-19
Просмотр поверхностных параметров A1-20
Исследование влияния изменений компонента Creo Elements/Pro & Creo

Parametric Ball A1-21
Клонирование проекта A1-22
Создание нового экземпляра в таблице семейства A1-22
Изменение геометрии модели A1-23
Замена экземпляра в сборке A1-23
Исследование влияния изменений конструкций в FloEFD A1-25

Сопряженный теплообмен

Открытие модели A2-1
Подготовка модели A2-2
Создание проекта FloEFD A2-3
Задание вентилятора A2-7
Задание граничных условий A2-9
Задание тепловых источников A2-10
Создание материалов в инженерной базе данных A2-12
Задание материалов A2-14
Задание инженерных целей A2-15
Задание поверхностных целей A2-17
Задание глобальных целей A2-19
Задание настроек сетки A2-20
Запуск расчета A2-21
Просмотр целей A2-21
Настройка прозрачности модели A2-23
Просмотр траекторий потока A2-23
Просмотр картин в сечении A2-26
Просмотр картин на поверхности A2-29

Пористые среды

Открытие модели A3-2
Создание проекта FloEFD A3-2
Задание граничных условий A3-4
Создание изотропной пористой среды в базе данных A3-5
Задание пористой среды A3-7
Задание поверхностных целей A3-8
Задание цели-выражения A3-9
Задание настроек сетки A3-11
Запуск расчета A3-11
Просмотр целей A3-11
Просмотр траекторий потока A3-12
Клонирование проекта A3-13
Создание однонаправленной пористой среды в базе данных A3-14
Задание пористой среды с однонаправленной проницаемостью . . . A3-15
Сравнение нейтрализаторов с изотропной и однонаправленной проницаемостью A3-15

Средний уровень

Определение гидравлических потерь

Открытие модели B1-2
Описание модели B1-2
Создание проекта FloEFD B1-3
Задание граничных условий B1-6
Задание поверхностных целей B1-9
Задание настроек сетки B1-10
Запуск на расчет B1-11
Наблюдение за расчетом B1-11
Клонирование проекта B1-12
Просмотр картин в сечении B1-13
Настройка списка параметров B1-17
Просмотр целей B1-18
Работа с калькулятором B1-19
Изменение настроек сетки B1-21

Коэффициент сопротивления цилиндра

Постановка задачи B2-1
Открытие модели B2-2
Создание проекта FloEFD B2-3
Задание 2D моделирования B2-6
Задание глобальной цели B2-7
Задание цели-выражения B2-8
Задание настроек глобальной сетки B2-9
Задание настроек локальной сетки B2-9
Адаптирование сетки в процессе расчета B2-10
Клонирование проекта B2-11
Изменение настроек проекта B2-11
Изменение цели-выражение B2-12
Создание шаблона B2-13
Создание проекта на основе шаблона B2-14
Запуск серии расчетов B2-16
Получение результатов B2-16

КПД теплообменника

Постановка задачи B3-1
Открытие модели B3-2
Создание проекта FloEFD B3-3
Задание условия симметрии B3-5
Задание подобласти течения B3-6
Задание граничных условий B3-8
Задание материалов B3-11
Задание объемной цели B3-12
Задание настроек сетки B3-13
Запуск расчета B3-13
Просмотр целей B3-13
Просмотр картин в сечении B3-15
Изменение диапазона отображения параметра B3-16
Отображение траекторий потока B3-17
Просмотр поверхностных параметров B3-20
Расчет КПД теплообменника B3-22

Оптимизация сетки

Постановка задачи B4-2
Открытие модели B4-3
Создание проекта FloEFD B4-3
Задание граничных условий и настроек глобальной сетки B4-4
Задание минимального зазора B4-6
Настройка сетки вручную B4-10
Применение опции локальная сетка B4-13
Задание контрольных плоскостей B4-14
Создание второй локальной сетки B4-17

Уровень опытного пользователя

Применение "EFD масштабирования"

Постановка задачи C1-1
Подход "EFD масштабирования" к решению задачи C1-3
Прямой подход к решению задачи C1-14
Результаты C1-18

Текстильная машина

Постановка задачи C2-1
Открытие модели C2-3
Создание проекта FloEFD C2-3
Задание граничных условий C2-4
Задание вращающихся стенок C2-4
Задание начальных условий C2-5
Задание целей C2-7
Задание настроек глобальной сетки C2-7
Результаты (гладкие стенки) C2-8
Отображение траекторий потока и траекторий движения частиц . . . C2-9
Моделирование шероховатых вращающихся стенок C2-11
Задание шероховатости стенок C2-11
Результаты (шероховатые стенки) C2-12

Течение неньютоновской жидкости в канале с массивом

цилиндрических препятствий

Постановка задачи C3-1
Открытие модели C3-2
Задание неньютоновской жидкости C3-2
Создание проекта C3-3
Задание граничных условий C3-3
Задание целей C3-4
Задание настроек глобальной сетки C3-4
Сравнение течения неньютоновской жидкости и течения воды C3-4

Радиационный теплообмен

Постановка задачи C4-1
Открытие модели C4-2
Случай 1: Внутренняя поверхность рефлектора абсолютно белая . . . C4-3
Случай 2: Поверхности рефлектора абсолютно черные C4-7
Случай 3: Рефлектор отсутствует C4-8
Результаты C4-9

Центробежный насос

Постановка задачи C5-1
Открытие модели C5-2
Создание проекта FloEFD C5-2
Задание граничных условий C5-3
Сведения к расчету КПД рабочего колеса C5-5
Задание целей проекта C5-6
Задание настроек глобальной сетки C5-7
Результаты C5-8

Кулер процессора

Постановка задачи C6-1
Открытие модели C6-2
Создание проекта FloEFD C6-2
Настройка расчетной области C6-3
Задание области вращения. C6-3
Задание неподвижных стенок C6-6
Задание материалов C6-7
Задание тепловых источников. C6-7
Задание настроек глобальной сетки C6-7
Задание целей проекта C6-8
Результаты C6-10

Маслоуловитель автомобиля

Постановка задачи C7-1
Открытие модели C7-2
Создание проекта FloEFD C7-2
Задание граничных условий C7-2
Задание целей проекта C7-3
Задание настроек глобальной сетки C7-4
Адаптирование сетки в процессе расчета C7-4
Задание материала "Моторное масло" C7-5
Расчет движения частиц масла C7-6
Результаты C7-8

Примеры для модуля HVAC

Галогенный прожектор 150W

Постановка задачи D1-1
Открытие модели D1-3
Создание проекта FloEFD D1-3
Настройка величины расчетной области D1-4
Задание подобласти течения D1-4
Задание тепловых условий и условий излучения D1-5
Задание материалов D1-9
Задание целей D1-10
Задание настроек глобальной сетки D1-10
Настройка локальной сетки D1-10
Настройка опций управления расчетом D1-11
Результаты D1-12

Больничная палата

Постановка задачи D2-1
Конфигурация модели D2-2
Создание проекта D2-3
Граничные условия D2-4
Задание тепловых источников D2-5
Задание опций управления расчетом D2-7
Задание целей D2-8
Изменение настроек глобальной сетки D2-8
Настройка локальной сетки D2-9
Результаты D2-9

Распространение загрязнений в уличном каньоне

Постановка задачи D3-1
Конфигурация модели D3-2
Создание проекта D3-3
Изменение размеров расчетной области D3-3
Задание целей D3-3
Задание настроек глобальной сетки D3-4
Настройка локальной сетки D3-4
Задание опций управления расчетом D3-5
Задание расчета распространения примеси D3-5
Результаты D3-7

Примеры для модулей Electronics Cooling и LED

Электронные компоненты

Постановка задачи E1-1
Открытие модели E1-3
Создание проекта FloEFD E1-5
Задание граничных условий E1-6
Задание перфорированных пластин E1-7
Задание 2R моделей E1-9
Задание тепловых трубок E1-11
Задание контактных сопротивлений E1-12
Задание печатной платы E1-13
Задание материалов E1-15
Задание целей проекта E1-15
Задание настроек глобальной сетки E1-16
Задание настроек локальной сетки E1-17
Результаты E1-18

Светодиодное освещение

Постановка задачи E2-1
Открытие модели E2-3
Создание проекта FloEFD E2-4
Настройка величины расчетной области E2-4
Задание материалов E2-5
Задание поверхностей радиационного теплообмена E2-6
Задание светодиодов E2-8
Задание целей E2-13
Задание настроек глобальной сетки E2-13
Результаты E2-14

Примеры для модуля Advanced

Горение в трубе

Постановка задачи F1-1
Случай 1: Горение без предварительного перемешивания веществ . . F1-2
Задание настроек глобальной сетки F1-7
Случай 2: Горение предварительно перемешанных веществ с воспламенением F1-10

Список элементов

В данном разделе содержится список физических моделей и элементов интерфейса FloEFD в порядке их появления в обучающих примерах. Чтобы узнать, в каких примерах используется определенный элемент, необходимо найти его в левом столбце таблицы. В строке, соответствующей данному элементу, такие примеры отмечены галочкой. Как правило, первичное использование какого-либо элемента в примерах сопровождается подробным описанием. Обучающие примеры представлены в списке под соответствующими номерами. Все примеры разделены на три категории: базовый уровень, средний уровень и уровень опытного пользователя.

📖 *Примеры **Базового уровня** помогут Вам овладеть основными принципами построения структуры и интерфейса FloEFD.*

A1 - Течение воды в шаровом кране (Ball Valve Design)

A2 - Сопряженный теплообмен (Conjugate Heat Transfer)

A3 - Пористые среды (Porous Media)

📖 *Примеры **Среднего уровня**, представляющие собой наиболее распространенные задачи, помогут Вам научиться решать различные инженерные задачи с помощью FloEFD.*

B1 - Определение гидравлических потерь (Determination of Hydraulic Loss)

B2 - Коэффициент сопротивления цилиндра (Cylinder Drag Coefficient)

B3 - КПД теплообменника (Heat Exchanger Efficiency)

B4 - Оптимизация сетки (Mesh Optimization)

🕮 *Выполнив примеры **Уровня опытного пользователя**, Вы научитесь применять различные элементы FloEFD для решения практических инженерных задач. Предварительно рекомендуется выполнить примеры базового уровня.*

C1 - Применение "EFD масштабирования" (Application of EFD Zooming)

C2 - Текстильная машина (Textile Machine)

C3 - Течение неньютоновской жидкости в канале с массивом цилиндрических препятствий (Non-Newtonian Flow in a Channel with Cylinders)

C4 - Радиационный теплообмен (Radiative Heat Transfer)

C5 - Центробежный насос (Rotating Impeller)

C6 - Кулер процессора (CPU Cooler)

C7 - Маслоуловитель автомобиля (Oil Catch Can)

🕮 *Примеры **модуля HVAC** позволяют ознакомиться с использованием дополнительных возможностей FloEFD, предназначенных для решения задач нагревания, вентиляции и кондиционирования воздуха. Эта функциональность доступна только пользователям модуля HVAC.*

D1 - Галогенный прожектор 150W (Halogen Floodlight 150W)

D2 - Больничная палата (Hospital Room)

D3 - Распространение загрязнений в уличном каньоне (Pollutant Dispersion in the Street Canyon)

🕮 *Примеры модулей **Electronics Cooling** и **LED** позволяют ознакомиться с использованием дополнительных возможностей FloEFD, предназначенных для моделирования различных электронных компонентов. Эта функциональность доступна только пользователям модулей Electronics Cooling и LED.*

E1 - Электронные компоненты (Electronic components)

E2 - Светодиодное освещение (LED lighting)

🕮 *Примеры **модуля Advanced** позволяют ознакомиться с использованием дополнительных возможностей FloEFD, предназначенных для решения определенных инженерных задач, таких как горение газообразных смесей. Эта функциональность доступна только пользователям модуля Advanced.*

F1 - Горение в трубе (Combustion in a Tube)

	Базовый уровень			Средний уровень				Уровень опытного пользователя							Дополнительные модули					
	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	B 3	B 4	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	D 1	D 2	D 3	E 1	E 2	F 1
РАЗМЕРНОСТЬ																				
Двумерное течение					✔															
Трехмерное течение	✔	✔	✔	✔		✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔
ТИП ЗАДАЧИ																				
Внешняя задача					✔						✔		✔		✔		✔		✔	
Внутренняя задача	✔	✔	✔	✔		✔	✔	✔	✔	✔		✔		✔		✔		✔		✔
ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ																				
Стационарная задача	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔		✔	✔	
Нестационарная задача					✔												✔			✔
Жидкости	✔			✔	✔	✔				✔										
Газы		✔	✔			✔	✔	✔	✔			✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	
Неньютоновские жидкости										✔										
Горючие смеси																				✔
Наличие нескольких текучих сред																				
Смеси текучих сред							✔									✔				✔
Разделенные потоки текучих сред (такие как подобласти течения)						✔									✔					
Теплопроводность в твердых телах		✔				✔		✔			✔		✔		✔			✔	✔	
Только теплопроводность в твердых телах											✔									
Гравитационные эффекты							✔								✔	✔		✔	✔	

	Базовый уровень			Средний уровень				Уровень опытного пользователя							Дополнительные модули					
	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	B 3	B 4	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	D 1	D 2	D 3	E 1	E 2	F 1
Только ламинарное течение										✔										
Пористые среды			✔				✔													
Радиационный теплообмен											✔				✔				✔	
Поглощение в твердом теле															✔				✔	
Спектр излучения															✔				✔	
Шероховатость									✔											
Двухфазные течения (наличие частиц или капель в потоке)									✔					✔						
Вращение																				
Глобальное вращение системы координат												✔								
Локальные области вращения													✔							
УСЛОВИЯ																				
Расчетная область					✔			✔			✔		✔		✔		✔		✔	
Симметрия					✔	✔									✔		✔			
Начальные и внешние условия																				
Параметры скорости					✔												✔			
Зависимость					✔												✔			
Термодинамические параметры						✔							✔			✔				
Параметры турбулентности					✔												✔			

	Базовый уровень			Средний уровень				Уровень опытного пользователя							Дополнительные модули					
	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	B 3	B 4	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	D 1	D 2	D 3	E 1	E 2	F 1
Концентрации веществ							✔									✔				
Параметры материалов													✔							
Граничные условия																				
Расход/скорость																				
Массовый расход на входе	✔					✔			✔											✔
Объемный расход на входе							✔			✔		✔		✔		✔				
Объемный расход на выходе							✔									✔				
Скорость на входе			✔	✔		✔														
Давление																				
Статическое давление	✔		✔	✔					✔	✔				✔						
Давление окружающей среды		✔				✔	✔	✔				✔				✔		✔		✔
Стенка																				
Реальная стенка									✔			✔	✔							
Параметры граничных условий	✔		✔	✔		✔	✔		✔	✔		✔								
Перенесенные граничные условия								✔												
Вентиляторы		✔						✔										✔	✔	
Контактные сопротивления																		✔	✔	
Перфорированные пластины																		✔	✔	

	Базовый уровень			Средний уровень				Уровень опытного пользователя							Дополнительные модули					
	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	B 3	B 4	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	D 1	D 2	D 3	E 1	E 2	F 1
Условия в объеме																				
Подобласти течения						✔									✔					
Начальные условия																				
Параметры скорости									✔											
Зависимость									✔											
Параметры материалов											✔									
Материал		✔				✔		✔			✔		✔		✔			✔	✔	
Полупрозрачный материал															✔				✔	
Пористая среда			✔				✔													
Тепловые источники																				
Поверхностные тепловые источники																				
Мощность тепловыделения								✔			✔					✔				
Объемные тепловые источники																				
Температура		✔													✔					
Мощность тепловыделения		✔						✔					✔					✔	✔	✔
Источники, зависящие от цели															✔					

	Базовый уровень			Средний уровень				Уровень опытного пользователя							Дополнительные модули					
	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	B 3	B 4	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	D 1	D 2	D 3	E 1	E 2	F 1
Условия излучения																				
Радиационные источники											✔				✔					
Поверхности радиационного теплообмена											✔				✔				✔	
Элементы модуля электроники (требуется лицензия на модуль Electronics Cooling)																				
2R модели																		✔		
Тепловые трубки																		✔		
Печатные платы																		✔		
Элементы модуля светодиодов (требуется лицензия на модуль LED)																				
Светодиодные компоненты																			✔	
Примеси (требуется лицензия на модуль HVAC)																				
Параметры расчета распространения примеси																	✔			
Источники на поверхности																				
Массовый расход																	✔			
СОЗДАНИЕ ПРОЕКТА																				
Мастер проекта и навигатор	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔
Использование шаблона					✔															
Клонирование проекта	✔		✔	✔	✔			✔	✔	✔	✔									✔
Общие настройки					✔					✔										
Копирование элементов проекта								✔												

	Базовый уровень			Средний уровень				Уровень опытного пользователя							Дополнительные модули					
	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	B 3	B 4	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	D 1	D 2	D 3	E 1	E 2	F 1
ЦЕЛИ																				
Глобальная цель		✔			✔				✔			✔	✔	✔		✔	✔		✔	✔
Поверхностная цель	✔	✔	✔	✔				✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔		✔	✔	✔	✔
Объемная цель		✔				✔		✔	✔		✔				✔			✔	✔	
Точечная цель													✔							
Цель-выражение			✔		✔					✔		✔	✔	✔						
НАСТРОЙКИ СЕТКИ																				
Начальная сетка																				
Автоматические настройки																				
Уровень начальной сетки								✔					✔		✔	✔	✔		✔	
Минимальный зазор	✔	✔		✔			✔	✔	✔	✔		✔	✔			✔			✔	✔
Настройка сетки вручную																				
Контрольные плоскости							✔						✔					✔		
Граница тело/текучая среда											✔		✔					✔		
Каналы							✔						✔							
Локальная сетка																				
Дробление ячеек							✔								✔	✔	✔	✔		
Каналы							✔	✔									✔	✔		
Равноудаленное дробление					✔															

	Базовый уровень			Средний уровень				Уровень опытного пользователя							Дополнительные модули					
	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	B 3	B 4	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	D 1	D 2	D 3	E 1	E 2	F 1
ИНСТРУМЕНТЫ																				
Зависимость					✔				✔						✔					
Настройка единиц измерения		✔						✔												
Инженерная база данных																				
Задание элементов пользователем		✔	✔					✔		✔				✔	✔		✔	✔	✔	✔
Проверка геометрии				✔												✔				
Газодинамический калькулятор				✔																
Панели инструментов						✔														
Фильтр																		✔		
Управление компонентами							✔	✔			✔	✔	✔			✔				
ОПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РАСЧЕТОМ																				
Условия завершения																	✔			✔
Адаптирование сетки к решению														✔						
Расчет комфортных параметров																✔				
ЗАПУСК НА РАСЧЕТ																				
Серия расчетов					✔			✔			✔									

	Базовый уровень			Средний уровень				Уровень опытного пользователя							Дополнительные модули					
	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	B 3	B 4	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	D 1	D 2	D 3	E 1	E 2	F 1
НАБЛЮДЕНИЕ ЗА РАСЧЕТОМ																				
Цель	✔																			
Предварительный просмотр	✔																			
ПОЛУЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ																				
Картина в сечении	✔	✔		✔		✔	✔	✔	✔						✔	✔	✔		✔	✔
Картина на поверхности	✔	✔																	✔	
Изоповерхности	✔															✔	✔			
Траектории потока	✔	✔	✔			✔			✔								✔			
Расчет движения частиц									✔					✔						
График	✔																			
Поверхностные параметры	✔					✔														
Объемные параметры																✔				
Цель		✔	✔	✔	✔	✔		✔		✔			✔					✔		
Настройка списка параметров				✔																
Сводный отчет о результатах																✔				
Выноски																			✔	

	Базовый уровень			Средний уровень				Уровень опытного пользователя							Дополнительные модули					
	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	B 3	B 4	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	D 1	D 2	D 3	E 1	E 2	F 1
Режим отображения																				
Показать/Скрыть геометрию модели				✔		✔	✔													
Прозрачность	✔		✔																	
Применение освещения	✔																			
ОПЦИИ																				
Использовать CAD геометрию							✔													
Показать сетку							✔													

A

Базовый уровень

Базовый уровень включает примеры, которые демонстрируют основные принципы построения структуры и интерфейса FloEFD. Настоятельно рекомендуется выполнить эти примеры в первую очередь.

A1 - Течение воды в шаровом кране (Ball Valve Design)

A2 - Сопряженный теплообмен (Conjugate Heat Transfer)

A3 - Пористые среды (Porous Media)

Базовый уровень:

A1

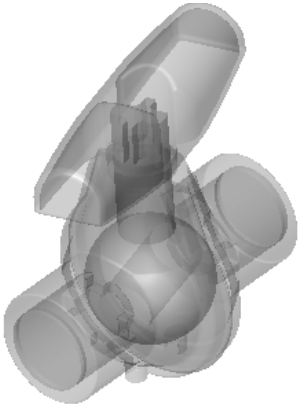
Течение воды в шаровом кране

В данном примере рассматривается течение воды в шаровом кране до и после внесения конструктивных изменений. Основная цель данной задачи - показать, насколько просто моделировать течение жидкости с помощью FloEFD. Этот пример демонстрирует, что FloEFD является наилучшим инструментом, позволяющим инженерам исследовать различные варианты конструкций.

Открытие модели

1 Скопируйте папку **A1 - Ball Valve** из установочной директории (**<install_dir>\Examples\Tutorial Examples**) в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные. Запустите **FloEFD**.

2 Кликните **Файл > Открыть**. В диалоговом окне **Файл Открыть** перейдите к сборке `ball_valve.asm`, расположенной в папке **A1 - Ball Valve** и нажмите кнопку **Открыть** (или дважды кликните по файлу сборки). Также Вы можете перетащить файл `ball_valve.asm` в свободную область окна Creo Elements/Pro & Creo Parametric.



🕮 *Представленный здесь шаровой кран открывается и закрывается поворотом рукоятки. Угол открытия крана задан в качестве сопряжения.*

3 Подсветите **крышки**, кликнув по компонентам LID_1 и LID_2 в дереве модели.

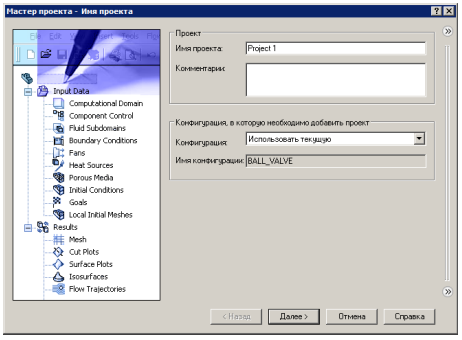
📖 *Существенных изменений модели для использования в FloEFD не требуется. Пользователю необходимо просто закрыть внутренний объем с помощью тел, которые называются крышками. В данном примере они для удобства сделаны полупрозрачными.*

📖 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку* `ball_valve.asm`*, расположенную в папке* ***A1 - Ball Valve\Ready To Run****, и запустить на расчет нужные проекты.*

Создание проекта FloEFD

1 В главном меню кликните **Flow Analysis > Проект > Мастер проекта**.

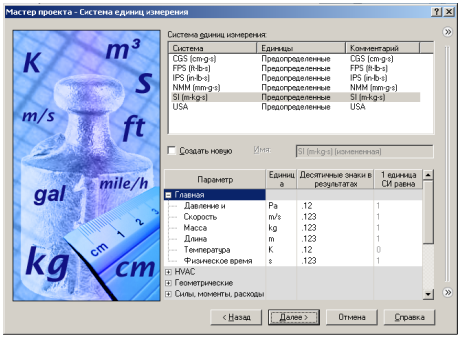
2 В открывшемся окне Мастера проекта введите имя нового проекта FloEFD: `Project 1`.



📖 *FloEFD создаст новый проект и сохранит все данные в новую папку.*

Кликните **Далее**.

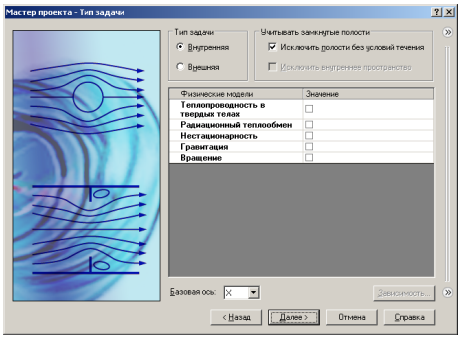
3 Выберите систему единиц измерения (для этого проекта **SI**). После прохождения Мастера проекта Вы сможете в любое время изменить заданную систему единиц измерения, выбрав **Flow Analysis > Единицы измерения**.



📖 *В FloEFD есть несколько предопределенных систем единиц измерения. Вы также можете создать свою собственную и переключаться между ними.*

Кликните **Далее**.

4 В качестве типа задачи по умолчанию выбран тип **Внутренняя**. Для целей данной задачи необходим именно такой тип. Физические модели включать не требуется.



🕮 *Внутренний тип задачи означает, что будет исследоваться течение **внутри** какой-то конструкции. Другой тип задачи - внешняя - означает, что будет исследоваться течение **снаружи** объекта. В диалоговом окне* **Тип задачи** *можно также исключить полости, которые не являются существенными для исследования течения. FloEFD не будет учитывать такие области при расчете, и, следовательно, будет затрачиваться меньше памяти и ресурсов процессора.*

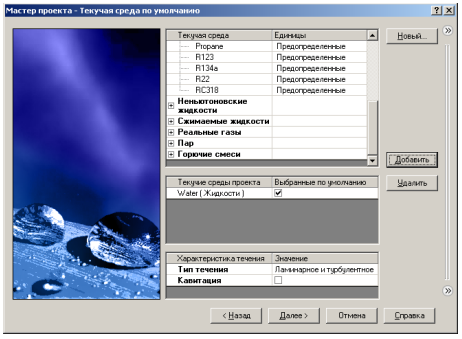
🕮 *Помимо расчета течений, в FloEFD также предусмотрены возможности решения следующих задач:*

- *теплопроводность в твердых телах, включая излучение между поверхностями;*
- *нестационарные задачи;*
- *задачи естественной конвекции, в которых могут учитываться гравитационные эффекты;*
- *задачи, в которых присутствуют вращающиеся компоненты.*

Однако в данной задаче включение этих опций не требуется.

Кликните **Далее**.

5 В дереве **Текучая среда** раскройте группу **Жидкости** и в качестве текучей среды выберите **Water**. Чтобы добавить элемент **Water**, Вы можете дважды кликнуть по нему или, выбрав его в дереве, нажать кнопку **Добавить**.



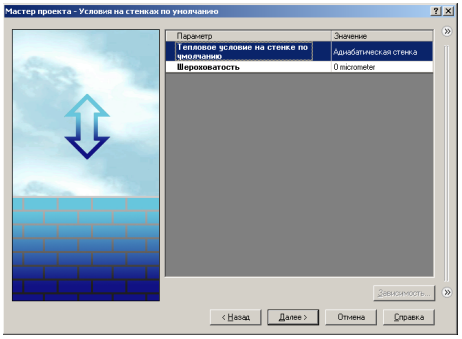
📖 *FloEFD позволяет в одной задаче производить расчет потока текучих сред различных типов, однако в таком случае они должны быть отделены друг от друга стенками. Перемешивание текучих сред возможно, только если они принадлежат к одному типу.*

📖 *В FloEFD есть встроенная база данных со свойствами различных жидкостей, газов и материалов (материалы используются в задачах сопряженного теплообмена). Вы также можете создать свое собственное вещество. Для каждой задачи может быть выбрано до десяти жидкостей и газов.*

📖 *В FloEFD может быть задан любой тип течения:* ***Только турбулентное****,* ***Только ламинарное*** *или* ***Ламинарное и турбулентное****. Если течение полностью ламинарное, то уравнениями переноса турбулентной энергии можно пренебречь. В FloEFD также предусмотрен расчет течений сжимаемых газов с учетом малых или больших чисел Маха. В данной задаче принимаются характеристики течения жидкости, заданные по умолчанию.*

Кликните **Далее**.

6 Не меняя заданные по умолчанию условия на стенках, кликните **Далее**.

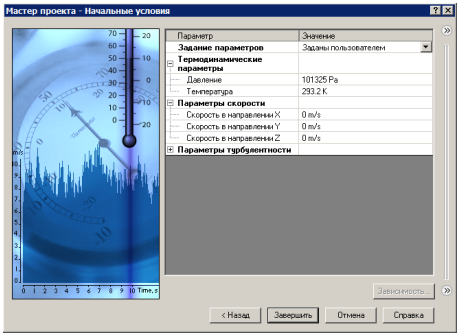


📖 *Т.к. опция* ***Теплопроводность в твердых телах*** *не была включена, тепловое условие необходимо определить на всех стенках модели, контактирующих с текучей средой. Чтобы задать стенки полностью теплоизолированными, следует указать условие* **Адиабатическая стенка** *(именно оно выбрано по умолчанию).*

📖 *Вы также можете задать значение шероховатости, которое по умолчанию будет применяться ко всем стенкам модели. Значение шероховатости определяется параметром* R_z.

📖 *Чтобы задать на каких-либо стенках модели другое тепловое условие или другое значение шероховатости, в дальнейшем можно будет воспользоваться граничным условием* **Реальная стенка**.

7 Оставьте заданные по умолчанию начальные условия.



🕮 *На этом шаге можно изменить заданные по умолчанию значения давления, температуры и скорости. Чем ближе эти значения будут к окончательным результатам расчета, тем быстрее завершится расчет. Однако, т.к. в этом случае сведений о предполагаемых результатах нет, не будем менять значения этих параметров.*

Кликните **Завершить**.

FloEFD создаст новый проект с прикрепленными к нему данными FloEFD.

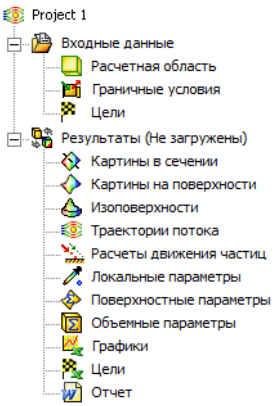
Дерево проектов FloEFD и дерево анализа FloEFD появятся на вкладке FloEFD Analysis, расположенной на панели навигатора.

Обратите внимание, что новый проект имеет то имя, которое было присвоено ему в Мастере проекта.

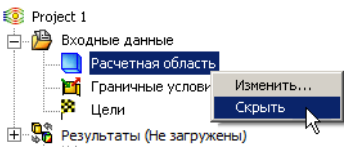
FloEFD Analysis и раскройте все группы элементов дерева анализа FloEFD.

Кликните , чтобы скрыть дерево проектов FloEFD.

🕮 *Дерево анализа FloEFD используется для постановки задачи точно так же, как дерево модели используется для создания моделей. Дерево анализа FloEFD полностью настраиваемое; Вы можете в любое время выбрать, какие группы элементов отобразить в дереве, а какие скрыть. Как только Вы включаете новый элемент, соответствующая скрытая группа отображается в дереве. До тех пор, пока Вы не удалите последний элемент этого типа, группа останется видимой.*



Полупрозрачный параллелепипед, появившийся в графической части окна, обозначает границы расчетной области. Чтобы скрыть его, правой кнопкой мыши кликните по элементу **Расчетная область** и из контекстного меню выберите **Скрыть**.

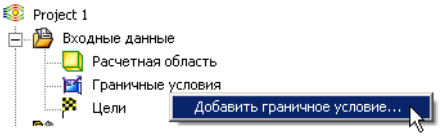


Элемент **Расчетная область** используется для изменения размеров объема, который рассматривается в задаче.

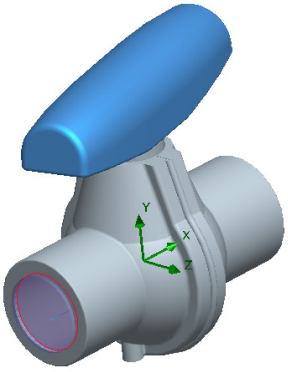
Задание граничных условий

Граничное условие необходимо задавать на входе текучей среды в модель и на выходе из нее. В качестве граничного условия может быть задано давление, массовый или объемный расход и скорость.

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**.

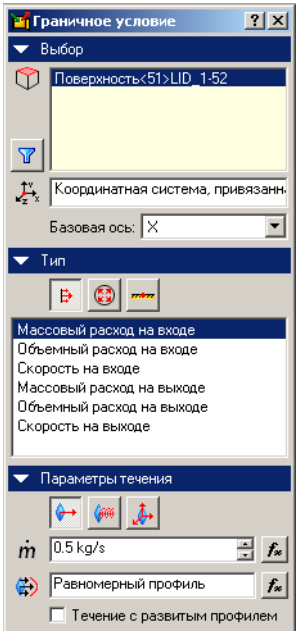


2 Выберите **внутреннюю** поверхность крышки на входе (компонент **LID_1**), как показано на рисунке. (Чтобы выбрать внутреннюю поверхность, установите фильтр по **Геометрии** и правой кнопкой мыши кликайте по компоненту **Lid_1**, пока внутренняя поверхность крышки не подсветится, затем нажмите левую кнопку мыши).

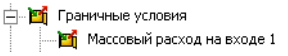


3 Нажмите кнопку **Расход/скорость** и выберите **Массовый расход на входе**.

4 Задайте **Массовый расход** $\dot{m}$ равным `0.5 kg/s`.



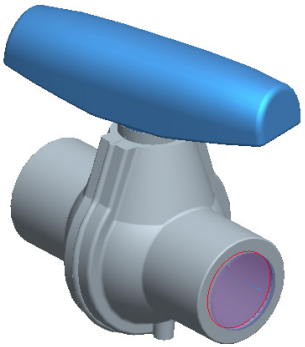
5 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится новый элемент **Массовый расход на входе 1**.



📖 *Для FloEFD это означает, что в соответствующее отверстие каждую секунду втекает 0.5 килограмма воды. В этом диалоговом окне также можно задать закрутку потока, неравномерный профиль и нестационарные свойства потока. Нет необходимости задания массового расхода на выходе, т.к. он равен массовому расходу на входе (сохранение массы). На выходе следует задать другое условие, например, давление.*

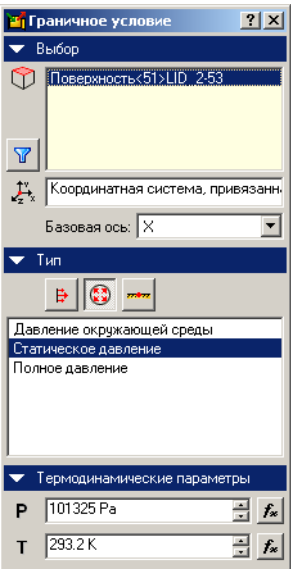
6 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие.**

7 Выберите **внутреннюю** поверхность крышки на выходе (компонент **LID_2**), как показано на рисунке. (Чтобы выбрать внутреннюю поверхность, установите фильтр по **Геометрии** и правой кнопкой мыши кликайте по компоненту **Lid_2**, пока внутренняя поверхность крышки не подсветится, затем нажмите левую кнопку мыши).

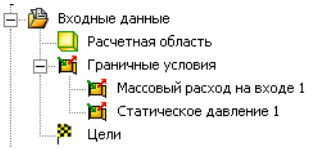


8 Нажмите кнопку **Давление** и выберите **Статическое давление**.

9 Заданные по умолчанию **Термодинамические параметры**, **Параметры турбулентности**, **Параметры пограничного слоя** и **Опции** не требуют изменений.



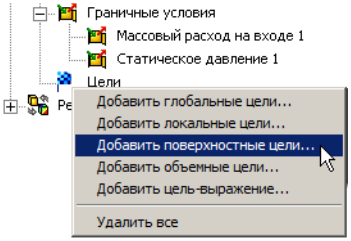
10 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится новый элемент **Статическое давление 1**.



📖 *Для FloEFD это означает, что из соответствующего отверстия модели поток вытекает в область статического атмосферного давления. В этом диалоговом окне также могут быть заданы нестационарные свойства давления.*

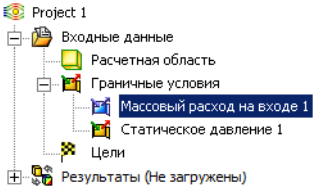
Задание инженерной цели

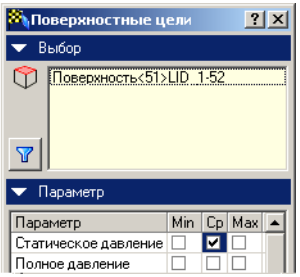
1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить поверхностные цели.**



2 Для того, чтобы выбрать поверхность, на которой будет задана цель, выберите элемент **Массовый расход на входе 1**.

3 В таблице **Параметр** поставьте галочку **Ср** в поле **Статическое**

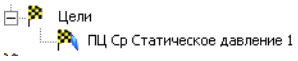




давление. Поставленная по умолчанию галочка **Исп. для сход.** означает, что создаваемая цель будет использоваться для контроля сходимости.

🕮 *Если галочка* **Исп. для сход.** *(Использовать для контроля сходимости) не будет поставлена, цель не будет оказывать влияния на критерии остановки расчета. Такие цели могут использоваться в качестве параметров контроля: они служат для получения дополнительной информации о том, какие процессы происходят в исследуемой модели, и при этом не оказывают влияния на другие результаты и на общее время расчета.*

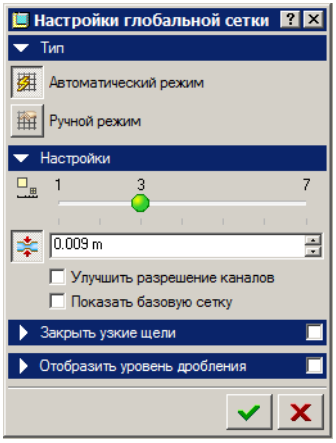
4 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится новый элемент **ПЦ Ср Статическое давление 1**.



🕮 *Инженерные цели - это способ "объяснить" FloEFD, что Вы хотите получить в результате расчета, а также возможность уменьшить время получения окончательного результата. Задавая какой-либо параметр в качестве цели проекта, Вы "показываете" FloEFD, для каких параметров важно добиться сходимости (это параметры, выбранные в качестве целей), а какие параметры можно рассчитать с меньшей точностью (параметры, которые в качестве целей не выбраны). Цели могут быть заданы внутри всей расчетной области (Глобальные цели), внутри выбранного объема (Объемные цели), на выбранной поверхности (Поверхностные цели) или в заданной точке (Точечные цели). Более того, FloEFD может рассматривать среднее, минимальное или максимальное значение каждой цели. Вы также можете создать Цель-выражение, представляющую собой формулу, в которую могут входить созданные цели и параметры входных данных (в качестве переменных), связанные между собой основными математическими функциями. Цель-выражение позволит рассчитать значение интересующего параметра (например, перепад давления) и сохранить эту информацию в проекте для дальнейшего использования.*

Кликните **Файл > Сохранить**.

Задание настроек сетки



1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

2 По умолчанию выбран **Автоматический режим** .

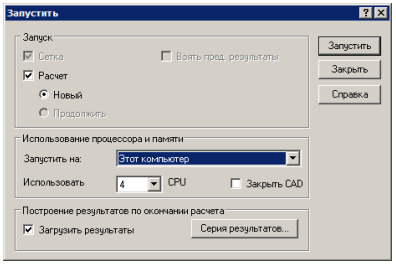
3 В группе **Настройки** по умолчанию задан **Уровень начальной сетки** .

4 Нажмите кнопку **Минимальный зазор** . В поле **Минимальный зазор** введите значение `0.0093 m`.

🕮 *Уровень начальной сетки определяет требуемый уровень точности результатов. Он не только контролирует разрешение геометрии сеткой, но и определяет множество параметров решения, например критерии сходимости. Чем выше уровень начальной сетки, тем более плотной будет сетка и тем более строгими будут критерии сходимости. Таким образом, уровень начальной сетки устанавливает соответствие между точностью результатов и временем расчета. Если в модели присутствуют мелкие элементы, важно задать значения минимального зазора. Это гарантирует, что сетка "не пропустит" эти мелкие элементы. В рассматриваемой модели в качестве минимального зазора задается значение минимального проходного сечения.*

5 Кликните **OK** .

Запуск расчета



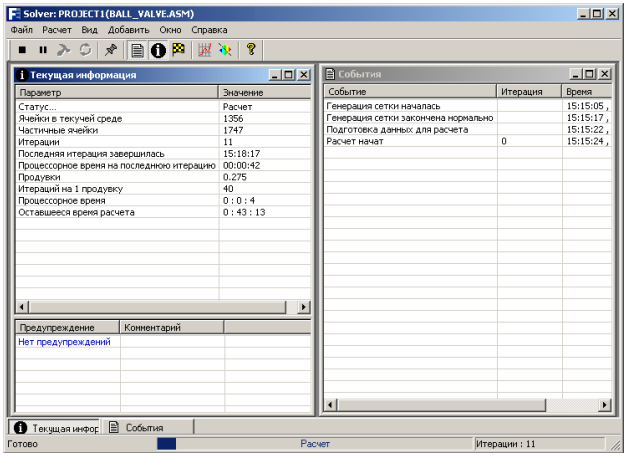
1 Кликните **Flow Analysis > Расчет > Запустить**.

🕮 *Опция* **Загрузить результаты** *уже выбрана, т.е. после окончания расчета результаты будут загружены автоматически.*

2 Нажмите кнопку **Запустить**.

🕮 *На стандартном ПК процесс расчета займет менее минуты.*

Наблюдение за расчетом



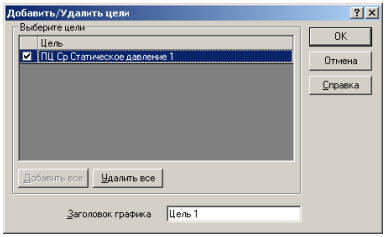
На данном рисунке представлено диалоговое окно монитора. Справа, по умолчанию, выводится информация о всех событиях, происходящих в процессе расчета. Слева выводится текущая информация о сетке, а также предупреждения относительно расчета. При расчете данной задачи появится предупреждение о следующей ошибке: "Возникновение обратного течения на границе". Значение данного сообщения будет объяснено позже.

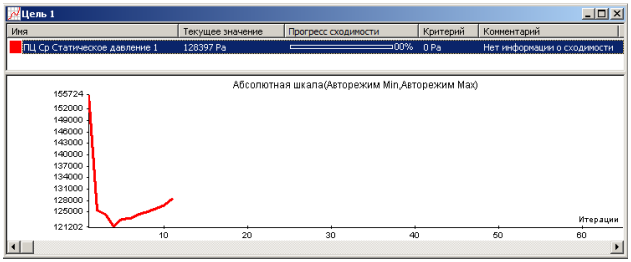
1 После того, как начнется расчет и пройдет несколько итераций (взгляните на строку **Итерации** в окне **Текущая информация**), на панели инструментов **Солвера** нажмите кнопку **Приостановить расчет** .

В данном случае опция приостановки расчета используется потому, что пример простой, расчет проходит очень быстро, и времени для того, чтобы использовать инструменты для наблюдения за расчетом, недостаточно. Обычно расчет можно не приостанавливать.

2 На панели инструментов **Солвера** кликните **Вставить график целей** . Появится диалоговое окно **Добавить/Удалить цели**.

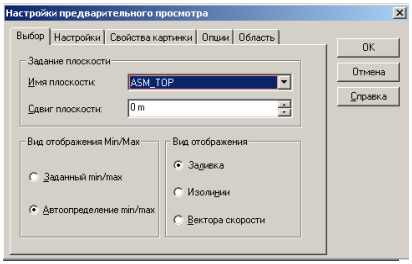
3 В списке **Выберите цели** выберите **ПЦ Ср Статическое давление 1** и кликните **OK**.





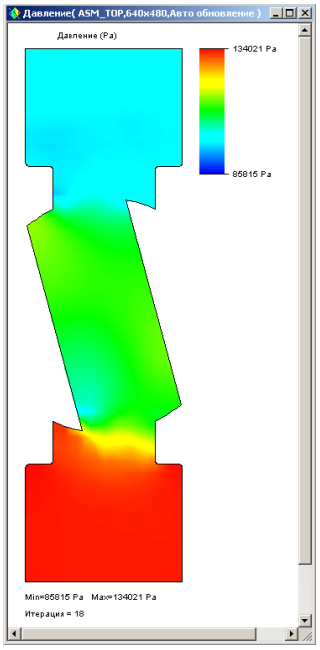
🕮 *В появившемся диалоговом окне сверху представлен список целей, созданных ранее. Здесь Вы можете видеть текущее значение и график изменения каждой цели во времени, а также сходимость цели, выраженную в процентах. Значение сходимости цели является приблизительным и со временем, как правило, увеличивается.*

4 На панели инструментов **Солвера** кликните **Предварительный просмотр** . Появится диалоговое окно **Настройки предварительного просмотра**.



5 В этом диалоговом окне из списка **Имя плоскости** Вы можете выбрать плоскость, на которой будет построено предварительное распределение каких-либо параметров. Для данной модели такой плоскостью может служить плоскость `ASM_TOP`. Выберите ее из списка и нажмите **OK**.

🕮 *С помощью **Предварительного просмотра** можно следить за процессом расчета задачи. Эта опция позволяет определить, корректно ли заданы граничные условия, и даже на ранней стадии расчета спрогнозировать результаты. В самом начале расчета результаты могут резко меняться и выглядеть довольно странно. Однако в дальнейшем таких резких изменений будет становиться меньше, и результаты установятся на сошедшемся решении. Отобразить текущее распределение каких-либо параметров можно с помощью заливки, изолиний или векторов скорости.*



6 Чтобы продолжить расчет, снова нажмите кнопку **Приостановить** .

7 Когда расчет завершится, кликните **Файл > Закрыть**, чтобы закрыть окно монитора.

Настройка прозрачности модели

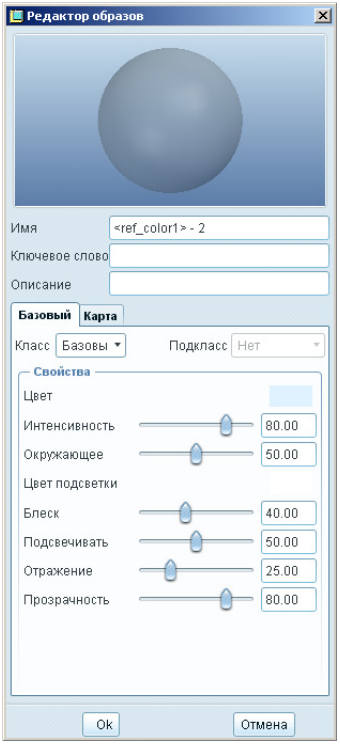
На панели инструментов **Вид** кликните **Галерея образов > Больше образов**.

В диалоговом окне **Редактор образов** установите для прозрачности значение 80.

На вкладке **Базовый** установите для прозрачности значение 80.

Нажмите кнопку **OK**.

В графической области или в дереве модели выделите все компоненты шарового крана и в окне **Выбрать** нажмите кнопку **OK**.



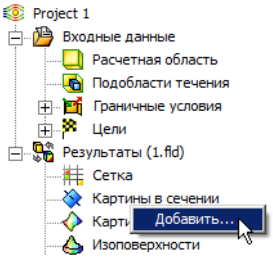
🕮 *Перед тем, как приступить к обработке результатов расчета, необходимо сделать геометрию прозрачной. Это нужно для того, чтобы расположение плоскостей сечения относительно геометрии было более наглядным.*

✎ *В Creo Parametric кликните* ***Вид > Отображение модели > Галерея образов > Больше образов.***

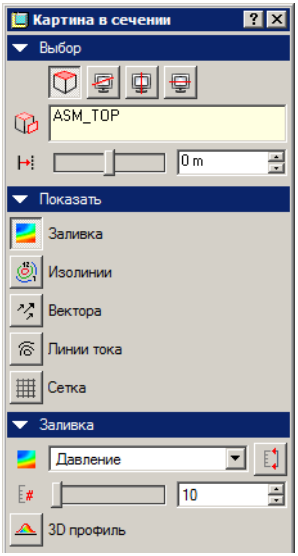
Просмотр картин в сечении

Картина в сечении позволяет увидеть распределение выбранного параметра в какой-либо плоскости. Распределение может быть представлено с помощью заливки, изолиний, векторов или произвольным сочетанием перечисленных выше возможностей (например, заливки и векторов).

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картины в сечении** и из контекстного меню выберите **Добавить**.

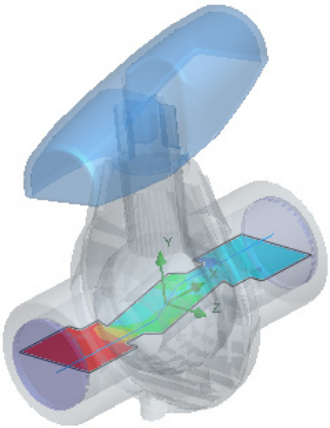


2 Перейдите на вкладку Creo Elements/Pro & Creo Parametric **Дереве модели**, кликните **Настройки > Фильтры дерева**. Убедитесь, что поставлена галочка **Элементы**, кликните **OK** и в дереве модели выберите плоскость **ASM_TOP**.

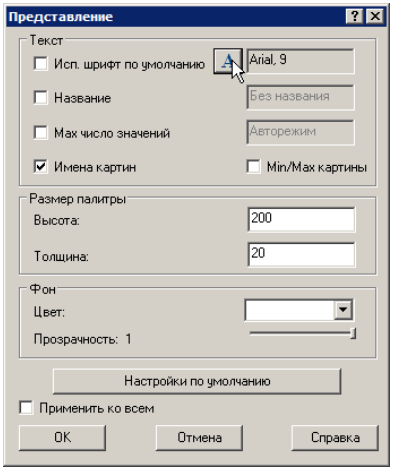


3 Кликните **OK** .

Вы увидите картину распределения давления, сходную с той, что представлена на рисунке.

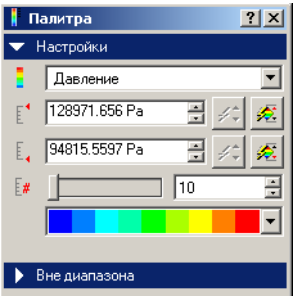


Чтобы установить опции отображения палитры (изменить шрифт палитры, фон и т.д.), кликните правой кнопкой мыши по палитре и из контекстного меню выберите **Представление**. *Чтобы изменить шрифт палитры, отключите опцию* **Использовать шрифт по умолчанию** *и нажмите* A. *Затем в диалоговом окне шрифтов выберите подходящий шрифт, его размер, цвет и кликните* **OK**. *В диалоговом окне редактирования внешнего вида палитры также кликните* **OK**.

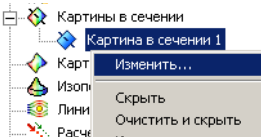


Опции отображения выноски можно установить таким же образом, как и настройки внешнего вида палитры.

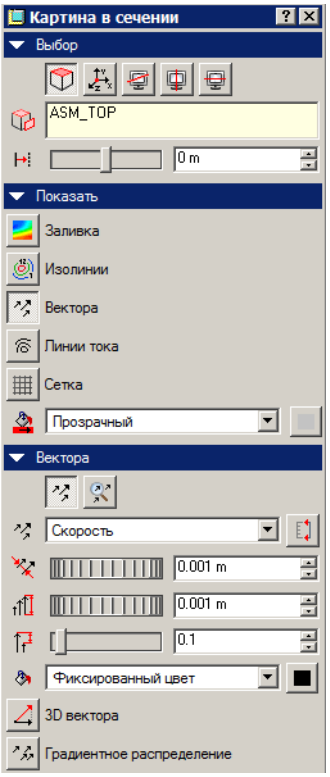
🕮 *Чтобы изменить некоторые настройки той или иной картины, можно двойным щелчком кликнуть по палитре. В соответствующем диалоговом окне можно выбрать другой параметр для отображения, а также изменить максимальное и минимальное значения параметра. Лучший способ изучить каждую из этих возможностей - экспериментирование.*



4 Теперь вместо заливки выберите вектора. Чтобы это сделать, правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картина в сечении 1** и из контекстного меню выберите **Изменить**.



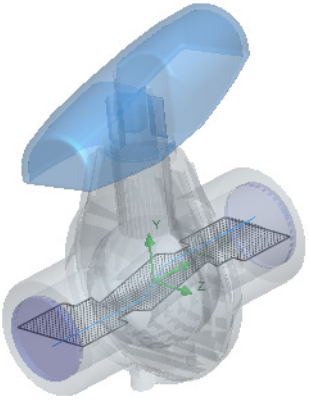
5 В группе **Показать** еще раз нажмите кнопку **Заливка**, а затем выберите **Вектора**.



🕮 *Размер векторов и расстояние между ними можно задать в группе* **Вектора**.

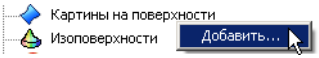
6 Кликните **OK**.

Вы увидите картину распределения как на рисунке ниже.



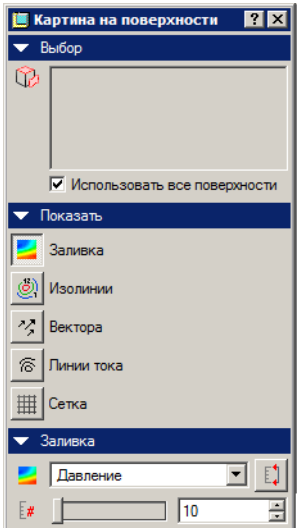
Просмотр картин на поверхности

Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картина в сечении 1** и из контекстного меню выберите **Скрыть**.



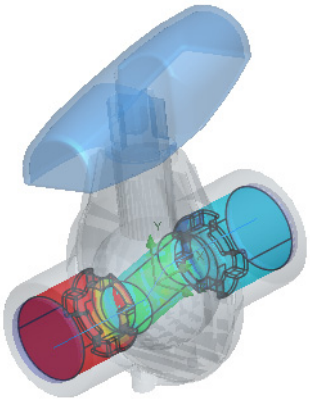
1 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картины на поверхности** и из контекстного меню выберите **Добавить**.

2 Включите опцию **Использовать все поверхности**.



🕮 *Такие же опции, как и для **Картин в сечении**, доступны и для **Картин на поверхности**. Вы можете свободно экспериментировать с различными настройками.*

3 Кликните **OK**. Получившаяся картина распределения представлена на рисунке.



🕮 *Здесь представлено распределение давления по всем поверхностям крана, контактирующим с текучей средой. Для отображения распределения какого-либо параметра Вы также можете выбрать одну и несколько отдельных поверхностей (необязательно плоских).*

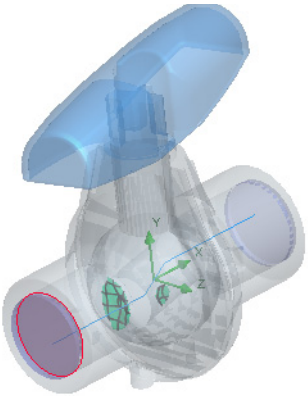
Просмотр изоповерхностей

Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картина на поверхности 1** и из контекстного меню выберите **Скрыть**.

1 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Изоповерхности** и из контекстного меню выберите **Добавить**.

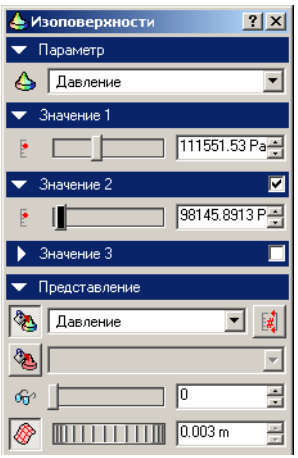
2 Заданное по умолчанию **Значение 1** изменять не требуется.

3 В группе **Представление** выберите **Сетка** и кликните **OK** .
Вы увидите изоповерхности, подобные тем, что показаны на рисунке справа.



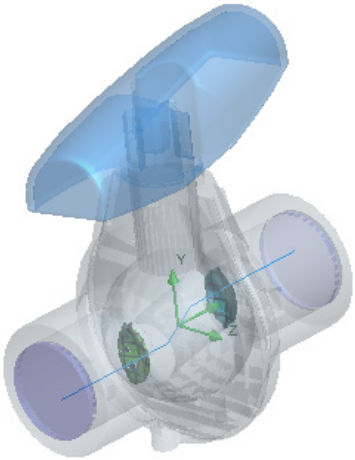
📖 ***Изоповерхность*** *- это трехмерная поверхность, созданная FloEFD, вдоль которой значение выбранного параметра постоянно.*

4 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Изоповерхности 1** и из контекстного меню выберите **Изменить**. Поставьте галочку **Значение 2** и в соответствующем поле введите какое-либо значение, отличное от **Значения 1**.



5 Кликните **OK** .

Вы увидите изоповерхности как на рисунке ниже.



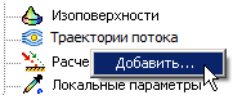
С помощью изоповерхности можно точно определить трехмерную область, в которой давление, скорость или другие параметры течения принимают какие-либо определенные значения.

Просмотр траекторий потока

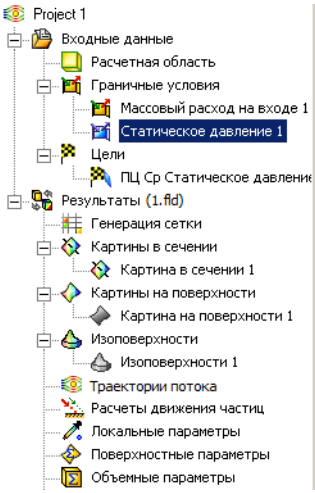
С помощью элемента **Траектории потока** можно получить трехмерное изображение течения. Экспортировав данные в Microsoft® Excel®, можно увидеть, как меняются значения параметров вдоль каждой траектории.

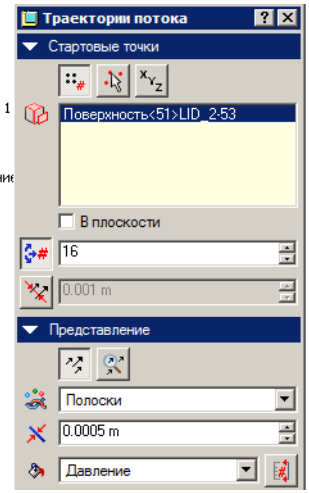
1 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Изоповерхности** и из контекстного меню выберите **Скрыть**.

2 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Траектории потока** и из контекстного меню выберите **Добавить**.



3 Для того, чтобы выбрать внутреннюю поверхность крышки на выходе (компонент **LID_2**), на вкладке FloEFD Analysis кликните по элементу **Статическое давление 1**.

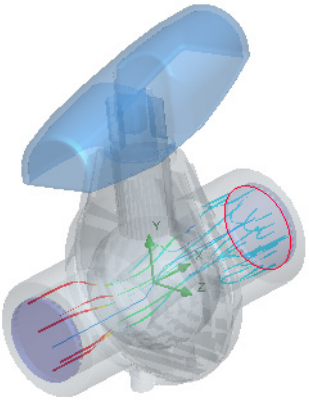




4 Задайте **Количество точек** равным `16`.

5 В группе **Представление** из списка **Показать траектории как** выберите **Полоски**.

6 Кликните **OK** . Вы увидите траектории потока, подобные тем, что показаны на рисунке.

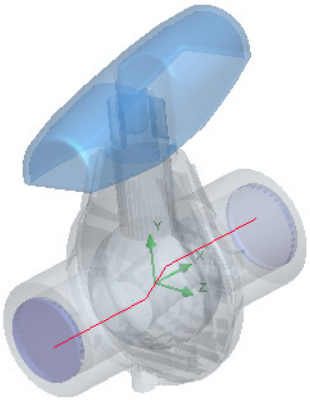


В качестве поверхности, на которой находятся стартовые точки, можно выбрать любую плоскую поверхность или эскиз. В данном случае выбрана внутренняя поверхность крышки на выходе. Траектории потока наглядно демонстрируют, что на выходе, помимо вытекающего потока, образуется обратное течение. Именно этим объясняется появление предупреждающего сообщения в процессе расчета. FloEFD сообщает о том, что заданные

условия являются неподходящими для данной задачи, и результаты расчета могут быть неточными. В таком случае следует изменить геометрическую модель для увеличения расчетной области таким образом, чтобы на границе не возникало обратного течения (например, удлинить выходной патрубок или добавить деталь, в которую поток попадает из выходного патрубка).

Просмотр графиков

Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Траектории потока 1** и из контекстного меню выберите **Скрыть**.

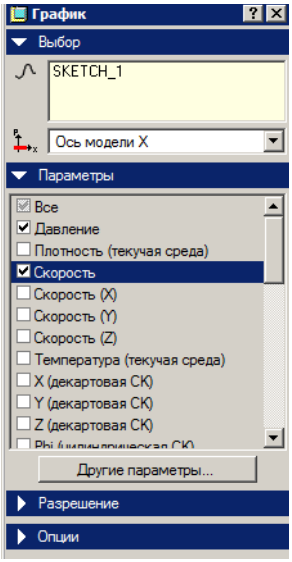


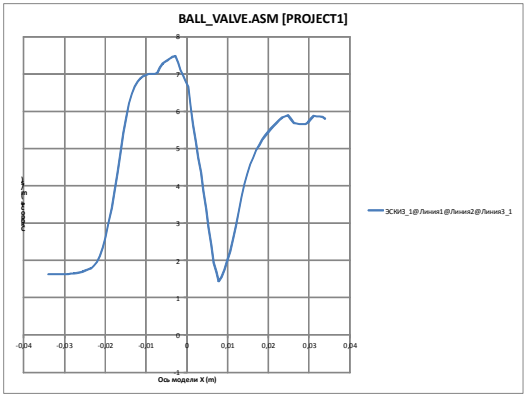
На графике покажем распределение скорости и давления в кране. Для построения графика используем созданный заранее эскиз Creo Elements/Pro & Creo Parametric, состоящий из нескольких линий.

Эскиз необязательно должен быть создан заранее, его можно построить и после окончания расчета. Взгляните на эскиз Sketch1 в дереве модели.

1. Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Графики** и из контекстного меню выберите **Добавить**.
2. В качестве **Параметров** выберите **Скорость** и **Давление**. Из дерева модели выберите эскиз Sketch1.
3. В качестве абсциссы выберите **Ось модели X**.

   Выбранные по умолчанию опции не требуют изменений.
4. Кликните **Экспортировать в Excel**. Откроется Excel, и сгенерируются колонки с данными, а также графики распределения скорости и давления вдоль выбранного эскиза. Один из графиков представлен ниже. Для того, чтобы изучить каждый график, необходимо переключаться между соответствующими листами Excel.





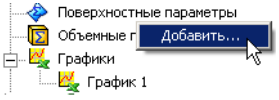
5 Кликните **ОК** .

📖 ***График*** *позволяет увидеть распределение любого параметра вдоль линий эскиза. Данные выводятся прямо в Excel.*

Просмотр поверхностных параметров

Элемент **Поверхностные параметры** используется для определения значений давления, сил, тепловых потоков, а также других переменных на какой-либо поверхности, контактирующей с текучей средой. В рассматриваемой задаче интерес представляет перепад среднего статического давления между входом и выходом крана.

1 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Поверхностные параметры** и из контекстного меню выберите **Добавить**.

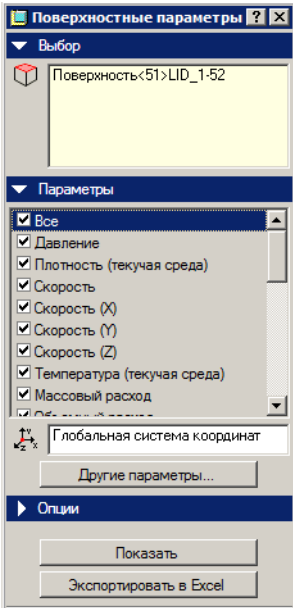


2 Для того, чтобы выбрать внутреннюю поверхность крышки на входе (компонент **LID_1**), на вкладке FloEFD Analysis кликните по элементу **Массовый расход на входе 1**.

3 В группе **Параметры** выберите **Все**.

4 Кликните **Показать**.

5 Ниже представлена таблица локальных параметров.



Поверхностные параметры

Локальный параметр	Минимум	Максимум	Среднее	Среднерасходный
Давление [Pa]	135436	135612	135517	135517
Плотность [kg/m^3]	997.56	997.56	997.56	997.56
Скорость [m/s]	1.619	1.619	1.619	1.619
Скорость (X) [m/s]	1.619	1.619	1.619	1.619
Скорость (Y) [m/s]	0	0	0	0
Скорость (Z) [m/s]	0	0	0	0
Температура (текучая среда) [K]	293.20	293.20	293.20	293.20

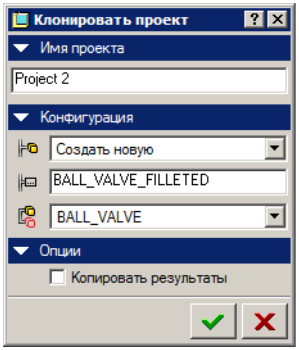
Как видно из таблицы, среднее значение статического давления на поверхности входа составляет примерно 135500 Pa. Известно, что на выходе статическое давление составляет 101325 Pa (оно было задано в качестве граничного условия). Таким образом, перепад среднего статического давления в кране составляет около 34000 Pa.

6 Закройте диалоговое окно **Поверхностные параметры**.

Исследование влияния изменений компонента Creo Elements/Pro & Creo Parametric Ball

🕮 *Назначение данного раздела - показать, насколько просто с помощью FloEFD исследовать различные варианты конструкций. Конструктивные изменения могут быть самыми разными: изменение геометрических размеров, добавление новых элементов, новых компонентов в сборку и т.д. Таким образом, FloEFD позволяет инженерам быстро и с легкостью определять, какие конструктивные решения являются перспективными, а какие вряд ли будут успешными. С помощью данного примера проверим, как скругление двух кромок отверстия внутри шарика может повлиять на перепад давления в кране. По результатам расчета можно будет сделать вывод о том, стоит ли вкладывать дополнительные средства в производство новых конструкций шарового крана.*

Клонирование проекта



1 Кликните **Flow Analysis > Проект > Клонировать проект**.

2 В поле **Имя проекта** введите `Project 2`.

3 В списке **Конфигурация, в которую необходимо добавить проект** выберите **Создать новую**.

4 В списке **Имя конфигурацииКонфигурация** введите `BALL_VALVE_FILLETED`.

5 Кликните **OK**.

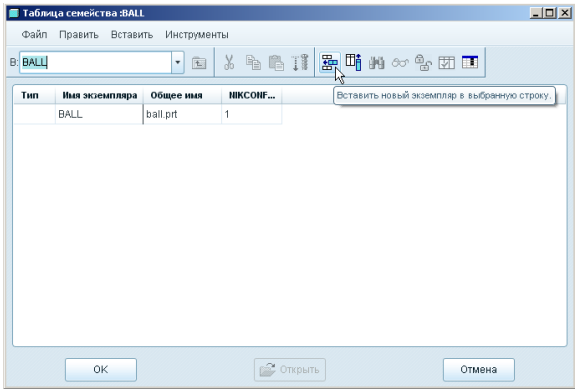
Теперь выбранный проект FloEFD добавлен в новую конфигурацию с измененной геометрией. Нет необходимости заново задавать условия на отверстиях и создавать цели, т.к. все входные данные были скопированы. Граничные условия можно изменить, удалить или добавить. Все изменения геометрии относятся только к данной конфигурации, т.е. все предыдущие результаты остаются действительными.

Создание нового экземпляра в таблице семейства

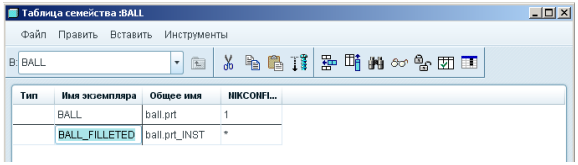
1 В дереве модели кликните правой кнопкой мыши по компоненту **BALL** и из контекстного меню выберите **Открыть**. Откроется новое окно с деталью BALL.

2 Кликните **Инструменты > Таблица семейства**.

3 В диалоговом окне **Таблица семейства** кликните **Вставить новый экземпляр в выбранную строку**.



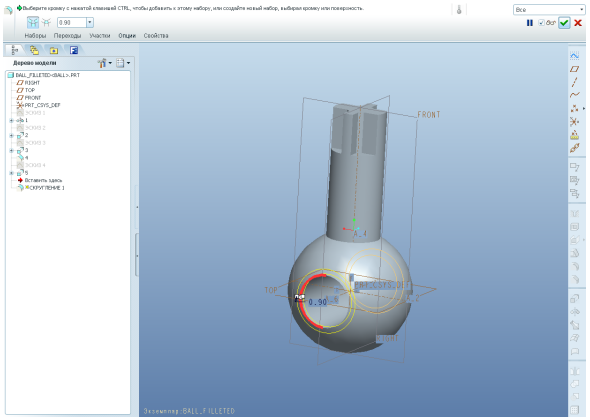
4 Измените имя новой конфигурации с **BALL_INST** на `BALL_FILLETED`. Это означает, что в новой конфигурации шарик будет иметь отверстие со сгруглениями



5 Кликните **Открыть**. Появится окно с новым экземпляром шарика **BALL_FILLETED**.

Изменение геометрии модели

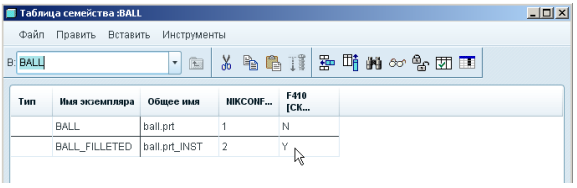
1 Выберите острые кромки и скруглите их с радиусом 0.9 mm.



2 Чтобы сохранить деталь **BALL** с измененной геометрией, кликните **Файл > Сохранить**.

3 Чтобы закрыть окно с экземпляром **BALL_FILLETED**, кликните **Файл > Закрыть окно**.

4 Окно с основной конфигурацией шарика **BALL** все еще открыто. Кликните **Инструменты > Таблица семейства** и убедитесь, что в таблицу семейства добавлена новая конфигурация детали **BALL** со скругленными кромками.

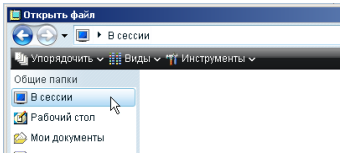


5 Кликните **Файл > Закрыть окно**, чтобы закрыть окно с деталью **BALL**.

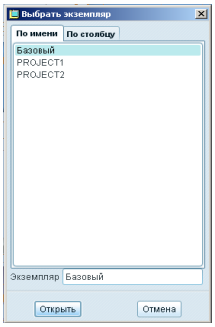
Замена экземпляра в сборке

1 Во все еще открытом окне **PROJECT2** кликните **Файл > Открыть** и выберите опцию **В сессии**

.

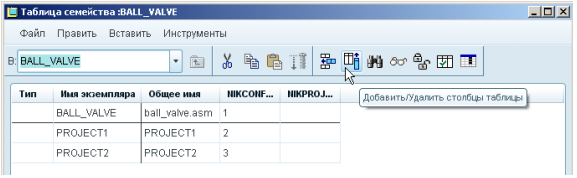


1 Откройте сборку **ball_valve.asm** и выберите **Базовый** экземпляр.



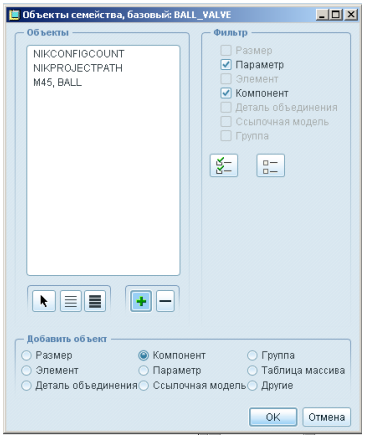
2 Кликните **Инструменты > Таблица семейства**.

3 В диалоговом окне **Таблица семейства** кликните **Добавить/Удалить столбцы таблицы** .



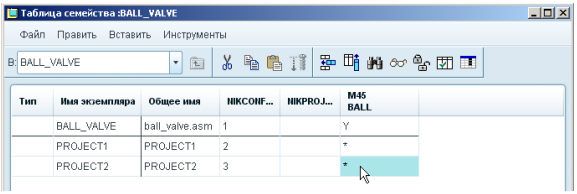
4 В диалоговом окне **Объекты семейства** в группе **Добавить объект** поставьте галочку **Компонент** и затем в дереве модели выберите деталь **BALL.PRT**.

5 Кликните **OK**. В таблицу семейства будет добавлен новый столбец **M45 BALL**.

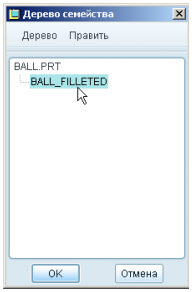


🕮 *В новом столбце Вы можете выбрать для каждого экземпляра* **Y**, **N** *или* *****. *При выборе* **N** *будет деактивирован экземпляр, а также все внесенные в него изменения. Если Вы выберите* **Y**, *экземпляр будет активирован. Выбор* ***** *означает, что экземпляр будет находиться в том состоянии, которое указано в верхней ячейке этого столбца.*

6 В диалоговом окне **Таблица семейства** в столбце **M45 BALL** выберите ячейку, соответствующую строке **PROJECT2**.

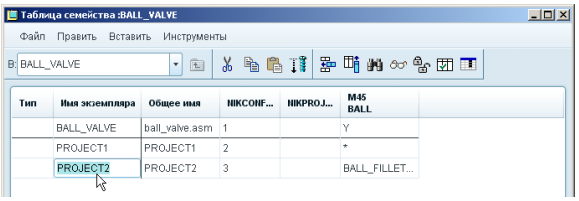


7 Кликните **Инструменты > Заменить Исп. > Член таблицы семейства** и выберите экземпляр **BALL_FILLETED** (в котором кромки отверстия шарика являются скругленными).



8 Кликните **OK**.

9 В диалоговом окне **Таблица семейства** выберите строку **PROJECT2** и кликните **Открыть**. Откроется окно с проектов **PROJECT2**, в котором отверстие в шарике (деталь **BALL**) будет иметь скругленные кромки.



Все условия были скопированы в новый проект, поэтому Вы сразу можете запустить расчет. Чтобы запустить расчет проекта и просмотреть получившиеся результаты, выполните, пожалуйста, описанную ранее последовательность действий.

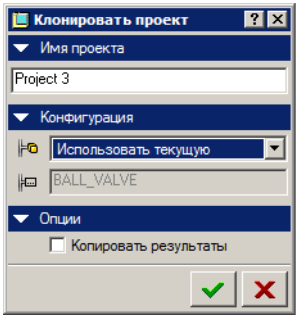
Исследование влияния изменений конструкций в FloEFD

📖 *В предыдущем примере было показано, как можно сравнить результаты, полученные при использовании двух различных конструкций. Вам также может понадобиться рассчитать проект с одной и той же геометрией, но при определенном диапазоне значений массового расхода потока. Данный раздел показывает, как легко и быстро провести такое параметрическое исследование. В качестве примера зададим новое значение массового расхода потока - 0.75 kg/s.*

Активируйте **Project 1** в дереве проектов FloEFD.

1 Создайте копию проекта **Project 1**. Для этого кликните **Flow Analysis > Проект > Клонировать проект**.

2 Присвойте новому проекту имя `Project 3` и кликните **OK**.



FloEFD создаст новый проект. Нет необходимости заново задавать условия на отверстиях и создавать цели, т.к. все входные данные были скопированы. Граничные условия можно изменить, удалить или добавить новые. Все изменения геометрии относятся только к данной конфигурации, поэтому все предыдущие результаты остаются действительными. Изменив массовый расход потока на входе, можно будет приступить к расчету. Для того, чтобы рассчитать новый проект и просмотреть результаты, пожалуйста, выполните все необходимые для этого шаги, описанные ранее.

Представьте себя проектировщиком шарового крана. Какой вывод Вы могли бы сделать по результатам проведенных исследований? Какое решение Вы бы приняли в подобном случае, когда внесение конструктивных изменений может оправдать дополнительные расходы на производство новых конструкций? Инженеры принимают подобные решения каждый день, и FloEFD - тот самый инструмент, который помогает им в этом. С помощью FloEFD каждый инженер, имеющий дело с текучими средами и теплообменом, сможет протестировать свои идеи, затратив на это гораздо меньше опытных образцов и сократив циклы проектирования.

A2

Сопряженный теплообмен

Этот пример описывает основные этапы постановки задачи сопряженного теплообмена. Он может быть интересен для пользователей, занимающихся исследованием течения и теплообмена внутри различных электронных устройств. Однако основные принципы, рассмотренные здесь, могут применяться во всех тепловых задачах. Предполагается, что Вы уже выполнили пример *Течение воды в шаровом кране*, т.к. в нем подробно описаны все основные принципы работы в FloEFD.

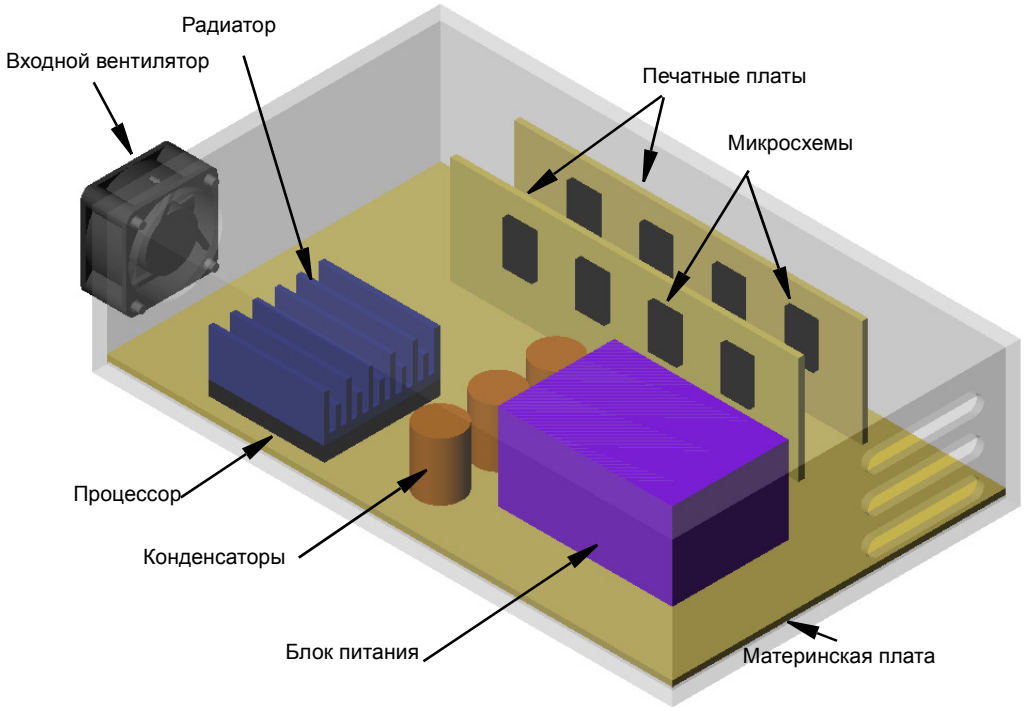
Открытие модели

1 Скопируйте папку **A2 - Conjugate Heat Transfer** в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные.

2 Запустите FloEFD. Чтобы открыть модель Creo Elements/Pro & Creo Parametric, кликните **Файл > Открыть**.

📖 В диалоговом окне **Открыть файл** перейдите к сборке `enclosure_assembly.asm`, расположенной в папке **A2 - Conjugate Heat Transfer** и кликните **Открыть**.

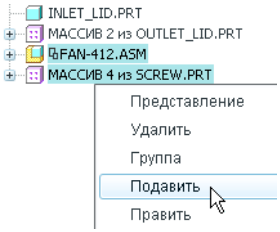
📖 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку* `enclosure_assembly.asm`*, расположенную в папке* ***A2 - Conjugate Heat Transfer\Ready To Run****, и запустить проект на расчет.*



Подготовка модели

В подобной модели может быть довольно много компонентов и сборочных узлов, которые не являются существенными для решения задачи. Поэтому до создания проекта рекомендуется проверить, есть ли в модели такие компоненты, которые могут быть исключены из рассмотрения. Это позволит сэкономить ресурсы компьютера и сократить общее время расчета задачи. Рассматриваемая модель включает в себя следующие компоненты: корпус, материнскую плату, две печатные платы меньшего размера, конденсаторы, блок питания, радиатор, микросхемы, вентилятор, корпус вентилятора, болты и крышки. Вы можете подсветить эти компоненты, выделив их в дереве спецификаций Creo Elements/Pro & Creo Parametric. Вентилятор имеет довольно сложную геометрию, из-за чего перестроение модели может занимать большое количество времени. Т.к. он находится вне корпуса, то его можно исключить из рассмотрения, для этого необходимо деактивировать этот компонент. В данном примере вентилятор будет моделироваться при помощи задания граничного условия **Вентилятор** на внутренней поверхности крышки входного отверстия корпуса.

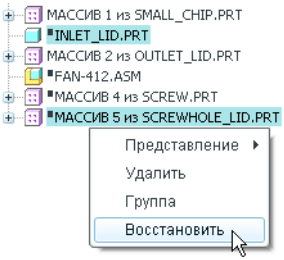
1 В дереве модели выберите вентилятор (сборочный узел **FAN-412)** и **Массив 4 из SCREW**.



2 Правой кнопкой мыши кликните по любому из выделенных элементов и из контекстного меню выберите **Подавить**. Для подтверждения кликните **OK**. После деактивации вентилятора и болтов, с помощью которых он закреплен, в корпусе остаются открытыми пять отверстий. Их необходимо закрыть крышками, т.к. предстоит решить внутреннюю задачу.
Для сокращения времени подготовки модели крышки были заранее созданы и включены в модель. Вам требуется лишь высветить их. Пожалуйста, проверьте, позволяют ли настройки Фильтров дерева отобразить деактивированные компоненты в дереве модели.

3 В дереве модели выберите крышку на входе (компонент **INLET_LID**) и элементы массива **Массив 5 из SCREWHOLE_LID**.

4 Правой кнопкой мыши кликните по любому из выбранных элементов и выберите **Восстановить**.

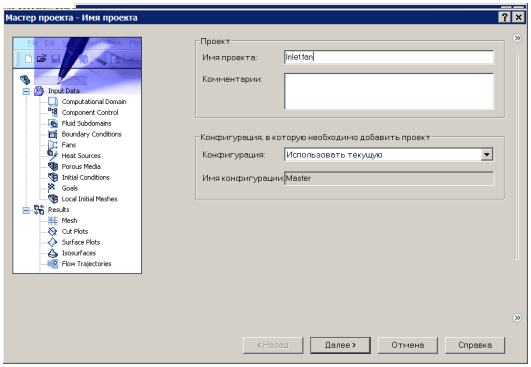


Теперь можно приступить к работе с FloEFD.

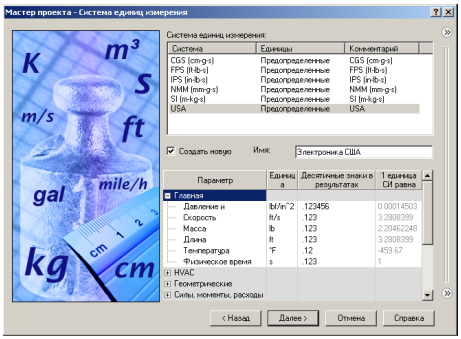
Создание проекта FloEFD

1 Кликните **Flow Analysis > Проект > Мастер проекта**.

2 В открывшемся окне **Мастер проекта** введите имя нового проекта FloEFD: `Inlet Fan`. Кликните **Далее**.
Теперь необходимо создать новую систему единиц измерения и присвоить ей наиболее подходящее для данного проекта название - **Электроника США**.



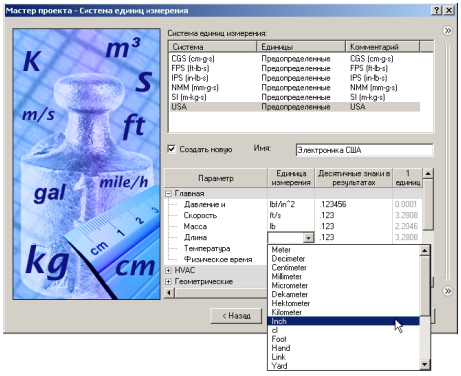
3 Из списка **Система единиц измерения** выберите систему **USA**. Для того, чтобы добавить новую систему единиц измерения в Инженерную базу данных, поставьте галочку **Создать новую** и в соответствующем поле введите имя `Электроника США`.



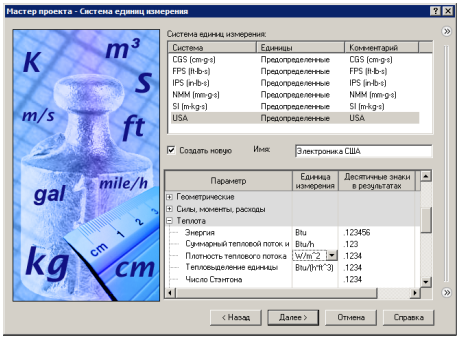
🕮 *FloEFD позволяет работать с предопределенными системами единиц измерения, однако в некоторых случаях целесообразно создать собственную. Как предопределенные, так и заданные пользователем системы единиц измерения хранятся в* **Инженерной базе данных**. *Создать необходимую систему единиц можно в* **Инженерной базе данных** *или в* **Мастере проекта**.

🕮 *В дереве* **Параметр** *представлены единицы измерения различных параметров, соответствующие выбранной системе единиц. Для рассматриваемой задачи предопределенные единицы измерения большинства параметров являются подходящими, например, ft/s (ф/с) для скорости и CFM (кубические футы в минуту) для объемного расхода. Однако единицы измерения некоторых параметров все-таки необходимо изменить. Так, для длины вместо футов удобнее выбрать дюймы, т.к. геометрические размеры рассматриваемой модели могут быть небольшими.*

4 Двойным щелчком кликните в ячейке **Единица**, соответствующей параметру **Длина**, и из списка выберите **Inch**.



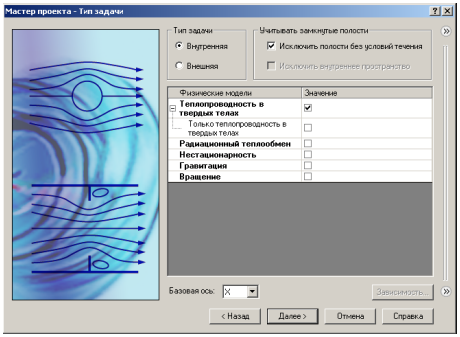
5 Затем в дереве **Параметр** раскройте группу **Теплота**.



В качестве единиц измерения для параметров **Суммарный тепловой поток и мощность**, **Плотность теплового потока** и **Коэффициент теплоотдачи** выберите соответственно **Watt**, **Watt/meter2**, **Watt/meter2/Kelvin**. Для решения задачи с электронными компонентами удобно использовать именно эти единицы измерения.

Кликните **Далее**.

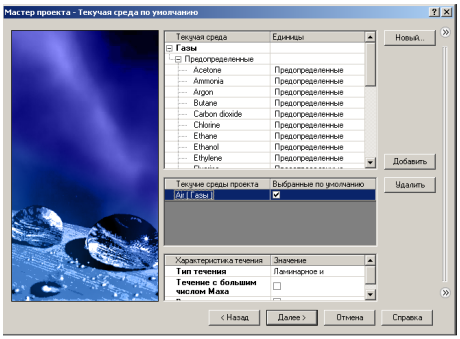
6 В качестве типа задачи выберите **Внутренняя**. В группе **Физические модели** включите **Теплопроводность в твердых телах**, затем кликните **Далее**.



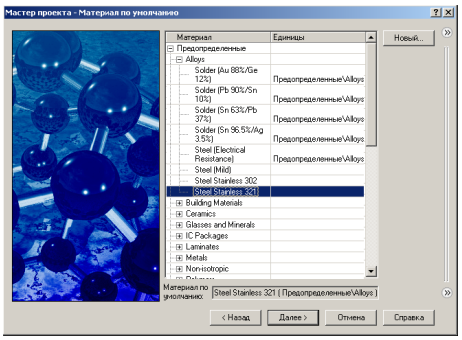
📖 *Электронные компоненты при работе выделяют тепло. В данной задаче важно проследить, как тепло отводится через радиатор и другие элементы и затем переносится потоком воздуха. Поэтому опция* **Теплопроводность в твердых телах** *обязательно должна быть включена.*

7 Раскройте группу **Газы** и дважды кликните по элементу **Air**. Заданные по умолчанию **Характеристики течения** изменять не требуется**.**

Кликните **Далее**.



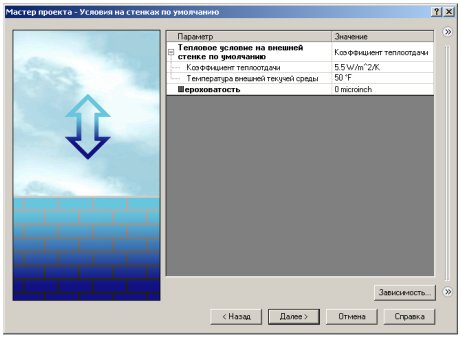
8 Раскройте группу **Alloys** и выберите **Steel Stainless 321**, для того, чтобы задать этот материал в качестве **Материала по умолчанию**.



📖 *Материалы, заданные в* **Мастере проекта**, *по умолчанию применяются ко всем компонентам в проекте FloEFD. Чтобы задать другой материал для одного или нескольких компонентов, после создания проекта можно будет воспользоваться элементом* **Материал**.

Кликните **Далее**.

9 В качестве **Теплового условия на внешней стенке по умолчанию** выберите **Коэффициент теплоотдачи** и задайте значение **Коэффициента теплоотдачи** равным `5.5 W/m^2/K`, а для **Температуры внешней текучей среды** введите значение `50°F`. Заданное значение коэффициента теплоотдачи автоматически преобразуется в соответствии с системой единиц измерения (Электроника США).



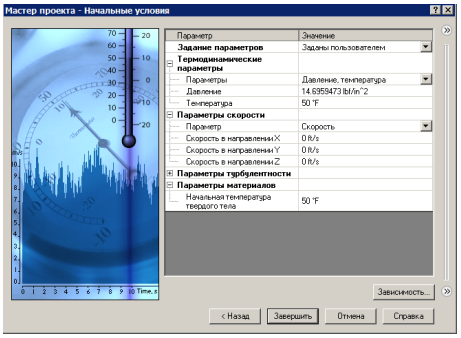
📖 *В диалоговом окне* **Мастер проекта - Условия на стенках по умолчанию** *задаются условия на стенках модели. Если задача внутренняя, и включена опция* **Теплопроводность в твердых телах**, *параметр* **Тепловое условие на внешней стенке по умолчанию** *позволяет моделировать теплообмен между внешними стенками модели и окружающей средой. Предполагается, что рассматриваемый системный блок находится в помещении при температуре воздуха 50°F. Вследствие конвекции в помещении тепло отводится через внешние стенки корпуса, что способствует его охлаждению.*

Кликните **Далее**.

Значение начальной температуры является наиболее важным для нестационарных расчетов, т.к. позволяет определить время, необходимое для достижения точного значения температуры. В стационарных задачах значение начальной температуры следует задавать близким к предполагаемому окончательному решению, т.к. это позволит ускорить сходимость расчета. В рассматриваемом примере начальную температуру воздуха и нержавеющей стали зададим равной 50°F (это температура воздуха в помещении, в котором находится системный блок).

10 Задайте начальную **Температуру** текучей среды и **Начальную температуру твердого тела** (в группе **Параметры материалов**) равными `50°F`.

Кликните **Завершить**.

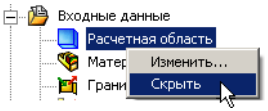


FloEFD создаст новый проект с прикрепленными к нему данными.

Перейдите на вкладку FloEFD Analysis. Для этого кликните **FloEFD** . Кликните , чтобы скрыть дерево проектов FloEFD.

🕮 *Дерево анализа FloEFD используется для постановки задачи так же, как дерево модели используется для создания моделей.*

Для того, чтобы скрыть полупрозрачный параллелепипед, обозначающий границы расчетной области, правой кнопкой мыши кликните по элементу **Расчетная область** и из контекстного меню выберите **Скрыть**.



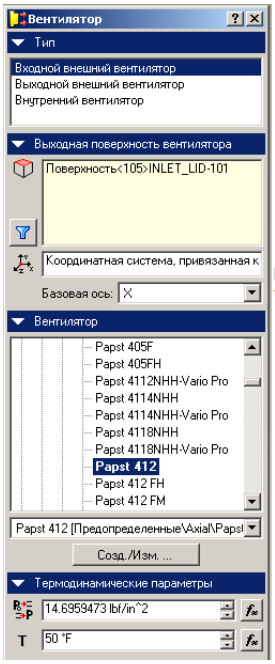
Задание вентилятора

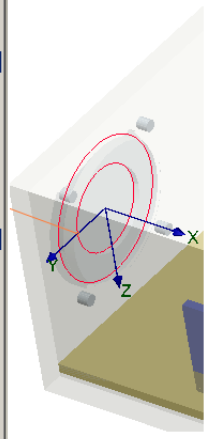
Одним из типов граничных условий, определяющих течение. является Вентилятор. **Вентилятор** можно задавать на поверхностях, на которых не определены **Граничные условия** и **Тепловые источники**. На отверстиях модели, закрытых крышками, задается входной или выходной вентилятор. На поверхностях, находящихся внутри области течения, создается внутренний вентилятор. Вентилятор рассматривается как идеальное устройство, создающее поток с определенным объемным или массовым расходом. Значение расхода зависит от разницы давлений на входе и выходе.

Если Вы исследуете модель, в которой установлен вентилятор, необходимо знать его характеристики. В данной задаче используется один из предопределенных вентиляторов, находящихся в **Инженерной базе данных**. Если Вы не можете выбрать из Инженерной базы данных подходящий вентилятор, Вы можете создать свой собственный в соответствии с техническими требованиями.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Вентилятор**. Появится диалоговое окно **Вентилятор**.

2 Выберите внутреннюю поверхность крышки на входе (компонент INLET_LID), как показано на рисунке. (Чтобы выбрать внутреннюю поверхность, установите фильтр по **Геометрии** и правой кнопкой мыши кликайте по компоненту **INLET_LID**, пока внутренняя поверхность крышки не подсветится, затем нажмите левую кнопку мыши).





3 В группе **Тип** выберите **Входной внешний вентилятор**.

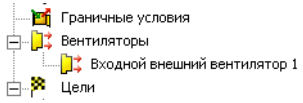
4 В списке **Вентилятор** из группы **Предопределенные / Axial / Papst** выберите **Papst 412**.

5 Проверьте, что значение **Давления окружающей среды** в группе **Термодинамические параметры** соответствует атмосферному давлению.

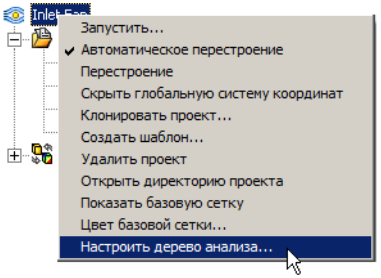
6 В качестве **Системы координат** примите **Координатную систему, привязанную к поверхности**, а в качестве **Базовой оси** - **X**.

📖 **Координатная система, привязанная к поверхности** *автоматически создается в центре плоской поверхности, выбранной для задания граничного условия или вентилятора. В этой системы координат ось* ***X*** *направлена по нормали к выбранной поверхности.* **Координатная система, привязанная к поверхности** *создается только тогда, когда выбирается одна плоская поверхность.*

7 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится новая группа **Вентиляторы** с элементом **Входной внешний вентилятор 1**.



📖 *В дереве анализа FloEFD Вы можете редактировать элемент* ***Входной внешний вентилятор 1*** *или создать новый вентилятор. Эта группа остается видимой до тех пор, пока из нее не будет удален*



последний элемент. Вы также можете сделать так, чтобы группа всегда была доступна из дерева. Для этого в дереве правой кнопкой мыши кликните по имени проекта и из контекстного меню выберите **Настроить дерево анализа**.

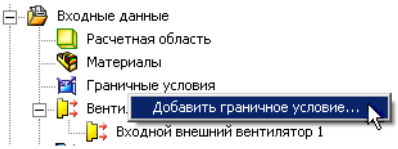
📖 *Крышки на выходе находятся под внешним атмосферным давлением, поэтому повышение давления вследствие работы вентилятора равно падению давления в электронном устройстве.*

Задание граничных условий

Граничное условие необходимо задавать на входе потока в модель и на выходе из нее, кроме тех отверстий, на которых задан вентилятор. В качестве граничного условия может быть задано **Давление, Массовый расход**, **Объемный расход** или **Скорость**. С помощью диалогового окна **Граничное условие** Вы также можете задать следующие условия:

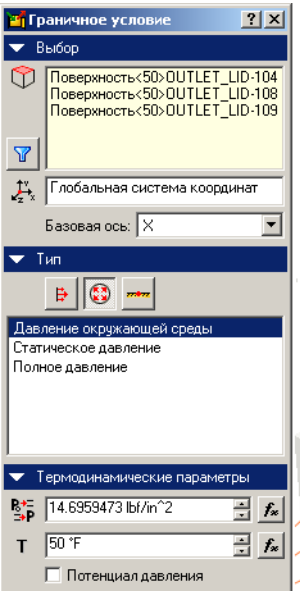
- **Идеальная стенка** - для того, чтобы определить стенки как адиабатические и свободные от трения;
- **Реальная стенка** - для задания шероховатости стенок и/или температуры и/или коэффициента теплоотдачи на выбранных поверхностях модели;
- **Внешняя стенка** - для того, чтобы задать тепловое условие на внешних стенках модели (это условие можно создать, если задача внутренняя и включена опция **Теплопроводность в твердых телах**).

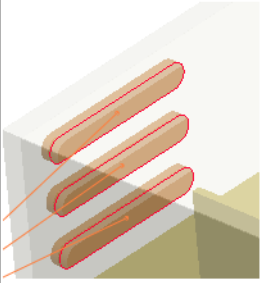
1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**.



2 Выберите внутренние поверхности крышек на выходе, как показано на рисунке.

3 Нажмите **Давление** и выберите **Давление окружающей среды**.





*Условие **Давление окружающей среды** представляет собой статическое давление в вытекающем потоке или полное давление во втекающем потоке.*

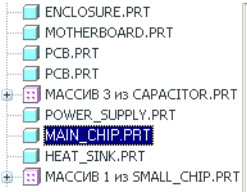
4 Не изменяйте заданные по умолчанию **Термодинамические параметры**, **Параметры турбулентности**, **Параметры пограничного слоя** и **Опции**.

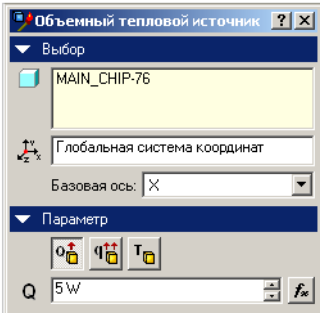
5 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится новый элемент **Давление окружающей среды 1**.

Задание тепловых источников

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Объемный тепловой источник**.

2 В качестве **Компонента для задания объемного теплового источника** , в дереве модели выберите процессор (компонент **MAIN_CHIP**).



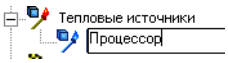


3 В группе **Параметр** выберите **Мощность тепловыделения** .

4 В поле **Мощность тепловыделения** Q введите значение `5 W`.

5 Кликните **OK** .

6 В дереве анализа FloEFD, дважды (через паузу) кликните по элементу **ОИ Мощность тепловыделения 1** и переименуйте его в `Процессор`.

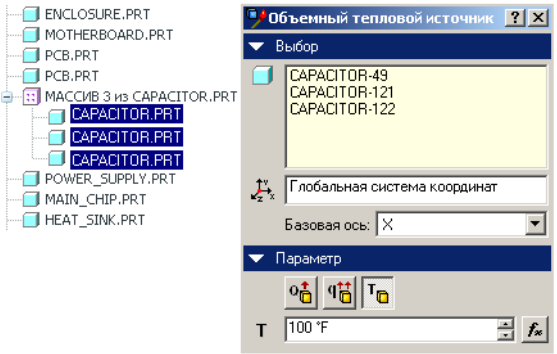


🕮 *Объемные тепловые источники позволяют задавать мощность тепловыделения (например, в Вт (Watts)), удельную мощность объемного тепловыделения (например, в Вт (Watts) на объем) или постоянную температуру в объеме. Также можно задать Поверхностные тепловые источники в пересчете на тепловой поток (например, в Вт (Watts)) или плотность теплового потока (например, в Вт (Watts) на площадь).*

7 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Тепловые источники** и из контекстного меню выберите **Объемный тепловой источник**.

8 В дереве модели выберите все три конденсатора (компоненты **CAPACITOR**) из массива **Массив 3 из CAPACITOR**.

9 В качестве **Параметра** выберите **Температуру** и в поле **Температура** введите значение 100 °F.

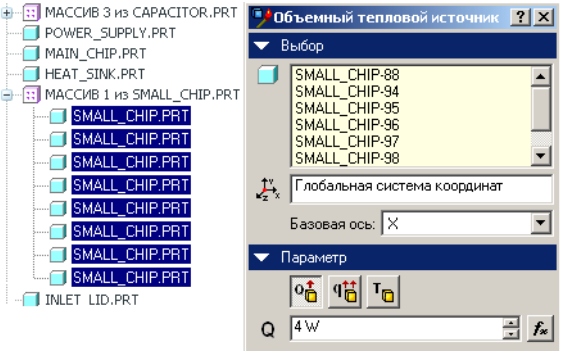


10 Кликните **OK** .

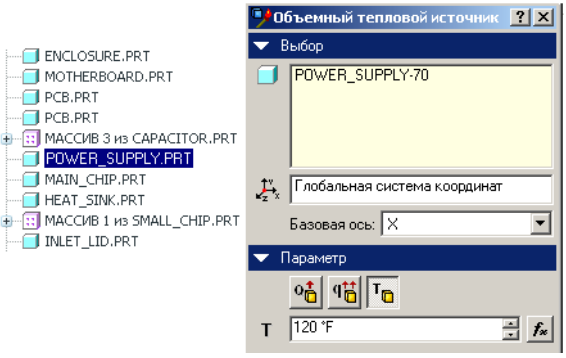
11 Дважды (через паузу) кликните по новому элементу **ОИ Температура 1** и переименуйте его в `Конденсаторы`.

12 Выполняя описанный выше порядок действий, задайте следующие объемные тепловые источники:

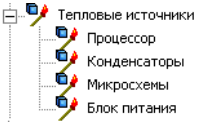
- на всех микросхемах печатных плат (компоненты **SMALL_CHIP**) задайте объемный тепловой источник с суммарной мощностью тепловыделения, равной 4 W;



- На блоке питания (компонент **POWER_SUPPLY**) задайте объемный тепловой источник с температурой 120 °F.



13 Объемный тепловой источник, заданный на микросхемах, переименуйте в `Микросхемы`, а тепловой источник на блоке питания - в `Блок питания`.



Кликните **Файл > Сохранить**.

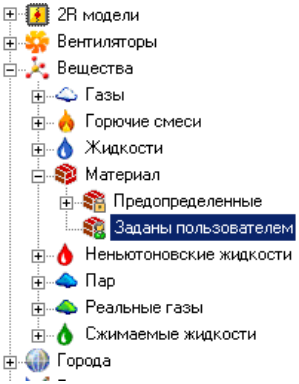
Создание материалов в инженерной базе данных

Печатные платы изготавливаются из многослойных материалов, в которых тонкие слои металлического проводника чередуются со слоями диэлектрической эпоксидной смолы. Свойства таких многослойных материалов могут меняться в зависимости от направления - вдоль или поперек слоев, т.е. такие материалы могут быть анизотропными. Инженерная база данных включает несколько предопределенных материалов для печатных плат с анизотропной теплопроводностью.

В данной задаче анизотропная теплопроводность практически не влияет на общую эффективность охлаждения. Поэтому для того, чтобы научиться добавлять новые материалы в Инженерную базу данных, создадим новый материал для печатной платы, теплопроводность которого является одинаковой во всех направлениях.

1 Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Инженерная база данных**.

2 В **Дереве базы данных** выберите **Вещества / Материал / Заданы пользователем**.



3 На панели инструментов кликните **Новый элемент** .

Появится незаполненная таблица **Свойства элемента**. Для того, чтобы задать какое-либо значение, дважды кликните в соответствующей ячейке.

4 Задайте свойства материала, как показано ниже:

Имя = `Печатная плата`,
Комментарии = `Изотропный материал`,
Плотность = `1120 kg/m^3`,
Удельная теплоемкость = `1400 J/(kg*K)`,
Тип проводимости = `Isotropic`
Коэффициент теплопроводности = `10 W/(m*K)`,
Температура плавления = `390 K`.

Свойство	Значение
Имя	Печатная плата
Комментарии	Изотропный материал
Плотность	1120 kg/m^3
Удельная теплоемкость	1400 J/(kg*K)
Тип проводимости	Изотропная
Коэффициент теплопроводности	10 W/(m*K)
Электропроводность	Диэлектрик
Радиационные свойства	☐
Температура плавления	390 K

Для моделирования тепловых свойств некоторых других электронных компонентов необходимо создать еще один материал.

5 Перейдите на вкладку **Элементы** и на панели инструментов кликните **Новый элемент** .

6 Задайте свойства материала для чипов:

Имя = `Набор компонентов`,
Комментарии = `Набор компонентов`,
Плотность = `2000 kg/m^3`,
Удельная теплоемкость = `120 J/(kg*K)`,
Тип проводимости = `Isotropic`
Коэффициент теплопроводности = `0.4 W/(m*K)`,
Температура плавления = `390 K`.

Свойство	Значение
Имя	Набор компонентов
Комментарии	Набор компонентов
Плотность	2000 kg/m^3
Удельная теплоемкость	120 J/(kg*K)
Тип проводимости	Изотропная
Коэффициент теплопроводности	0.4 W/(m*K)
Электропроводность	Диэлектрик
Радиационные свойства	☐
Температура плавления	390 K

7 Кликните **Сохранить** .

8 Кликните **Файл > Выход** для того, чтобы выйти из базы данных.

📖 *Задавать свойства материала Вы можете в любой системе единиц измерения, для этого после числового значения необходимо ввести единицу измерения. FloEFD автоматически преобразует введенное значение в соответствии с системой SI. Вы также можете задавать свойства материала, зависящие от температуры. Для этого следует перейти на вкладку* **Таблицы и графики**.

Задание материалов

Элемент **Материал** используется для задания определенного материала для какого-либо компонента сборки.

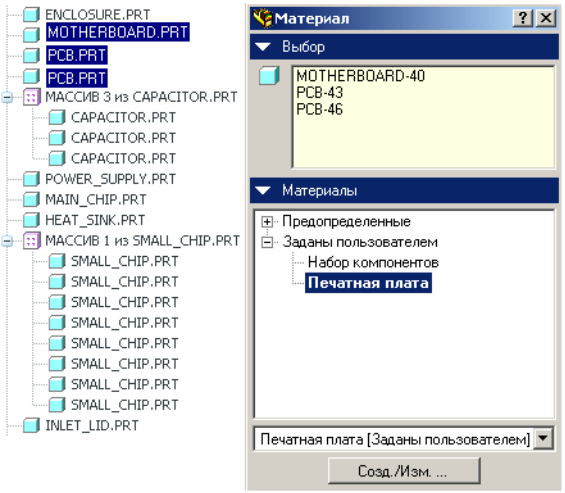
1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши по элементу **Материалы** и из контекстного меню выберите **Добавить материал**.

2 В дереве модели выберите материнскую плату (компонент **MOTHERBOARD**) и обе **печатные платы** (компоненты **PCBPCB**).

3 В списке **Материал** раскройте группу **Заданы пользователем** и выберите **Печатная плата**.

4 Кликните **OK** .

Выполняя такой же порядок действий, задайте материалы для других компонентов модели:



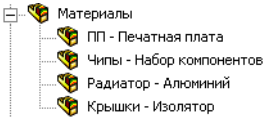
- для процессора (компонент **Main Chip**) и всех микросхем (компоненты **Small Chips**) задайте материал **Набор компонентов** (он находится в группе **Заданы пользователем**);

- радиатор (компонент **Heat Sink**) выполнен из алюминия (**Предопределенные / Metals / Aluminum**);
- крышки (компонент **INLET_LID** и все крышки в массивах **Массив 2 из OUTLET_LID** и **Массив 5 из SCREWHOLE_LID**) выполнены из изолятора (**Предопределенные / Glasses and Minerals / Insulator**).

Чтобы выбрать какой-либо компонент, выделите его в дереве модели или в графической области Creo Elements/Pro & Creo Parametric.

5 Измените имя каждого материала так, как показано ниже:

```
ПП - Печатная плата,
Чипы - Набор компонентов,
Радиатор - Алюминий,
Крышки - Изолятор.
```

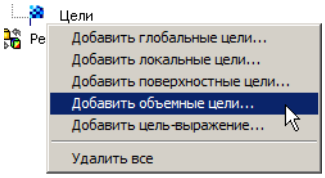


Кликните **Файл > Сохранить**.

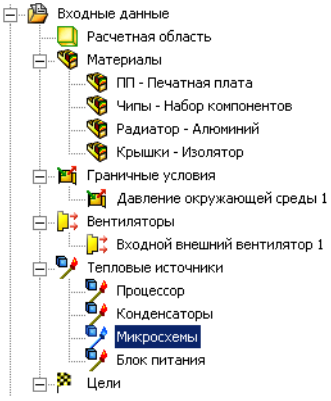
Задание инженерных целей

Задание объемных целей

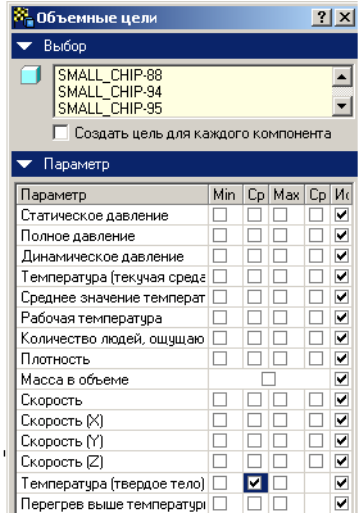
1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить объемные цели**.



2 В дереве анализа FloEFD выберите все микросхемы (компоненты **Small Chips**). Будут выбраны все компоненты, относящиеся к тепловому источнику **Микросхемы**.



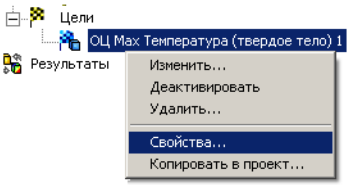
3 В таблице **Параметр** поставьте галочку **Max** в поле **Температура (Твердое тело)**.

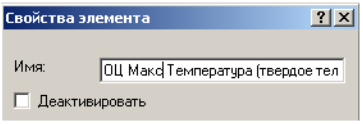


4 Поставленная по умолчанию галочка **Исп. для сход.** означает, что создаваемая цель будет использоваться для контроля сходимости.

5 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится новый элемент **ОЦ Max Температура (твердое тело) 1**.

6 Переименуйте этот элемент в `ОЦ Макс Температура Микросхем`. Вы также можете изменить имя элемента в диалоговом окне **Свойства элемента**, кликнув правой кнопкой мыши по нему и выбрав из контекстного меню **Свойства**.

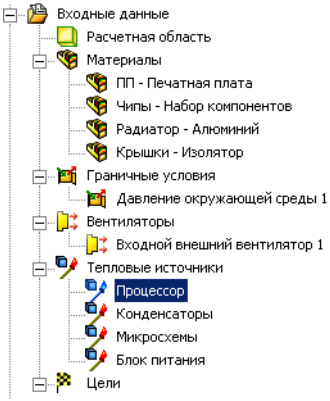


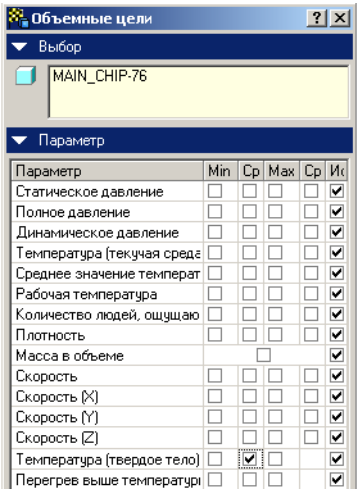


7 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добадить объемные цели**.

8 В дереве анализа FloEFD выберите элемент **Процессор**.

9 В таблице **Параметр** поставьте галочку **Max** в поле **Температура (Твердое тело)**.





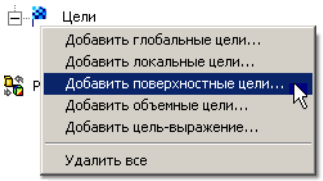
10 Кликните **OK** .

11 Переименуйте новый элемент **ОЦ Max Температура (Твердое тело) 1** в `ОЦ Макс Температура Процессора`.

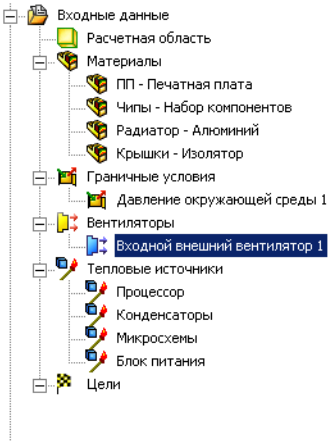
Кликните в любом месте графической области, чтобы очистить выделение.

Задание поверхностных целей

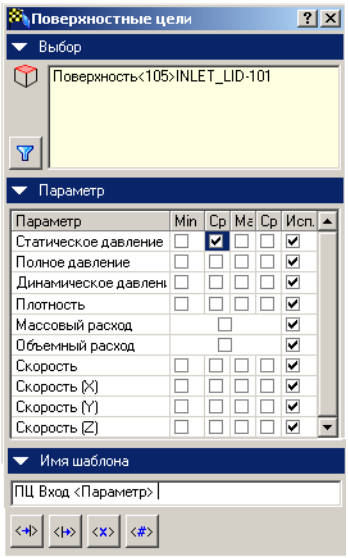
1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши кликните по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить поверхностные цели**.



2 Выберите элемент **Входной внешний вентилятор 1** для того, чтобы выделить поверхность, на которой будет задана цель.



3 В таблице **Параметр** поставьте галочку **Ср** в поле **Статическое давление**.



4 Поставленная галочка **Исп. для сход.** означает, что цель будет использоваться для контроля сходимости.

📖 *Обратите внимание на параметры X(Y, Z) - компонента силы и X(Y, Z) - компонента момента. Для поверхностных целей по таким параметрам можно выбрать систему координат, в которой эти цели будут рассчитываться.*

5 В группе **Имя шаблона**, расположенной в нижней части диалогового окна **Поверхностные цели**, нажмите **Вход** , а затем удалите `<Номер>` из поля **Имя шаблона**.

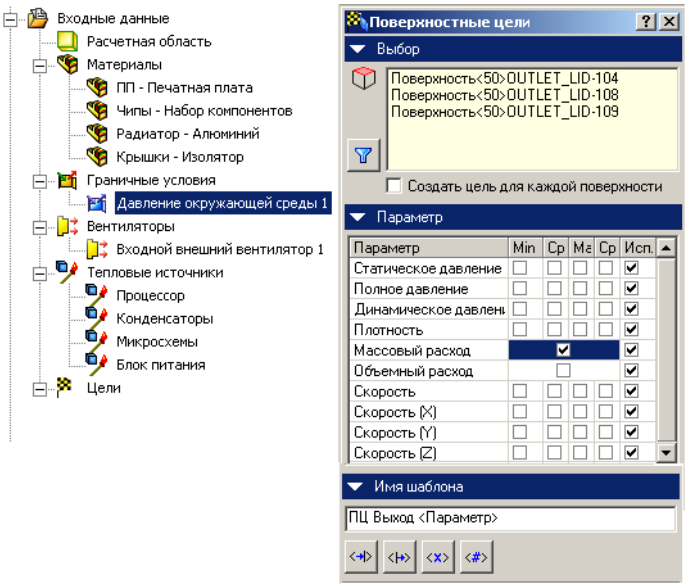
6 Кликните **OK**.

В дереве появится цель **ПЦ Вход Ср Статическое давление**.

Кликните в любом месте графической области, чтобы очистить выделение.

1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить поверхностные цели**.

2 Кликните по элементу **Давление окружающей среды 1**для того, чтобы выделить поверхности, на которых будет задана цель.



3 В таблице **Параметр** поставьте галочку напротив **Массового расхода**.

4 Поставленная галочка **Исп. для сход.** означает, что цель будет использоваться для контроля сходимости.

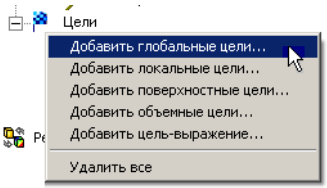
5 В группе **Имя шаблона**, расположенной в нижней части диалогового окна **Поверхностные цели**, нажмите **Выход** , а затем удалите `<Номер>` из поля **Имя шаблона**.

6 Кликните **ОК** .

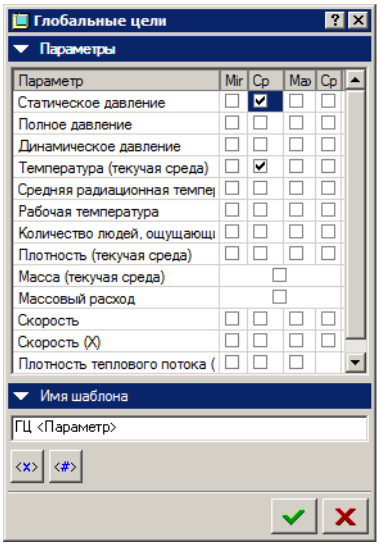
В дереве появится цель **ПЦ Выход Массовый Расход**.

Задание глобальных целей

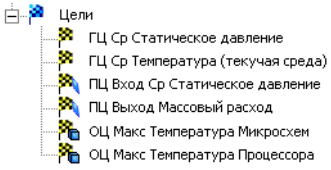
1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить глобальные цели**.



2 В таблице **Параметр** поставьте галочку **Ср** в поле **Статическое давление** и **Температура (Текучая среда)**. Поставленная галочка **Исп. для сход.** означает, что цель будет использоваться для контроля сходимости.



3 Удалите `<Номер>` из поля **Имя шаблона** и кликните **ОК** . В дереве появятся цели **ГЦ Ср Статическое давление** и **ГЦ Ср Температура (Текучая среда)**. В данном примере инженерные цели задаются для определения максимальной температуры компонентов, выделяющих тепло, повышения температуры воздуха, перепада давления в электронном устройстве и массового расхода воздуха.



Кликните **Файл > Сохранить**.

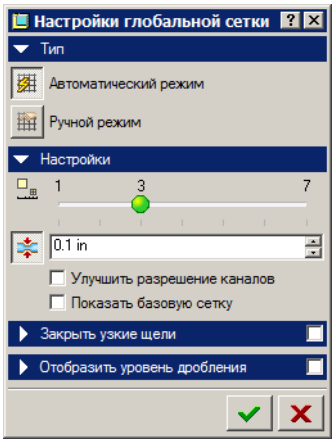
Теперь необходимо проверить настройки разрешения геометрии, которые были определены автоматически.

Задание настроек сетки

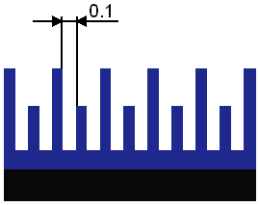
1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

1 По умолчанию выбран **Автоматический режим** .

2 В группе **Настройки** по умолчанию задан **Уровень начальной сетки** .



3 Нажмите кнопку **Минимальный зазор** . В поле **Минимальный зазор** введите значение `0.1 in` (расстояние между ребрами радиатора)..



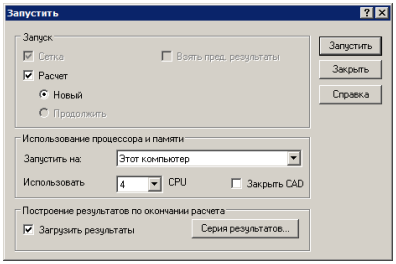
*Значение минимального зазора и минимальной толщины стенки необходимо задавать, когда в модели имеются мелкие элементы. Это гарантирует, что сетка такие элементы "не пропустит". Значение минимальной толщины стенки необходимо задавать только в случае, если с обеих сторон (внешней и внутренней) такого элемента модели имеются ячейки текучей среды. В данном случае задача внутренняя, в пространстве снаружи корпуса ячейки текучей среды отсутствуют, и границы между внутренним течением и окружающим пространством всегда разрешаются корректно. Поэтому в рассматриваемой задаче можно не учитывать стенки стального корпуса. Задание **Минимального зазора** и **Минимальной толщины стенки** позволяет адаптировать сетку к особенностям модели и, следовательно, получить точные результаты решения задачи. Однако настройка минимального зазора является более мощным средством. Это связано с тем, что сетка FloEFD строится таким образом, что заданный уровень начальной сетки определяет минимальное количество ячеек, приходящееся на **минимальный зазор**. Это число равно или больше числа ячеек, приходящихся на **минимальную толщину стенки**. Поэтому даже если в области течения есть тонкостенные элементы, нет необходимости задавать минимальную толщину стенки, т.к. это значение будет больше или равно минимальному зазору. Задание минимальной толщины стенки необходимо в случае, если нужно разрешить стенки, толщина которых меньше минимального зазора.*

4 Кликните **OK** .

Запуск расчета

1 Кликните **Flow Analysis > Расчет > Запустить**.

2 Кликните **Запустить**.

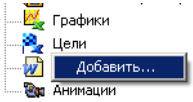


На стандартном ПК расчет данной задачи займет несколько минут.

🕮 *В процессе расчета можно заметить, что для сходимости разных целей требуется разное время. Поэтому, используя в качестве критериев сходимости те или иные цели, можно получить необходимую информацию в кратчайшие сроки. Например, если вам необходимо получить только значение температуры корпуса, FloEFD предоставит этот результат гораздо быстрее, чем сойдутся все остальные цели.*

Просмотр целей

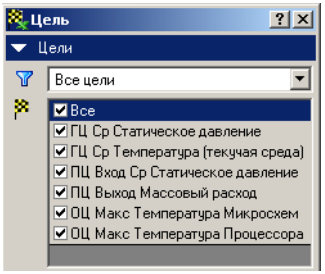
1 В дереве анализа FloEFD в группе **Результаты** кликните правой кнопкой мыши по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить**.



2 В диалоговом окне **Цели** выберите **Все**.

3 Кликните **OK**.

Откроется таблица Excel с результатами целей. На первом листе находятся значения всех рассчитанных целей.



4 Кликните **OK** .

ENCLOSURE_ASSEMBLY.ASM [INLET_FAN]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение
ГЦ Ср Статическое давление	[lbf/in^2]	14,69677107	14,69677231	14,69677092	14,69677308
ПЦ Вход Ср Статическое давление	[lbf/in^2]	14,69653289	14,69653726	14,69653289	14,69653939
ГЦ Ср Температура (текучая среда)	[°F]	61,37009916	61,30920925	61,18051182	61,40785695
ПЦ Выход Массовый расход	[lb/s]	-0,007193183	-0,007190625	-0,007193183	-0,007189949
ОЦ Макс Температура Микросхем	[°F]	89,24271231	89,14410831	88,65386757	89,445698
ОЦ Макс Температура Процессора	[°F]	88,33986905	88,34641545	88,31882243	88,36898683

Максимальная температура процессора составляет около 88 °F, а максимальная температура микросхем - около 89 °F.

🕮 *Индикатор сходимости цели является качественной и количественной характеристикой процесса сходимости цели. Когда FloEFD выполняет анализ сходимости цели, вычисляется размах амплитуды колебаний усредненного значения, который определяется как разность между максимальным и минимальным значениями цели, усредненной на интервале анализа. Интервал анализа отсчитывается от текущей итерации к началу расчета. Этот размах амплитуды сравнивается с размахом амплитуды колебаний критерия сходимости цели, который задается пользователем или автоматически определяется FloEFD как доля размаха амплитуды колебаний физического параметра цели по всей расчетной области. Индикатор сходимости цели отражает отношение размаха амплитуды колебаний критерия сходимости цели к действительному размаху амплитуды колебаний цели на всем интервале анализа (когда действительный размах амплитуды колебаний цели становится меньшим или равным размаху амплитуды колебаний критерия сходимости цели, индикатор сходимости цели заменяется словом "достигнуто"). Если действительный размах амплитуды колебаний цели периодически изменяется (колеблется), то значение на индикаторе сходимости также колеблется. Более того, значение на индикаторе сходимости может заметно уменьшаться относительно уже достигнутого уровня. Расчет может завершиться в следующих случаях:*

- *заданное **Максимальное количество продувок** было выполнено;*
- *критерии сходимости были удовлетворены, до того, как было выполнено все заданное количество итераций.*

По своему усмотрению Вы также можете выбрать другие условия завершения расчета.

Для более детального анализа результатов воспользуемся постпроцессорными инструментами FloEFD. Лучший способ визуализации течения внутри корпуса - построение траекторий потока.

Настройка прозрачности модели

На панели инструментов **Вид** кликните **Галерея образов > Больше образов**.

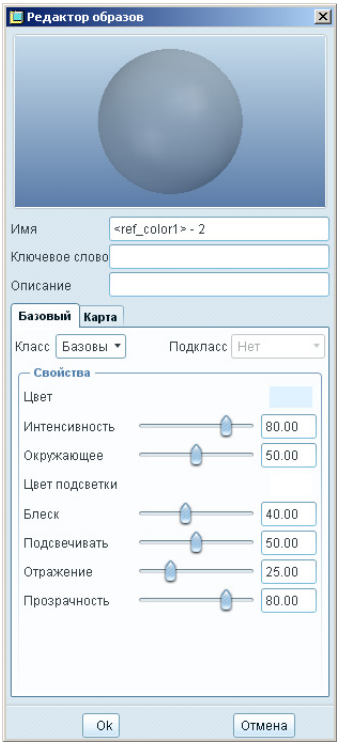
В диалоговом окне **Редактор образов** установите для прозрачности значение 80.

Нажмите кнопку **OK**.

В графической области или в дереве модели выделите все компоненты сборки и в окне **Выбрать** нажмите кнопку **OK**.

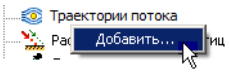
Flow Analysis*Перед тем, как приступить к обработке результатов расчета, необходимо сделать геометрию прозрачной. Это нужно для того, чтобы расположение плоскостей сечения относительно геометрии было более наглядным.*

В Creo Parametric кликните ***Вид > Отображение модели > Галерея образов > Больше образов.***

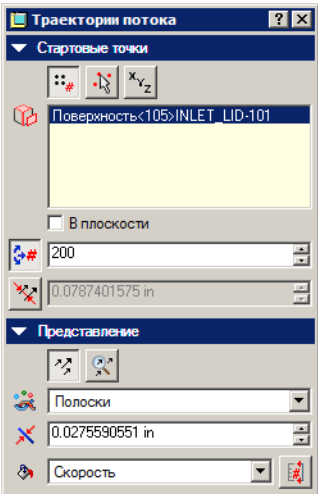


Просмотр траекторий потока

1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши по элементу **Траектории потока** и из контекстного меню выберите **Добавить траектории потока**.



2 Чтобы выбрать внутреннюю поверхность крышки на входе **INLET_LID**, кликните по элементу **Входной внешний вентилятор 1**в дереве анализа FloEFD.



3 Задайте **Количество точек** равным 200.

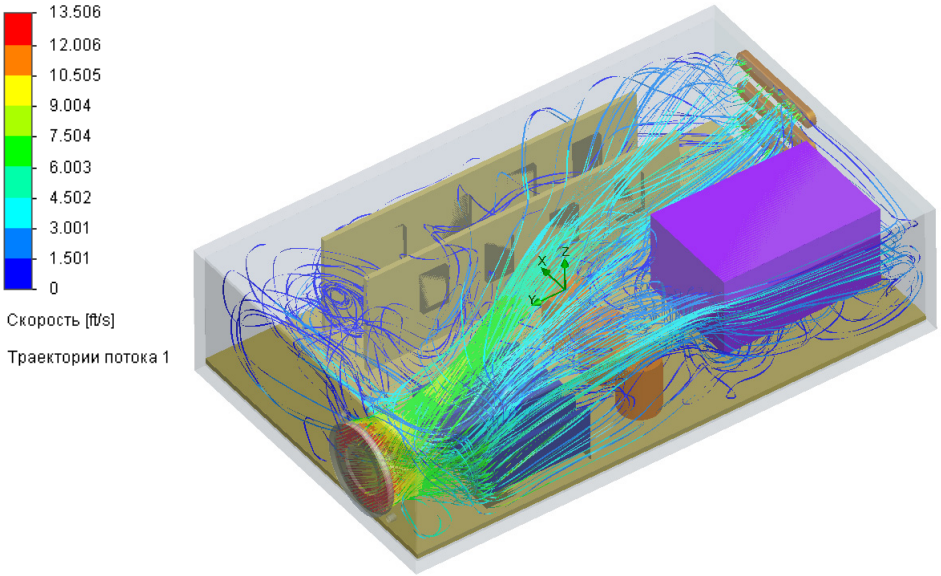
4 В группе **Представление** из списка **Показать траектории как** выберите **Полоски**.

5 Из списка **Раскрасить по** и выберите **Скорость**.

Если из списка **Раскрасить по** *выбран параметр, то траектории потока раскрашиваются в соответствии со значением выбранного параметра. Если Вы выбрали* **Фиксированный цвет**, *то все траектории потока будут иметь установленный Вами цвет.*

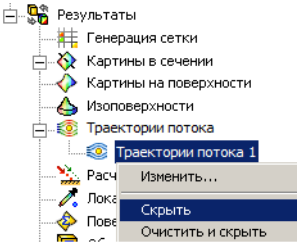
6 Кликните **OK**. В дереве анализа FloEFD появится новый элемент **Траектории потока 1**.

Получившиеся траектории потока представлены на рисунке ниже.



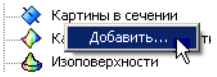
Обратите внимание, что вдоль **печатной платы**, расположенной рядом со стенкой корпуса (компонент **PCB**) проходят лишь несколько траекторий потока. Это означает, что микросхемы, расположенные на этой печатной плате, недостаточно охлаждаются. Кроме того, голубой цвет траекторий потока означает низкую скорость течения вблизи данной платы (компонент **PCB**).

Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Траектории потока 1** и из контекстного меню выберите **Скрыть**.



Рассмотрим распределение скорости более подробно.

Просмотр картин в сечении



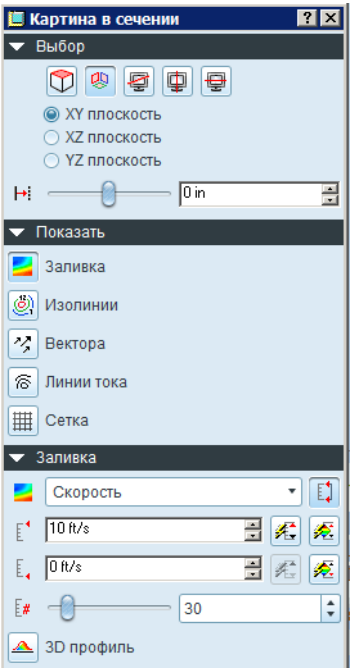
1 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картины в сечении** и из контекстного меню выберите **Добавить**.

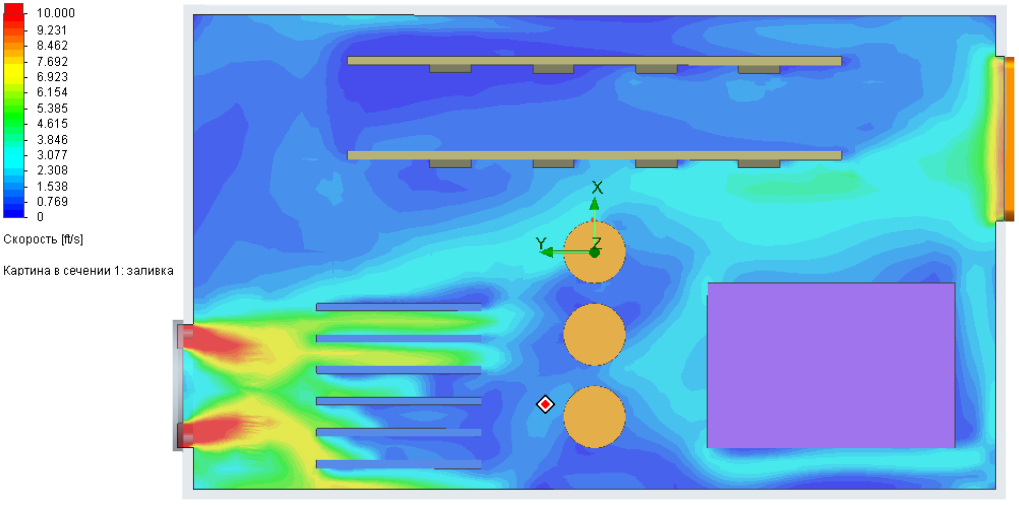
2 В группе **Выбор** перейдите в режим **XYZ плоскости** и в качестве плоскости сечения выберите **XY плоскость**.

3 В группе **Заливка** в качестве параметра выберите **Скорость**, затем нажмите **Корректировать минимум и максимум**. В качестве **Минимума** и **Максимума** задайте соответственно `0` и `10 ft/s`. По палитре с таким максимумом и минимумом будет проще определить действительное значение параметра

4 Установите **Количество уровней** равным `30`.

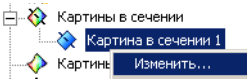
5 Кликните **OK**. В дереве анализа FloEFD появится элемент **Картина в сечении 1**





Теперь рассмотрим распределение температуры воздуха.

6 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картина в сечении 1** и из контекстного меню выберите **Изменить**.



7 Установите значение **Смещения** равным `-0.3 in`.

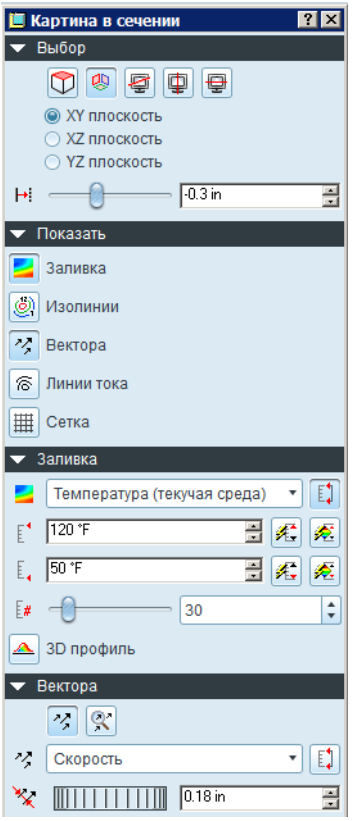
8 В качестве **Параметра** вместо **Скорости** выберите **Температура (Текучая среда)**.

9 В качестве **Минимума** и **Максимума** задайте соответственно `50` и `120 F`.

10 В группе **Показать** выберите **Вектора** .

11 Убедитесь, что в раскрывшейся группе **Вектора** выбрана опция **Статические вектора** , а в качестве **Параметра** выбрана **Скорость**, затем нажмите **Корректировать минимум и максимум** .

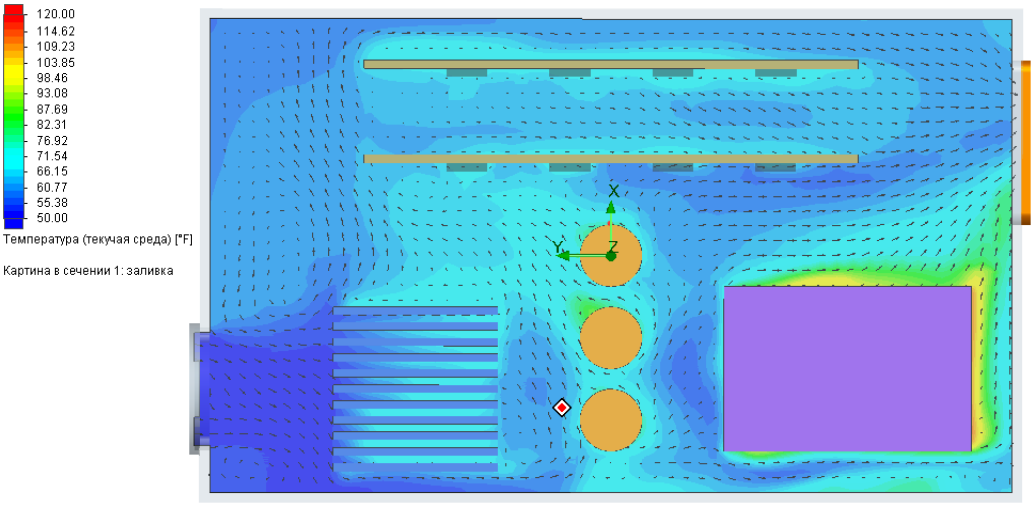
12 Установите **Максимум** равным `1 ft/s`.



🕮 *Задавая значения* **Минимума** *и* **Максимума**, *Вы можете изменять длину векторов. Вектора, соответствующие значению скорости, которое больше или равно Максимальному, будут иметь одинаковую длину. Тот же самый принцип справедлив и для векторов, соответствующих значению скорости, которое меньше или равно Минимальному. Значение 1 ft/s было установлено для того, чтобы отобразить области с низкой скоростью.*

13 Установите значение **Расстояния** между векторами равным 0.18 in.

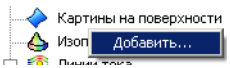
Кликните **OK**.



Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картина в сечении 1** и из контекстного меню выберите **Скрыть**. Теперь рассмотрим распределение температур по поверхности твердых тел.

Просмотр картин на поверхности

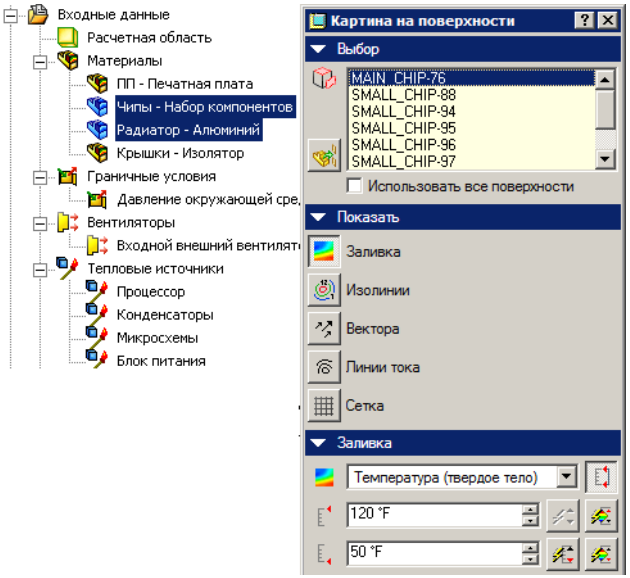
1 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картины на поверхности** и из контекстного меню выберите **Добавить**.



2 В дереве анализа, удерживая нажатой клавишу **Ctrl**, выберите элементы **Радиатор - Алюминий** и **Чипы - Набор компонентов**.

3 В группе **Заливка** в качестве параметра выберите **Температура (Твердое тело)**.

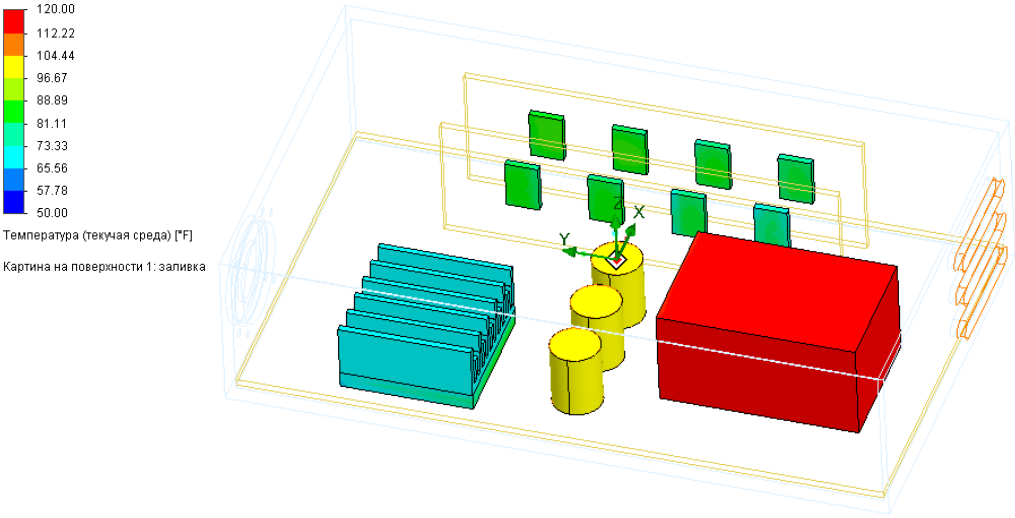
4 В качестве **Минимума** и **Максимума** задайте соответственно `50` и `120 F`.



5 Кликните **OK** .

6 Выберите блок питания (компонент **Power Supply**) и конденсаторы (элементы **Capacitor**), повторив шаги 1 и 2, затем кликните **OK**.

7 На панели инструментов **Изображение модели** кликните **Стиль показа > Каркас** . Будут отображены только контуры модели.



Вы можете продолжить анализировать результаты с помощью других постпроцессорных инструментов, которые были рассмотрены ранее в примере *Течение воды в шаровом кране*. FloEFD предоставляет большое количество инструментов для быстрого и качественного исследования конструкций. Количественные результаты, такие как максимальная температура компонентов, перепад давления в электронном устройстве и повышение температуры воздуха позволяют определить, является ли данная конструкция пригодной для использования. Качественные результаты, такие как характер течения воздуха и характер теплопроводности, позволяют выявить проблемные области и недостатки исследуемой конструкции для того, чтобы в дальнейшем ее можно было оптимизировать.

A3

Пористые среды

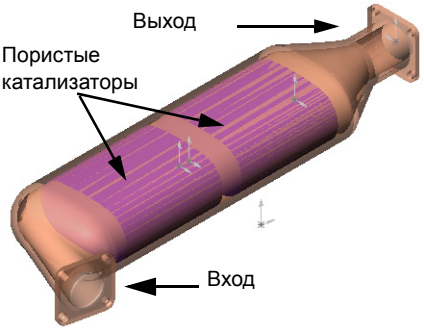
В данном примере рассматривается автомобильный каталитический нейтрализатор выхлопных газов. Каталитический нейтрализатор представляет собой два пористых тела, которые служат катализаторами для преобразования токсичной окиси углерода в диоксид углерода. При проектировании каталитического нейтрализатора отработавших газов инженеры сталкиваются со следующей проблемой: необходимо уменьшить гидравлическое сопротивление нейтрализатора, увеличив при этом площадь поверхности контакта выхлопных газов и нейтрализатора, т.е. его длина и площадь внутренней поверхности должны быть как можно больше. Чем равномернее распределяются выхлопные газы по поперечному сечению нейтрализатора, тем он работоспособнее. В FloEFD для моделирования каталитического нейтрализатора используются пористые среды. В объеме, занимаемом нейтрализатором, задается распределенное сопротивление, что позволяет избежать трудоемкого построения ячеистой структуры нейтрализатора. В данном примере FloEFD исследуется, как тип проницаемости (изотропная или однонаправленная) пористой среды каталитического нейтрализатора влияет на распределение массового расхода выхлопных газов по поперечному сечению нейтрализатора. Исследование будет проводиться с помощью траекторий потока, которые равномерно распределяются на входе в модель. Также для оценки эффективности нейтрализатора важно определить, как долго газы находятся в нейтрализаторе. Для этого траектории потока можно раскрасить по параметру скорость потока.

Открытие модели

1 Скопируйте папку **A3 - Porous Media** в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные.

2 Запустите FloEFD. Кликните **Файл > Открыть**.

3 В диалоговом окне **Открыть файл** перейдите к сборке `catalyst.asm`, расположенной в папке **A3 - Porous Media** и нажмите кнопку **Открыть** (или дважды кликните по файлу сборки).

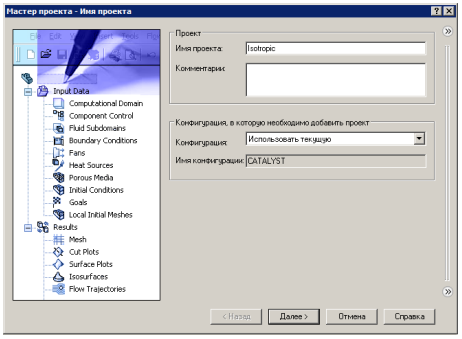


🕮 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку* `catalyst.asm`*, расположенную в папке* ***A3 - Porous Media\Ready To Run****, и запустить на расчет нужные проекты.*

Создание проекта FloEFD

1 В главном меню кликните **Flow Analysis > Проект > Мастер проекта**.

В диалоговом окне **Мастер проекта** введите имя проекта: `Isotropic`. В списке **Конфигурация, в которую необходимо добавить проект** выбран элемент **Использовать текущую**. Внесения изменений не требуется.

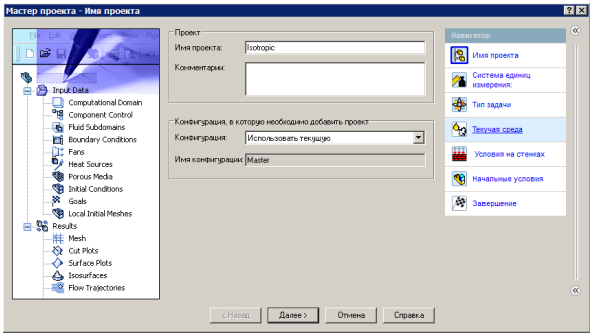


🕮 *Мастер проекта поможет Вам пошагово задать основные свойства и характеристики проекта. На всех этапах, кроме двух (там, где определяются текучие среды и материал по умолчанию), есть некоторые предопределенные значения. Вы можете принять эти настройки, ничего не меняя и нажав* **Далее***, или изменить значения по своему усмотрению. Такими предопределенными настройками являются:*
система единиц измерения – SI,
тип задачи – внутренняя, физических моделей не выбрано,
условия на стенках – адиабатическая стенка
начальные условия – давление - 1 atm, температура - 293.2 K.
Изменения заданных по умолчанию настроек не требуется. Все, что необходимо

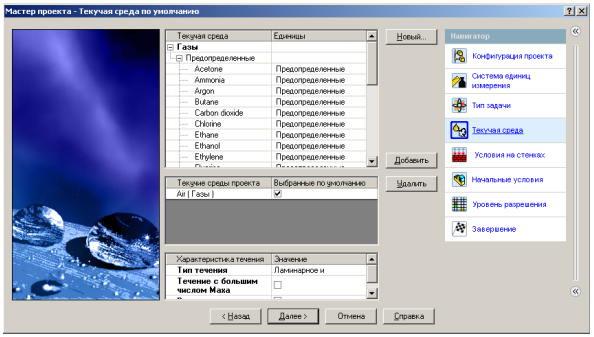
- выбрать воздух (Air) в качестве текучей среды. Используем панель ***Навигатора*** *для того, чтобы избежать прохождения всех шагов и получить быстрый доступ к нужным страницам Мастера проекта.*

2 Справа нажмите на стрелку .

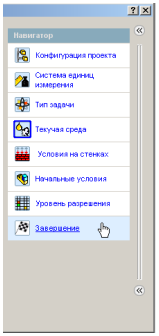
3 На панели **Навигатор** кликните **Текучая среда**.



4 Откройте папку **Газы**, выберите **Air** и нажмите кнопку **Добавить**.



5 Т.к. менять другие свойства не требуется, Мастер проекта можно закрыть. На панели Навигатора кликните **Завершить**.



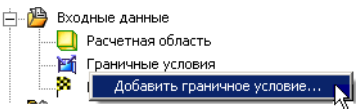
📖 *Нажать кнопку Завершить Вы можете в любой момент. Но если Вы попытаетесь это сделать, не задав обязательные свойства (такие как текучие среды проекта), Мастер проекта не закроется, а страница, на которой необходимо задать свойство, будет помечена восклицательным знаком*⚠.

FloEFD сразу же создаст новый проект с прикрепленными данными FloEFD.

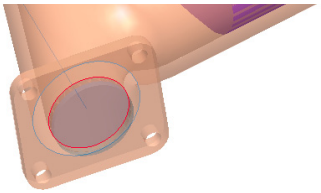
Для того, чтобы скрыть полупрозрачный параллелепипед, обозначающий границы расчетной области, в дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Расчетная область** и из контекстного меню выберите **Скрыть**.

Задание граничных условий

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**.



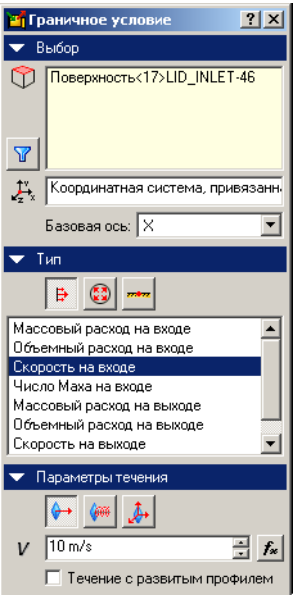
2 Выберите внутреннюю поверхность крышки на входе, как показано на рисунке.



3 Нажмите **Расход/Скорость** и выберите **Скорость на входе**.

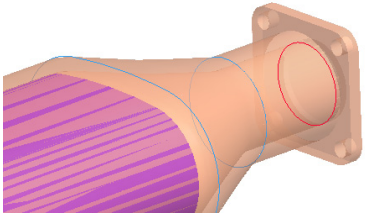
4 Задайте значение **Скорости по нормали к поверхности** поверхности равным `10 m/s`.

5 Кликните **OK** .



📖 *Для FloEFD это означает, что в соответствующее отверстие воздух втекает со скоростью 10 m/s.*

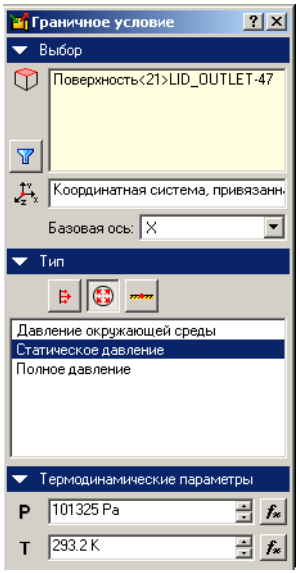
6 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**. Выберите внутреннюю поверхность крышки на выходе, как показано на рисунке.



7 Нажмите **Давление** и выберите **Статическое давление**.

8 Не изменяйте заданные по умолчанию **Термодинамические параметры**, **Параметры турбулентности**, **Параметры пограничного слоя** и **Опции**.

9 Кликните **OK** .



🕮 *Для FloEFD это означает, что из соответствующего отверстия модели поток вытекает в область статического атмосферного давления.*

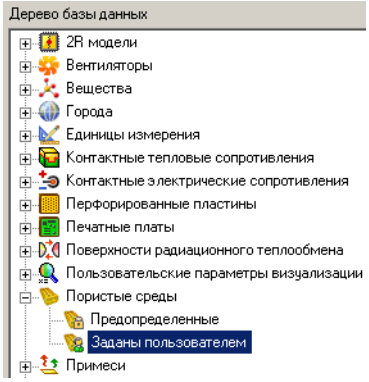
Теперь необходимо задать пористые среды. Для начала в **Инженерной базе данных** необходимо создать новый элемент пористой среды и указать его свойства (пористость, тип проницаемости и т.д.), а затем задать этот элемент на соответствующих компонентах модели.

Создание изотропной пористой среды в базе данных

Нужный материал уже есть в Инженерной базе данных в папке Предопределенные. Вы можете не создавать новую пористую среду, а впоследствии, когда будете назначать материал компоненту, просто выбрать предопределенный материал "Isotropic".

1 Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Инженерная база данных**.

2 В **Дереве базы данных** выберите **Пористые среды /**
Заданы пользователем.



3 На панели инструментов кликните **Новый элемент** . Появится незаполненная таблица **Свойства элемента**. Для того, чтобы задать какое-либо значение, дважды кликните в соответствующей ячейке.

4 Присвойте новой пористой среде имя `Изотропная`.

5 В поле **Комментарии** нажмите кнопку ... и введите необходимые комментарии. Поле **Комментарии** не является обязательным для заполнения.

6 Значение **Пористости** задайте равным `0.5`.

📖 *В данном случае пористость - это эффективная пористость среды, которая определяется как отношение объема, который занимают поры, к общему объему пористой среды. Пористость определяет скорость потока в каналах пористой среды. Скорость газов, в свою очередь, определяет, как долго выхлопные газы находятся в нейтрализаторе. Следовательно, этот параметр влияет на эффективность нейтрализатора.*

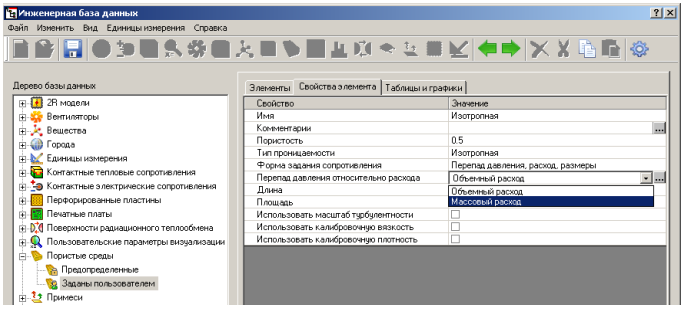
7 В качестве **Типа проницаемости** выберите **Изотропная**.

📖 *Сначала рассмотрим пористую среду, проницаемость которой является **Изотропной**, т.е. не зависит от направления в среде. Затем рассмотрим другой вариант - среду с **Однонаправленной** проницаемостью, т.е. среду, проницаемую только в одном направлении.*

8 В качестве **Формы задания сопротивления** выберите **Перепад давления, расход, размеры.**

📖 *Для задания сопротивления было выбрано* **Перепад давления, расход, размеры**, *т.е. сопротивление среды было задано как* $k = \Delta P \times S / (m \times L)$ *(измеряемое в* s^{-1}*). Здесь S, L - площадь поперечного сечения и длина исследуемого образца пористой среды, m - массовый расход выхлопных газов в заданном направлении,* ΔP *- перепад давления между противоположными сторонами образца в заданном направлении. Для данного проекта примем перепад давления* $\Delta P = 20$ *Pa при массовом расходе* $m = 0.01$ *kg/s (*$\Delta P = 0$ *Pa при* $m=0$ *kg/s), площадь зададим равной* $S = 0.01$ m^2*, а длину - L = 0.1m. Таким образом,* $k = 200$ s^{-1}*. Зная площадь поперечного сечения S и длину L нейтрализатора, добавленного в модель, а также массовый расход выхлопных газов m через него, можно рассчитать примерное значение потерь давления на нейтрализаторе как* $\Delta P = k \times m \times L/S$.

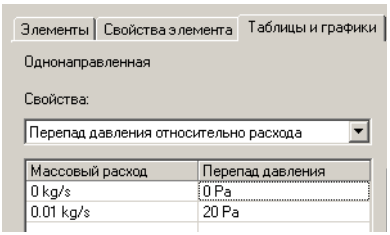
9 В качестве **Перепада давления относительно расхода** выберите **Массовый расход**. Нажмите кнопку ..., чтобы перейти на вкладку **Таблицы и графики**.



10 В таблице **Свойства** задайте линейную зависимость перепада давления от массового расхода, как показано на рисунке.

11 Вернитесь на вкладку **Свойства элемента**.

12 Задайте **Длину** равной `0.1 m` и **Площадь** равной `0.01 m^2`.



Перепад давления относительно расхода	Массовый расход
Длина	0.1 m
Площадь	0.01 m^2
Использовать масштаб турбулентности	☐
Использовать калибровочную вязкость	☐
Использовать калибровочную плотность	☐

13 Кликните **Сохранить** .

14 Кликните **Файл > Выход** для того, чтобы выйти из базы данных.

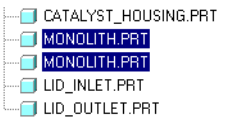
Теперь применим созданную пористую среду к компонентам, которые заменяют пористые тела в модели.

Обратите внимание, что пористую среду можно применить только к тому компоненту, который не обрабатывается FloEFD как твердое тело. По умолчанию все компоненты в сборке обрабатываются как твердые тела. Для того, чтобы определить какой-либо компонент не как твердое тело, необходимо отключить его в диалоговом окне **Управление компонентами**. Когда Вы задаете какие-либо тела как пористые, т.е. применяете к ним условие **Пористая среда**, они отключаются автоматически, и делать это вручную не приходится.

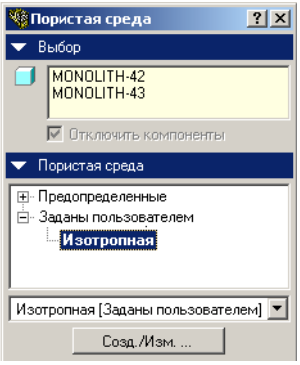
Задание пористой среды

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Пористая среда**.

2 В дереве модели выберите оба монолита (компонент **MONOLITH**).



3 Раскройте список **Заданы пользователем** и выберите **Изотропная**. Если Вы не стали создавать новую пористую среду, выберите материал **Isotropic** из списка **Предопределенные**.

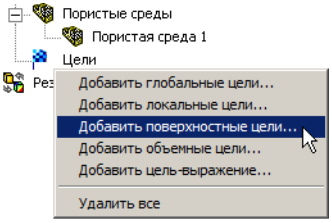


4 Кликните **OK** .

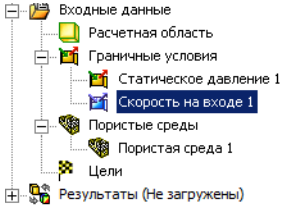
Чтобы рассчитать перепад полного давления между входом и выходом модели, необходимо задать две **Поверхностные цели**, а на их основе - **Цель-выражение**.

Задание поверхностных целей

1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши кликните по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить поверхностные цели**.



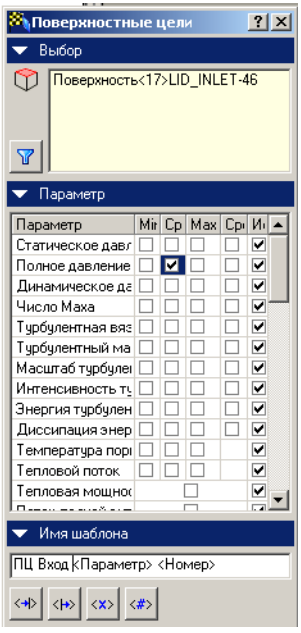
2 Для того, чтобы выделить внутреннюю поверхность крышки на входе, в дереве анализа FloEFD выберите элемент **Скорость на входе 1**.



3 В таблице **Параметр** поставьте галочку **Ср** в поле **Полное давление**.

4 Не снимайте галочку **Исп. для сход.**, чтобы эта цель использовалась для контроля сходимости.

5 В группе **Имя шаблона** в нижней части диалогового окна окна **Поверхностные цели** нажмите **Вход** .



6 Кликните **OK** - появится новая цель `ПЦ Вход Ср Полное давление 1`.

7 Кликните правой кнопкой мыши по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить поверхностные цели**.

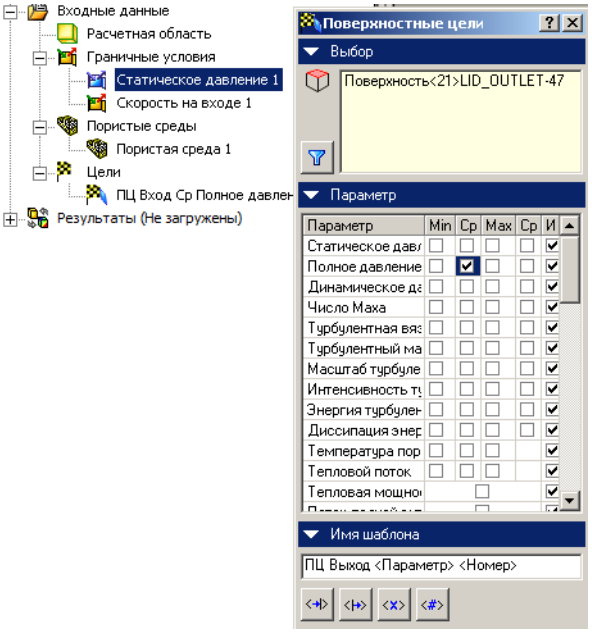
8 Для того, чтобы выделить внутреннюю поверхность крышки на выходе, в дереве анализа FloEFD выберите элемент **Статическое давление 1**.

9 В таблице **Параметр** поставьте галочку **Ср** в поле **Полное давление**.

10 Не снимайте галочку **Исп. для сход.**, чтобы эта цель использовалась для контроля сходимости.

11 В группе **Имя шаблона** в нижней части диалогового окна окна **Поверхностные целиВыход** .

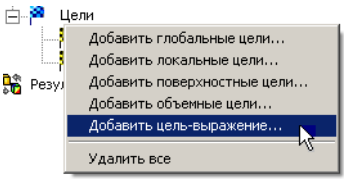
12 Кликните **OK** - появится новая цель `ПЦ Выход Ср Полное Давление 1`.



Задание цели-выражения

Цель-выражение - это цель, которая задается в виде аналитической функции существующих целей и/или параметров условий входных данных. Такую цель, как и остальные, можно отслеживать в процессе расчета, а также выводить ее значение в виде результатов. В качестве переменных можно использовать созданные цели, в том числе и цели-выражения (кроме тех, что зависят от других целей-выражений), а также входные данные проекта (общие начальные или внешние условия, граничные условия, вентиляторы, тепловые источники, локальные начальные условия). В определении цели-выражения Вы также можете использовать константы.

1 Кликните правой кнопкой мыши по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить цель-выражение**.

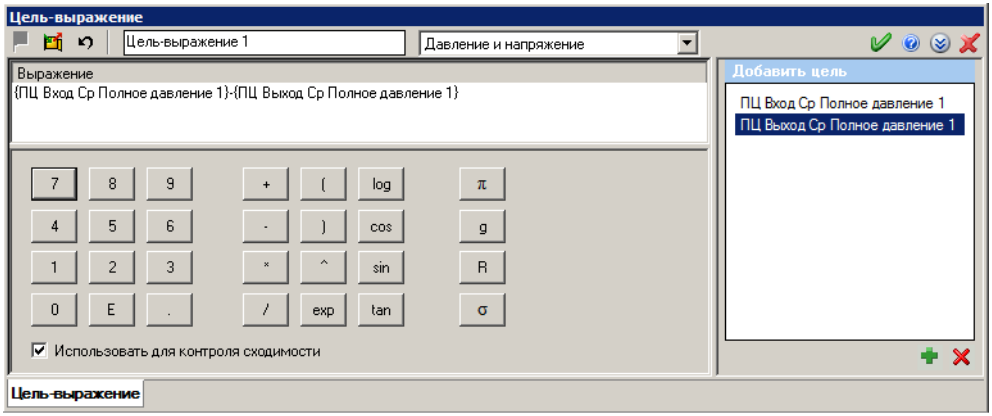


2 На панели в нижней части экрана нажмите кнопку **Добавить цель** .

3 Из списка **Добавить цель** выберите цель **ПЦ Вход Ср Полное давление 1** и кликните **Добавить** . Выбранная цель появится в поле **Выражение**.

4 На калькуляторе нажмите кнопку минус "-".

5 Из списка **Добавить цель** выберите цель **ПЦ Выход Ср Полное давление 1** и кликните **Добавить** . В поле **Выражение** появится полученное результирующее выражение.



🕮 *Для определения Цели-выражения Вы можете использовать цели (включая ранее созданные Цели-выражения), входные данные и константы. Если в выражении какие-либо физические параметры (например, длина, площадь и т.д.) являются константами, следует убедиться, что они задаются в той системе единиц, которая была выбрана для проекта. FloEFD не имеет представления о физическом значении констант, которые Вы используете, поэтому размерность Цели-выражения необходимо задавать вручную.*

🕮 *В качестве переменной в формулу можно добавить площадь или объем элементов модели (поверхностей, компонентов и т.д.). Для этого необходимо предварительно создать соответствующую цель на нужных поверхностях или компонентах по одному из следующих параметров: Площадь (смачиваемая поверхность), Площадь (твердое тело), Объем (смачиваемая поверхность), Объем (твердое тело), а затем добавить созданную цель в формулу в качестве переменной.*

6 Убедитесь, что из списка **Размерность** выбрано **Давление и напряжение**.

7 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится новая цель **Цель-выражение 1**.

Задание настроек сетки

1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

2 По умолчанию выбран **Автоматический режим** .

3 В группе **Настройки** не меняйте заданные по умолчанию задан **Уровень начальной сетки** и **Минимальный зазор** .

4 Чтобы отобразить базовую сетку, кликните **Показать базовую сетку**.

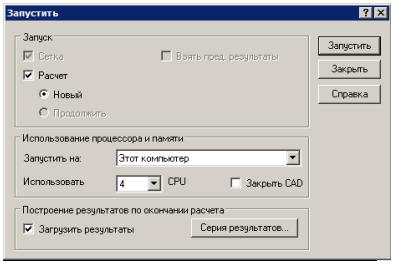
5 Кликните **OK** .

Запуск расчета

1 Кликните **Flow Analysis > Расчет > Запустить**.

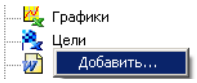
2 Кликните **Запустить**.

После того, как расчет завершится, закройте диалоговое окно монитора.



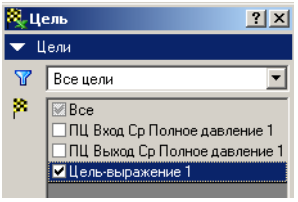
Просмотр целей

1 В группе **Результаты** кликните правой кнопкой мыши по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить**.



2 В диалоговом окне **Цели** выберите **Цель-выражение 1**.

3 Кликните **OK**.



Откроется таблица Excel с результатами целей. На первом листе находится таблица окончательных значений цели.

Перепад полного давления составляет примерно 123 Па.

CATALYST.ASM [ISOTROPIC]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Прогресс сходимости [%]
Цель-выражение 1	[Pa]	123,2906883	125,845	123,291	131,028	100

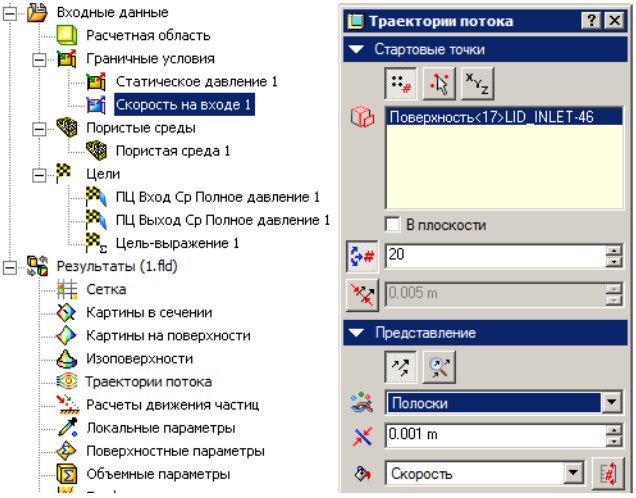
Далее необходимо построить траектории потока, стартовые точки которых равномерно распределены по поверхности входа. С их помощью можно будет увидеть неравномерность распределения массового расхода потока газов по поперечному сечению нейтрализатора.

Просмотр траекторий потока

1 Правой кнопкой кликните по элементу **Траектории потока** и из контекстного меню выберите **Добавить**.

2 Для того, чтобы выделить внутреннюю поверхность крышки на входе, в дереве анализа FloEFD выберите элемент **Скорость на входе 1**.

3 В группе **Представление** из списка **Раскрасить по** , выберите **Скорость**.

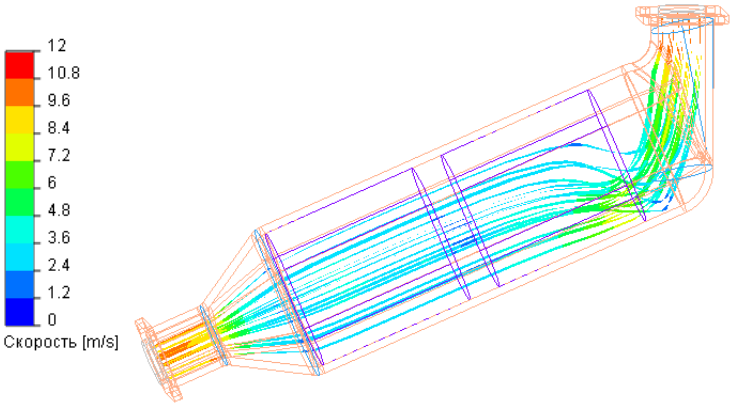


4 Кликните **Корректировать минимум/максимум и количество уровней** и задайте значение **Максимума** равным `12` m/s.

5 Кликните **OK** .

1 Выберите вид **Скрытые линии** .

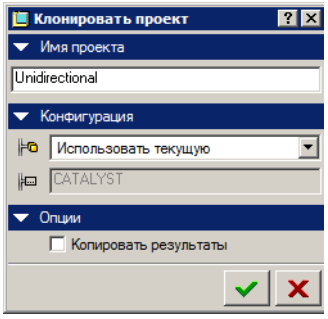
Вы увидите картину как на рисунке ниже.



Теперь выполним расчет проекта, в котором проницаемость пористой среды будет однонаправленной. Затем сравним эффективность нейтрализаторов с однонаправленной и изотропной проницаемостью.

Клонирование проекта

1. Кликните **Flow Analysis > Проект > Клонировать проект**.
2. В поле **Имя проекта** введите `Unidirectional`.
3. Кликните **OK**.



Создание однонаправленной пористой среды в базе данных

Такой материал уже существует в **Инженерной базе данных** в папке **Предопределенные**. Вы можете пропустить этот шаг, и впоследствии, когда будете назначать материал компоненту, просто выбрать предопределенный материал "Unidirectional".

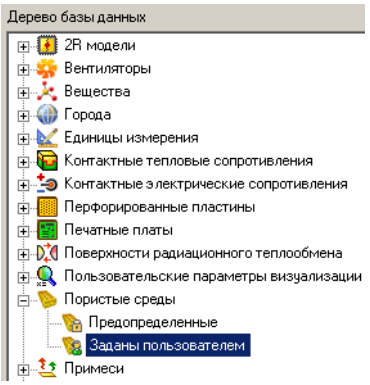
1 Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Инженерная база данных**.

2 В дереве **Инженерной базы данных** выберите **Пористые среды / Заданы пользователем**.

3 На вкладке **Элементы** выберите элемент **Изотропная.**

4 Кликните **Копировать** .

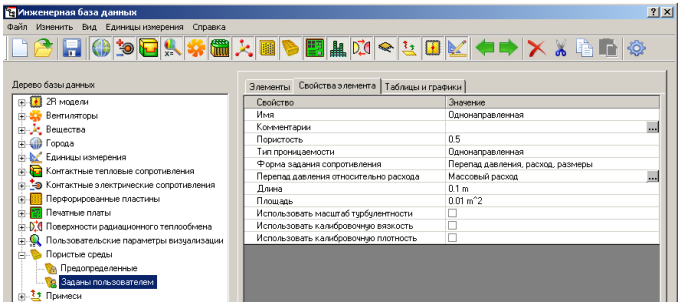
5 Кликните **Вставить** . В списке появится новый элемент **Копия Isotropic (1)**.



6 Выберите элемент **Копия Isotropic (1)** и перейдите на вкладку **Свойства элемента**.

7 Переименуйте этот элемент в `Однонаправленная`.

8 Измените **Тип проницаемости** на **Однонаправленная**.



9 Сохраните изменения и выйдите из инженерной базы данных.

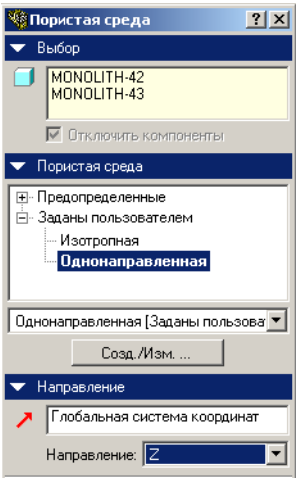
Теперь созданную пористую среду можно применить к монолитам.

Задание пористой среды с однонаправленной проницаемостью

1 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Пористая среда 1** и из контекстного меню выберите **Изменить**.

2 Если Вы пропустили создание новой пористой среды, выберите материал **Unidirectional** из списка **Предопределенные**.

3 Из списка **Направление** выберите ось **Z** Глобальной системы координат.



🕮 *Для пористой среды с однонаправленной проницаемостью необходимо задать направление проницаемости как ось выбранной системы координат (в данном случае ось Z Глобальной системы координат).*

4 Кликните **OK** .

Т.к. остальные условия и цели остаются теми же, можно сразу же запустить расчет.

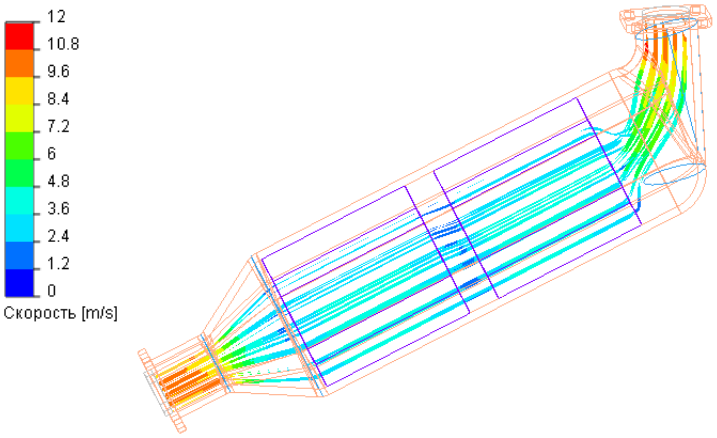
Сравнение нейтрализаторов с изотропной и однонаправленной проницаемостью

По окончании расчета создайте цель, выбрав **Цель-выражение1**.

CATALYST.ASM [UNIDIRECTIONAL]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Прогресс сходимости [%]
Цель-выражение 1	[Pa]	119,2174858	121,417	119,217	126,405	100

Отобразите траектории потока, как это было описано выше.



Сравнив траектории потока, проходящие через пористые тела с изотропной и однонаправленной проницаемостью, можно сделать следующие выводы:

- Входящий поток является неравномерным, т.к. входное отверстие выхлопной трубы расположено несимметрично по отношению к той ее части, где установлен каталитический нейтрализатор. В силу неравномерности входящего потока поток внутри первого пористого тела также является неравномерным;
- Тип проницаемости нейтрализатора (изотропная или однонаправленная) влияет незначительно на входящий поток и заметнее на поток внутри нейтрализатора (особенно первого пористого тела). В обоих случаях поток выхлопных газов поступает в первое пористое тело ближе к стенке, находящейся напротив входного отверстия. В случае с изотропной проницаемостью поток более приближен к ней, чем в случае с однонаправленной проницаемостью.
- В начальной части первого пористого тела (около одной трети длины тела) поток более неравномерен в случае, когда проницаемость пористого тела изотропна;
- В первом случае вследствие изотропной проницаемости основной поток газа в нейтрализаторе расширяется. Во втором случае однонаправленная проницаемость препятствует расширению потока. Поэтому в случае изотропной проницаемости в остальной части первого пористого тела (две трети его длины) поток равномернее, чем в его начальной части.
- Т.к. расстояние между пористыми телами довольно мало, в объеме между ними поток газов не успевает стать равномернее. Хотя в случае однонаправленной проницаемости изменения в этом направлении становятся заметны. Таким образом, на входе во второе пористое тело поток также является неравномерным. Как видно, неравномерность потока во втором пористом теле остается неизменной.

Теперь рассмотрим скорость потока внутри нейтрализатора. Ее несложно оценить, т.к. траектории потока окрашены по этому параметру в соответствии с выбранной палитрой. Для того, чтобы можно было произвести сравнение результатов, полученных в двух случаях (когда проницаемость пористых тел является изотропной и однонаправленной), на палитре необходимо задать одинаковый диапазон значений скорости. Это связано с тем, что максимальное значение, определяющее диапазон, в двух случаях по умолчанию является различным. Как видно, скорости потока как в первом, так и во втором варианте являются практически одинаковыми. Таким образом, время нахождения выхлопных газов в нейтрализаторе является одинаковым в обоих случаях.

Итак, можно сделать вывод, что нейтрализатор с изотропной проницаемостью эффективнее нейтрализатора с однонаправленной проницаемостью (при одинаковом сопротивлении). Это объясняется тем, что поток в нем является более равномерным. Однако, несмотря на то, что было задано одинаковое сопротивление нейтрализаторов, в случае использования нейтрализатора с однонаправленной проницаемостью, потери полного давления на 3% ниже. Это объясняется тем, что в двух случаях степень неравномерности потока как внутри пористых тел, так и за их пределами является разной.

B

Средний уровень

Средний уровень включает примеры, которые демонстрируют, как с помощью FloEFD можно решать инженерные задачи. В качестве примеров представлены наиболее распространенные задачи.

B1 - Определение гидравлических потерь (Determination of Hydraulic Loss)

B2 - Коэффициент сопротивления цилиндра (Cylinder Drag Coefficient)

B3 - КПД теплообменника (Heat Exchanger Efficiency)

B4 - Оптимизация сетки (Mesh Optimization)

Средний уровень:

B1

Определение гидравлических потерь

Гидравлические потери в трубопроводных системах обычно разделяют на две составляющие:

- линейные потери, возникающие вследствие трения вдоль прямолинейных отрезков труб;
- местные потери, возникающие в результате местных сопротивлений (отводов, тройников, различных вентилей, кранов, задвижек и т.д.).

Полные гидравлические потери представляют собой сумму линейных и местных потерь. Потери на трение определяются с помощью формул, полученных в результате теоретических или практических исследований. Определение местных потерь является более сложной задачей, т.к. для этого доступны только экспериментальные данные. Существует большое разнообразие конфигураций трубопроводных систем, следовательно, различны причины возникновения местных сопротивлений. Структура потока также может быть довольно сложной. Поэтому применение экспериментальных данных ограничено. FloEFD предлагает иной подход к решению подобных задач и позволяет с высокой точностью определить потери давления практически на любом участке трубопроводной системы.

Открытие модели

Скопируйте папку **B1 - Hydraulic Loss** в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные. Запустите FloEFD.

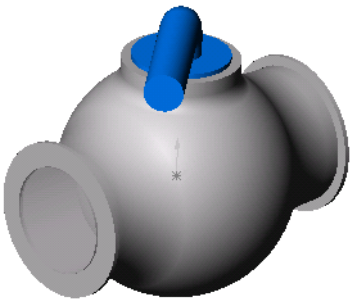
Кликните **Файл > Открыть**. В диалоговом окне **Открыть файл** перейдите к модели **valve.asm**, расположенной в папке **B1 - Hydraulic Loss**, и кликните **Открыть**.

В диалоговом окне **Выбрать экземпляр** выберите `40_DEGREES_SHORT_VALVE` и кликните **Открыть**.

📖 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть модель **valveValve.asm**, расположенную в папке **B1 - Hydraulic Loss\Ready To Run**, и запустить на расчет нужные проекты.*

Описание модели

Данная модель представляет собой шаровой кран, который открывается и закрывается поворотом рукоятки.



Потери давления в шаровом кране зависят от площади минимального проходного сечения. Проходное сечение, в свою очередь, зависит от угла поворота крана, а также от его геометрических размеров, а именно от соотношения диаметров шарика и трубы:

$$\theta = \arcsin\left[2\frac{D_{ball}}{D_{pipe}}\right]$$

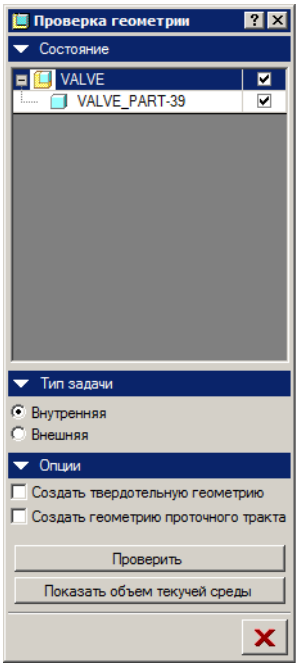
Сначала необходимо рассчитать величину полных потерь давления, т.е. разность между давлением на входе в местное гидравлическое сопротивление (шаровой кран в данном случае) и давлением на значительном расстоянии от выхода из него, где поток снова становится невозмущенным. Затем, для того, чтобы определить только местные потери давления, необходимо из величины измеренных полных потерь вычесть величину потерь давления на трение.

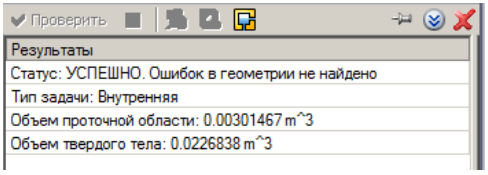
В данном случае рассчитаем потери давления в шаровом кране при угле его поворота, равном 40^{o}. Такая задача является типичной внутренней задачей FloEFD.

📖 *Внутренними являются течения внутри труб, различных емкостей, систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) и т.д. Поток поступает в модель и выходит из нее через отверстия.*

Для решения внутренней задачи все отверстия модели необходимо закрыть крышками, чтобы внутреннее пространство модели было замкнуто. На входах и выходах следует задать соответствующие граничные условия. Крышки представляют собой дополнительные элементы, с помощью которых можно закрыть отверстия. В данном примере крышки для удобства сделаны полупрозрачными.

Убедитесь, что модель полностью замкнута. Для этого выполните **Flow Analysis > Инструменты > Проверка геометрии**. В группе **Тип задачи** выберите **Внутренняя**. Затем, для того, чтобы определить объемы твердого тела и текучей среды, нажмите кнопку **Проверить**. Если объем текучей среды равен нулю, значит модель не замкнута.





Чтобы визуализировать объем, занимаемый текучей средой, нажмите кнопку **Показать объем текучей среды**.

Закройте диалоговое окно **Проверка геометрии**.

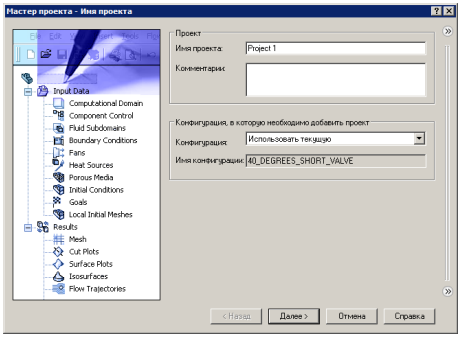
🕮 *Опция **Проверка геометрии** позволяет рассчитать объемы, занимаемые твердыми телами и текучей средой, проверить модель на наличие возможных проблем (т.е. недопустимых контактов) и отобразить области текучей среды и твердого тела в виде отдельных моделей.*

Теперь можно приступать к созданию проекта FloEFD.

Создание проекта FloEFD

1 Кликните **Flow Analysis > Проект> Мастер проекта**. Мастер проекта поможет Вам по шагам создать новый проект FloEFD.

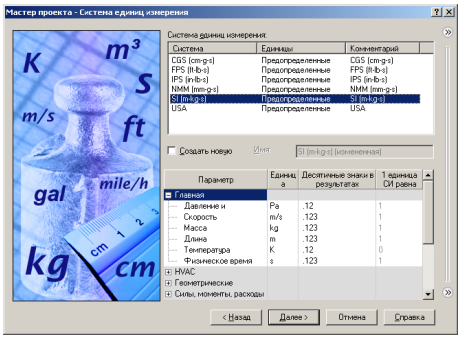
2 В диалоговом окне **Имя проекта** введите имя нового проекта: `Project 1.`



Каждый проект FloEFD связан с экземпляром Creo Elements/Pro & Creo Parametric. Вы можете поставить проект на текущем экземпляре Creo Elements/Pro & Creo Parametric или на новом экземпляре Creo Elements/Pro & Creo Parametric, основанном на текущем.

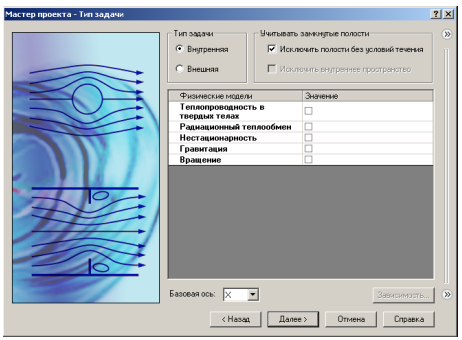
Кликните **Далее**.

3 В диалоговом окне **Система единиц измерения** Вы можете выбрать нужную систему единиц измерения, которая будет использоваться как для входных, так и для выходных данных (результатов).
В данном проекте удобно использовать заданную по умолчанию Международную систему единиц **SI**.



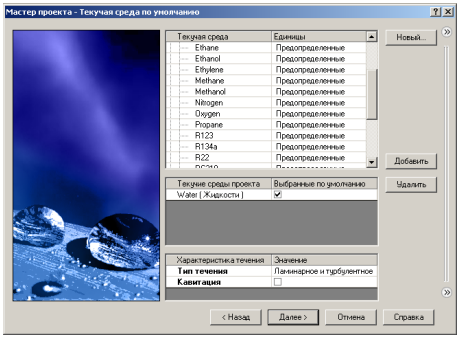
Кликните **Далее**.

4 В диалоговом окне **Тип задачи** необходимо выбрать тип задачи: **Внутренняя** или **Внешняя**.
Для того, чтобы пренебречь внутренними замкнутыми областями, которые не задействованы в данной внутренней задаче, следует выбрать **Исключить полости без условий течения**.
Базовая ось глобальной системы координат (X, Y или Z) используется для того, чтобы данные можно было задать в виде таблиц или формул в цилиндрической системе координат с указанной осью вращения.



В качестве типа задачи выберите **Внутренняя** и, не меняя других настроек, кликните **Далее**.

5 Текучей средой в данном проекте является вода, поэтому из группы **Жидкости** выберите.



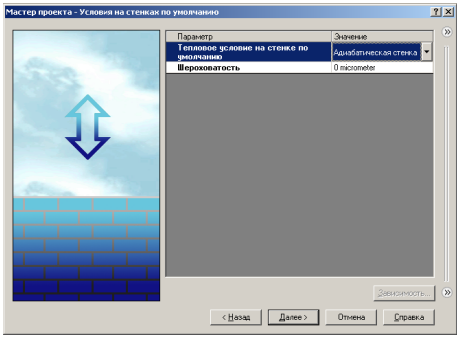
📖 *В* **Инженерной базе данных** *хранятся всевозможные справочные данные и технические характеристики:*

- *характеристики различных газов, жидкостей, материалов, поверхностей радиационного теплообмена, пористых сред и т.д.*
- *кривые вентиляторов (зависимости объемного или массового расхода от перепада давления). Количество представленных промышленных вентиляторов довольно велико;*
- *системы единиц измерения и т.д.*

- *Вы можете выбрать предопределенные элементы или создать свои собственные (вещества, единицы измерения, кривые вентиляторов, а также пользовательские параметры для отображения).*

Кликните **Далее**.

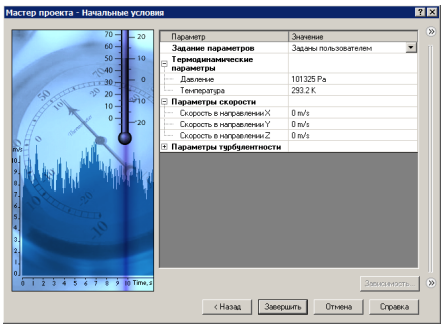
6 В данной задаче нет необходимости рассчитывать теплопроводность в твердых телах, и соответствующая опция не была включена. Поэтому тепловое условие, задаваемое в диалоговом окне **Условия на стенках по умолчанию**, будет относиться ко всем стенкам модели, контактирующим с текучей средой.



В данном проекте корректным является условие **Адиабатическая стенка**, заданное по умолчанию и означающее, что все стенки модели являются теплоизолированными.

Кликните **Далее**.

7 В диалоговом окне **Начальные условия** необходимо задать начальные значения параметров течения. Если внутренняя задача является стационарной, то предпочтительнее задавать значения, близкие предполагаемым. Это позволит уменьшить время, необходимое для достижения сходимости.



🕮 *При решении стационарных задач FloEFD выполняет итерации до тех пор, пока решение не сойдется. Решение нестационарных задач требует ровно столько физического времени, сколько было задано.*

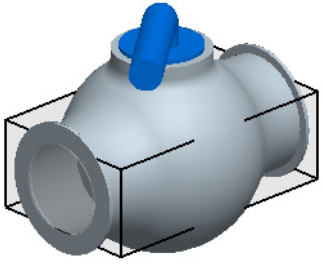
Для данного проекта не будем менять заданные по умолчанию значения.

Кликните **Завершить**.

🕮 *В дереве анализа FloEFD все входные данные и результаты представлены в удобной форме. Вы также можете использовать дерево анализа FloEFD для изменения или удаления каких-либо элементов FloEFD.*

Сразу же после создания проекта в графической окне появляется полупрозрачный параллелепипед, обозначающий границы расчетной области.

🕮 **Расчетная область** *представляет собой параллелепипед, охватывающий область, внутри которой проводятся расчеты течения и теплообмена.*

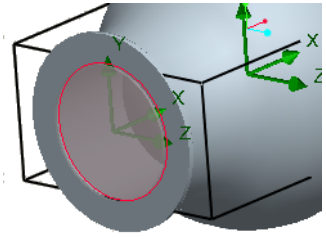


Следующим шагом является задание **Граничных условий**. Граничные условия необходимы для указания параметров течения на входах и выходах (во внутренней задаче) или на поверхностях модели (во внешней задаче).

Задание граничных условий

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**.

2 Выберите внутреннюю поверхность крышки на входе (компонент **Inlet Lid**).



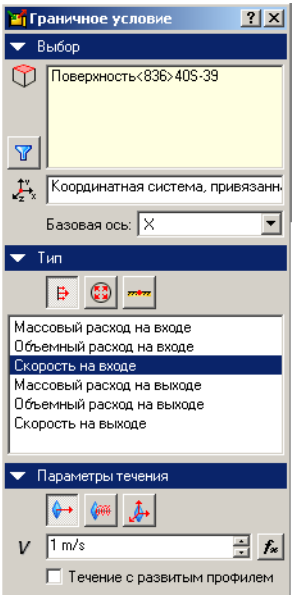
Выделенные поверхности появятся в поле **Поверхности для задания граничного условия** .

3 Из списка **Тип граничного условия** выберите **Скорость на входе**.

4 Нажмите **Скорость по нормали к поверхности** и задайте ее значение равным `1 m/s` (введите только значение, единица измерения появится автоматически).

5 Изменения других параметров не требуется.

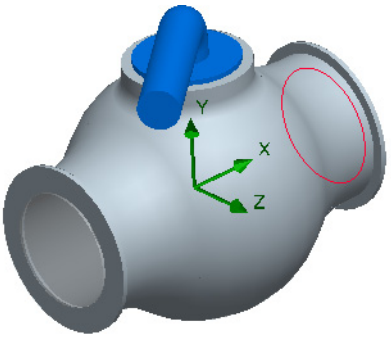
Кликните **OK** .



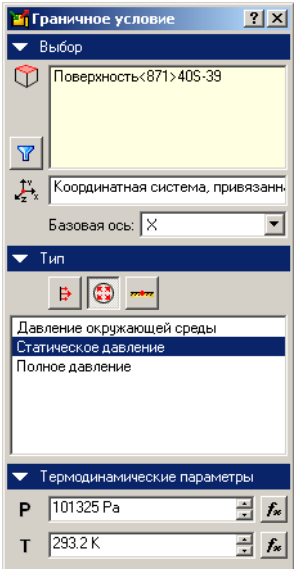
Это означает, что вода поступает в кран со скоростью 1.0 m/s.

1 Выберите внутреннюю поверхность крышки на выходе (компонент **Outlet Lid**).

2 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Граничное условие**. Появится диалоговое окно **Граничное условие**. Выделенная поверхность будет находиться в поле **Поверхности для задания граничного условия** .



🕮 *Перед началом расчета FloEFD проверит, корректно ли заданы граничные условия. Должен соблюдаться баланс массового расхода: полный массовый расход на входе должен быть равен полному массовому расходу на выходе. Если это требование не выполняется, значит граничные условия заданы неверно, и в таком случае расчет не начнется. Обратите внимание, что массовый расход рассчитывается в зависимости от заданных значений скорости или объемного расхода. Для того, чтобы ошибок в задании граничных условий не возникало, рекомендуется хотя бы на одном отверстии задать условие Давления. Тогда массовый расход на этом отверстии определится автоматически так, чтобы выполнялся закон сохранения массы.*



3 Кликните **Давление** и в качестве **Типа граничного условия** выберите **Статическое давление**.

4 Значения **Статического давления** P (101325 Pa), **Температуры** T (293.2 K) и других параметров не требуют изменений.

5 Кликните **OK** .

Это означает, что давление потока воды на выходе из шарового крана составляет 1 atm.

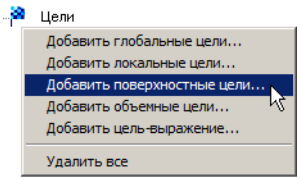
Гидравлические потери определяются следующим образом:

$$\xi = \frac{\Delta P}{\rho V^2/2}$$

где ΔP - разность полных давлений между входом и выходом, ρ - плотность среды, а V - скорость течения. Скорость течения известна (ее значение было задано равным 1 m/s), плотность воды при заданной температуре 293.2 K составляет 998.1934 kg/m^3. Неизвестным остается только значение полного давления на входе и выходе. Самый простой и быстрый способ определить эти параметры - задать соответствующую расчетную цель.

Задание поверхностных целей

1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши кликните по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить поверхностные цели**.



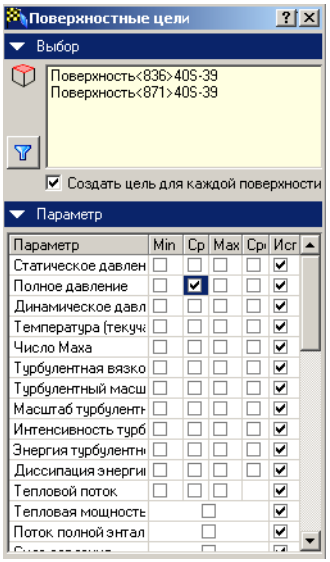
2 Выберите внутренние поверхности крышек на входе и выходе (компоненты **Inlet Lid** и **Oulet Lid**). Для этого, удерживая клавишу **CTRL**, выделите соответствующие граничные условия в дереве анализа FloEFD.

3 Для того, чтобы создать цели на каждой поверхности в отдельности, поставьте галочку **Создать цель на каждой поверхности**.

4 В таблице **Параметр** поставьте галочку **Ср** в поле **Полное давление**.

5 Не снимайте галочку **Исп. для сход.**, чтобы эта цель использовалась для контроля сходимости.

6 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появятся два элемента **ПЦ Ср Полное Давление 1** и **ПЦ Ср Полное Давление 2**.



Теперь проект FloEFD готов к расчету. FloEFD завершит расчет, когда средние значения полного давления на входе и выходе шарового крана станут установившимися.

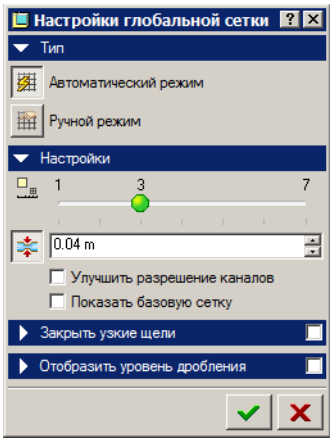
Задание настроек сетки

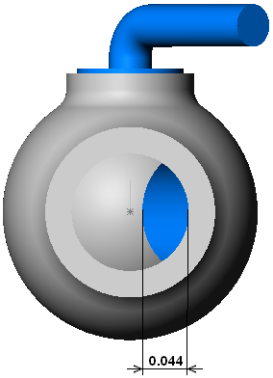
1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

2 По умолчанию выбран **Автоматический режим** .

3 В группе **Настройки** по умолчанию задан **Уровень начальной сетки** .

4 Нажмите кнопку **Минимальный зазор** . В поле **Минимальный зазор** введите значение `0.04 m`.





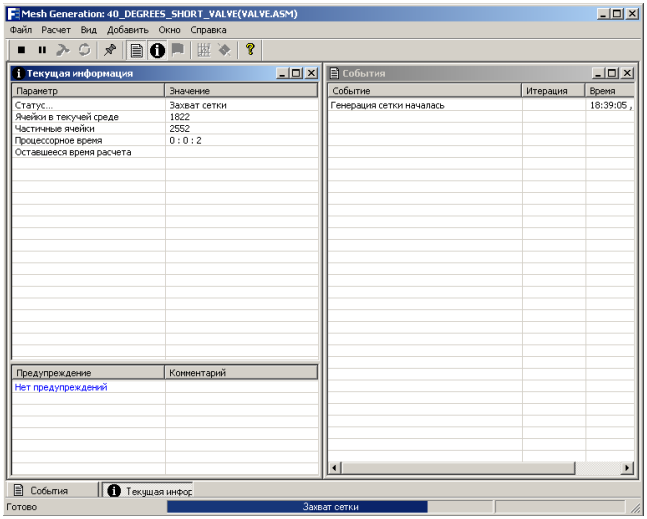
📖 *FloEFD определяет минимальный зазор и минимальную толщину стенки, исходя из геометрических размеров модели, расчетной области, а также размеров поверхностей, на которых задаются условия и цели. Однако этого может быть недостаточно для разрешения узких зазоров и тонких стенок. В таких случаях необходимо вручную задать Минимальный зазор и Минимальную толщину стенки.*

5 Кликните **OK** .

Запуск на расчет

1 Кликните **Flow Analysis > Расчет> Запустить**. Появится диалоговое окно **Запустить**.

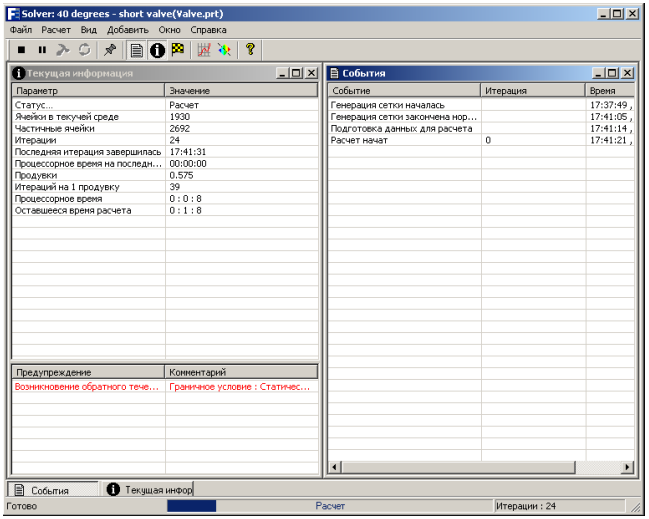
2 Для того, чтобы начать расчет, нажмите кнопку **Запустить**.



FloEFD автоматически сгенерирует расчетную сетку. Вся расчетная область будет разбита на части, которые в дальнейшем будут подразделяться на ячейки. Если возникнет необходимость, ячейки будут дробиться и далее для более подробного разрешения геометрии модели. Вы можете наблюдать за этим процессом в диалоговом окне **Генерация сетки**.

Наблюдение за расчетом

Вся информация о ходе расчета доступна в **Окне монитора**. Вы можете отслеживать изменения целей, а также просматривать предварительные результаты.
На нижней панели окна **Текущая информация** выводятся сообщения? предупреждающие об ошибках, которые могут привести к неверным результатам. В ходе расчета данной задачи появляется сообщение



“**Возникновение обратного течения на границе**”. Оно предупреждает, что на том отверстии, где было задано граничное условие давления, помимо вытекающего

потока, образуется обратное течение. В данной задаче обратное течение проникает и во входящий, и в выходящий потоки. Когда образуется обратное течение, точность получаемых результатов снижается. Более того, в некоторых случаях сходимость целей может быть вообще не достигнута (т.е. значение цели не станет установившимся). В любом случае, когда на границе возникает обратное течение, точность результатов гарантировать нельзя. Если предупреждение не исчезает, следует остановить расчет. Затем необходимо увеличить длину трубы на выходе шарового крана так, чтобы на границе не возникало обратного течения. Также целесообразно увеличить длину трубы на входе шарового крана. т.к. это позволит избежать распространения возмущения потока от препятствия ко входу.

Т.к. предупреждающее сообщение продолжает существовать, кликните **Файл> Закрыть** для того, чтобы остановить расчет выйдите из **Окна монитора**.

Вы можете просто увеличить длину труб, подходящих к крану и отходящих от него, изменив расстояния смещения плоскостей **DTM3** и **DTM4** на входе и выходе соответственно. Также можно склонировать проект в предварительно созданный экземпляр **40_DEGREES_LONG_VALVE**.

Клонирование проекта

1 Кликните **Flow Analysis > Проект > Клонировать проект**.

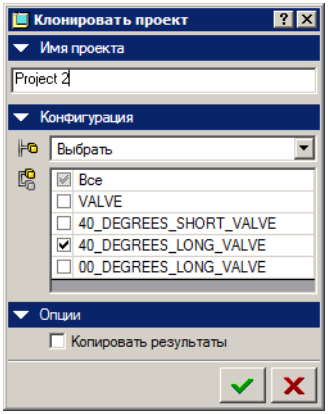
2 В поле **Имя проекта** введите `Project 2.`

3 В списке **Конфигурация, в которую необходимо добавить проект** выберите **Выбрать**.

4 В списке **Конфигурации** выберите **40 degrees - long valve40_DEGREES_LONG_VALVE**.

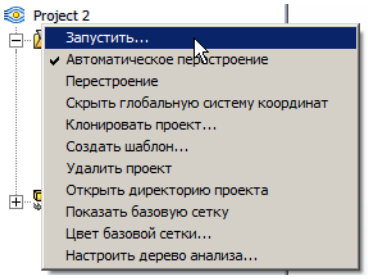
5 Кликните **OK**.

6 Появятся два предупреждающих сообщения FloEFD о том, что модель была изменена. В каждом из них нажмите **Да**.



Новый проект FloEFD, соответствующий Экземпляру**40_DEGREES_LONG_VALVE,** имеет такие же настройки, как и предыдущий **40_DEGREES_SHORT_VALVE**, поэтому Вы сразу же можете приступить к расчету.

В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по имени проекта **Project 2** и из контекстного меню выберите **Запустить**. Затем, чтобы начать расчет, нажмите кнопку **Запустить**.

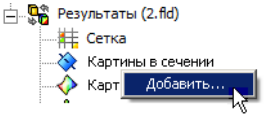


После завершения расчета закройте **Окно монитора**.

Теперь исследуем обратное течение, обнаруженное FloEFD в процессе расчета, а также рассчитаем потери полного давления в кране.

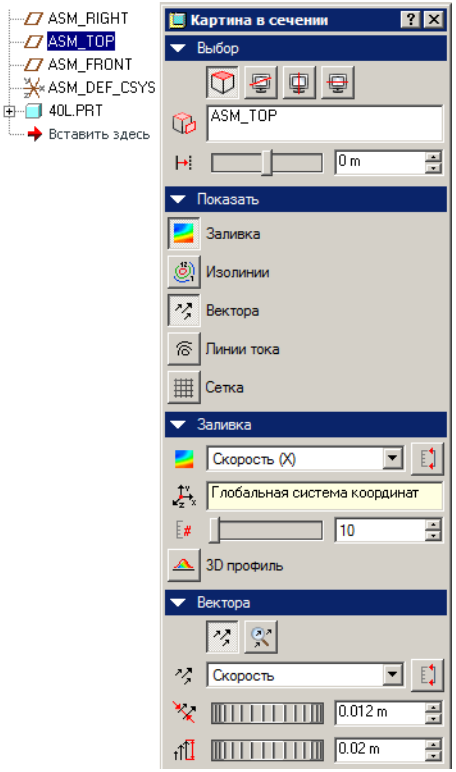
Просмотр картин в сечении

1 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картины в сечении** и из контекстного меню выберите **Добавить**. Появится диалоговое окно **Картина в сечении**.



📖 **Картина в сечении** *позволяет отобразить на плоскости распределение какого-либо параметра. В качестве плоскости отображения можно использовать плоскости или плоские поверхности модели (с дополнительным смещением, если необходимо). Распределение значений параметров может быть представлено в виде заливки, изолиний, векторов или их сочетанием (например, векторов поверх заливки).*

2 В дереве модели выберите плоскость **ASM_TOP**. Эта плоскость появится в поле **Выделите плоскость или плоскую поверхность** .



3 В диалоговом окне **Картина в сечении** в дополнение к **Заливке** выберите **Вектора** .

4 В качестве отображаемого параметра в группе **Заливка** выберите **Скорость (X)**.

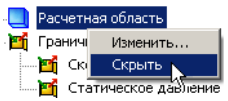
5 В группе **Вектора** значение **Расстояние** задайте равным 0.012 m, а **Размер стрелок** - 0.02 m.

6 В диалоговом окне **Картина в сечении** кликните **OK** .

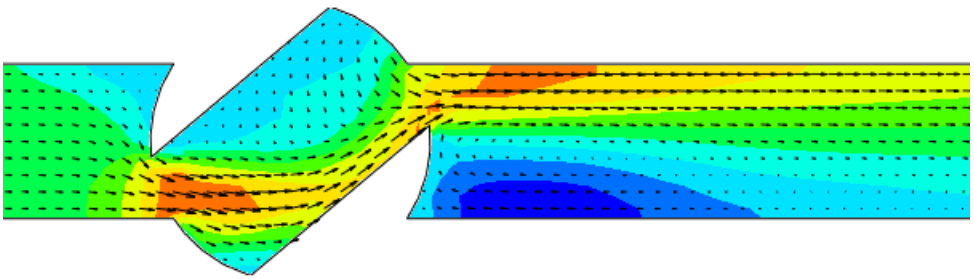
В дереве анализа FloEFD появится новый элемент **Картина в сечении 1**.

Чтобы рассмотреть получившуюся картину, необходимо сделать модель полупрозрачной. Для этого кликните **Flow Analysis > Результаты > Показать > Геометрия**.

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Расчетная область** и из контекстного меню выберите **Скрыть**.

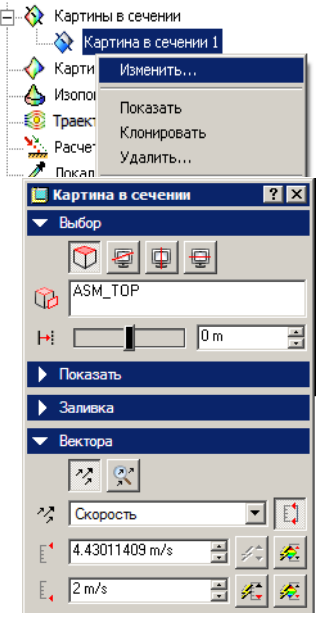


Вы увидите картину распределения скорости и вектора скорости.



Для лучшей визуализации обратного течения можно изменить масштаб:

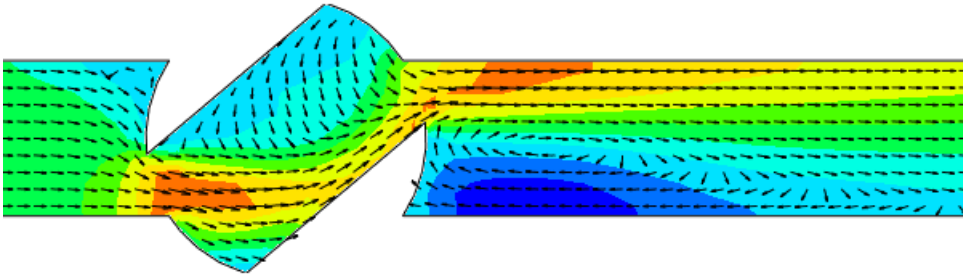
1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картина в сечении 1** и из контекстного меню выберите **Изменить**.



2 В группе **Вектора** нажмите **Корректировать минимум и максимум** и для **Минимума** задайте значение `2 m/s`.

*При изменении значения **Минимума** меняется диапазон длин векторов. Таким образом можно отобразить вектора, длина которых меньше первоначально заданного значения **Минимума**. Это позволит более подробно визуализировать области с низкой скоростью.*

3 Кликните **OK**, чтобы сохранить изменения и выйти из диалогового окна **Картина в сечении**. Картина в сечении сразу же обновится.



Чтобы визуализировать обратное течение, x-компоненту скорости необходимо отобразить на двухцветной палитре. Для цветов следует задать значения, симметричные относительно нуля.

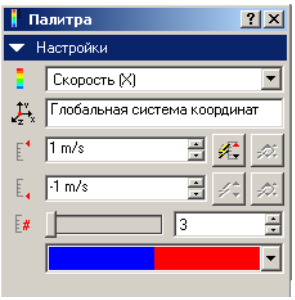
1 В геометрической области дважды кликните по палитре. Вы также можете кликнуть по ней правой клавишей мыши и из контекстного меню выбрать **Изменить**.

2 В группе **Настройки** с помощью ползунка установите **Количество уровней** равным **3**.

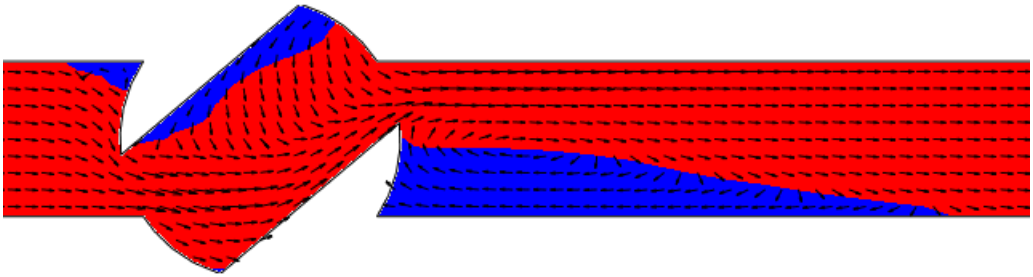
3 В поле **Максимум** введите `1`.

4 В поле **Минимум** введите `-1`.

5 Кликните **OK**.



Теперь распределение параметра **Скорость (X)** показано в красно-синей палитре. Красный цвет означает положительные значения скорости, синий- отрицательные. Таким образом, области синего цвета - это зона обратного течения.

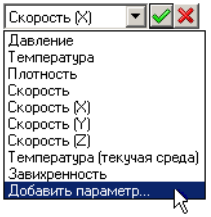


Теперь отобразим распределение полного давления в кране.

Настройка списка параметров

Полное давление по умолчанию не включено в список параметров, доступных для отображения. Чтобы сделать какой-либо параметр доступным или недоступным для отображения, следует воспользоваться опцией **Настроить список параметров**.

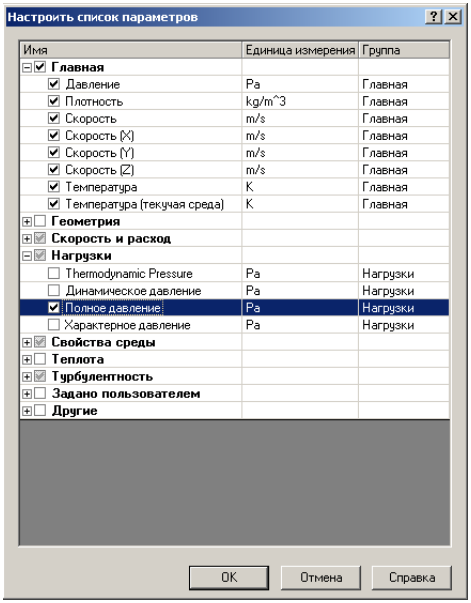
1 На палитре кликните в поле с именем отображаемого параметра и из списка выберите **Добавить параметр**.



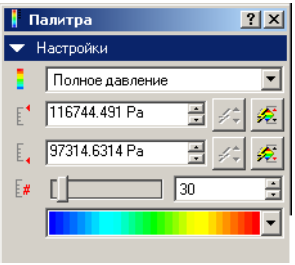
2 В открывшемся диалоговом окне **Настроить список параметров** раскройте группу **Нагрузки** и поставьте галочку **Полное давление**.

3 Кликните **OK**, чтобы сохранить изменения.

4 В геометрической области дважды кликните по палитре. В открывшемся диалоговом окне в качестве параметра выберите **Полное давление**.

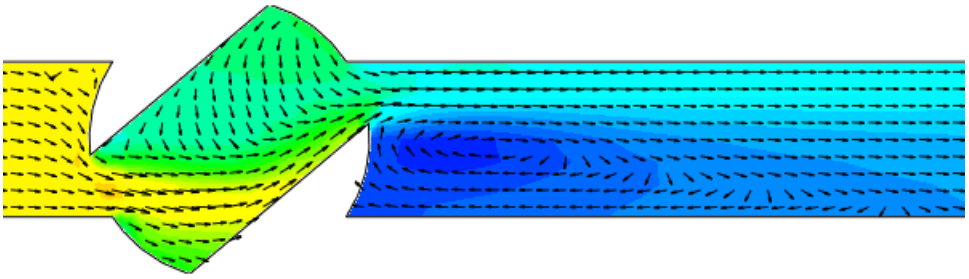


5 В группе **Настройки** с помощью ползунка установите значение **Количества уровней** равным 30.



6 Кликните **OK** , чтобы сохранить изменения и выйти из диалогового окна **Палитра**.

Картина обновится, и Вы увидите распределение полного давления в заданной плоскости крана.

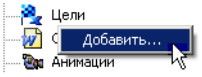


Итак, картина течения в кране была исследована. Теперь с помощью целей необходимо определить значения полного давления на входе и выходе, и следовательно, рассчитать гидравлические потери.

Просмотр целей

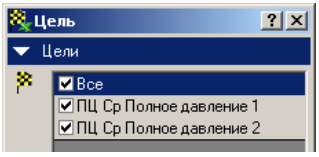
🕮 *Постпроцессорный элемент* **Цели** *позволяет изучить, как значение цели менялось в процессе расчета. FloEFD выводит данные о цели в документ Excel, который создается автоматически. Данные о каждой цели отображаются на отдельном листе. Установившиеся значения цели выводятся на лист* **Сводный отчет**.

1 В дереве анализа FloEFD в группе **Результаты** правой кнопкой мыши кликните по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить**. Появится диалоговое окно **Цель**.



2 Выберите **Все**.

3 Кликните **OK** . Будет создан документ Excel **Цели1**.



С помощью этого документа можно исследовать, как значение цели менялось в процессе расчета. На листе **Сводный отчет** представлены значения полного давления.

VALVE.ASM [40_DEGREES_LONG_VALVE]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Процесс сходимости [%]	Использовать в сходимости
ПЦ Ср Полное Давление 1	[Pa]	115177,1813	115186,177	115172,0662	115203,3627	100	Да
ПЦ Ср Полное Давление 2	[Pa]	101841,635	101842,1902	101841,635	101844,0757	100	Да

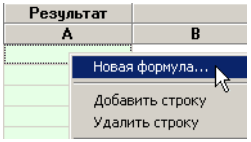
Значение гидравлических потерь можно было бы рассчитать с помощью Цели-выражения, задав в качестве выражения разность между давлением на входе и выходе. Но для того, чтобы продемонстрировать широкие возможности FloEFD, рассчитаем гидравлические потери другим способом - с помощью газодинамического **Калькулятора**.

🕮 **Калькулятор** *содержит различные гидродинамические формулы, которые могут быть использованы в инженерных расчетах. Калькулятор является удобным инструментом для приблизительной оценки результатов, а также для расчета различных важных характеристик и характерных величин. Все расчеты в Калькуляторе по умолчанию проводятся в Международной системе единиц* **SI**. *Все введенные значения преобразуются в соответствии с этой системой единиц. Единицы измерения, заданные пользователем в проекте FloEFD, в Калькуляторе не действуют.*

Работа с калькулятором

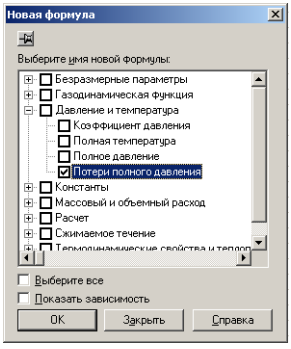
1 Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Калькулятор**.

2 В таблице **Калькулятора** правой кнопкой мыши кликните в ячейке `A1` и из контекстного меню выберите **Новая формула**. Появится диалоговое окно **Новая формула**.



3 В дереве **Выберите имя новой формулы** раскройте группу **Давление и температура** и поставьте галочку **Потери полного давления**.

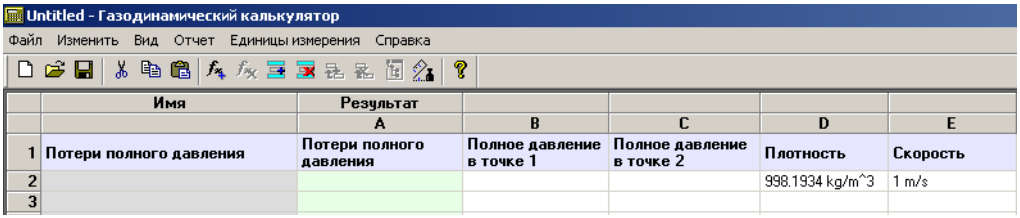
4 Кликните **OK**. В таблице **Калькулятора** появятся элементы, необходимые для расчета потерь полного давления.



В столбце **Результат** (столбец **A**) находится название формулы, в следующих столбцах (**B**, **C** и т.д.) - элементы формулы (переменные и константы). Вы можете ввести значения этих элементов в соответствующие ячейки в системе единиц SI или скопировать их из таблицы **Целей**, построенной в Excel.

1 Задайте значения, как показано ниже:

Плотность = 998.1934 (плотность воды при температуре 293.2 K),
Скорость = 1.



	Имя	Результат				
		A	B	C	D	E
1	Потери полного давления	Потери полного давления	Полное давление в точке 1	Полное давление в точке 2	Плотность	Скорость
2					998.1934 kg/m^3	1 m/s
3						

2 Откройте документ Excel **Цели1** и скопируйте **Значение** цели **ПЦ Ср Полное Давление 1** в буфер обмена.

3 Переключитесь в **Калькулятор**, кликните в ячейку **B2** и нажмите **Ctrl+V**, чтобы вставить скопированное значение.

4 Вернитесь в Excel, скопируйте **Значение** цели **ПЦ Ср Полное Давление 2**. Переключитесь в **Калькулятор**, кликните в ячейку **C2** и нажмите **Ctrl+V**. Кликните в любую пустую ячейку. В ячейке **Результат** сразу же появится значение **Потерь полного давления**.

Потери полного давления	Потери полного давления	Полное давление в точке 1	Полное давление в точке 2	Плотность	Скорость
	26,71936	115177,2 Pa	101841,6 Pa	998.1934 kg/m^3	1 m/s

5 Кликните **Файл > Сохранить**.

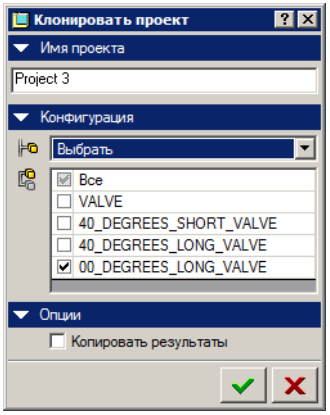
6 В диалоговом окне **Сохранить как** перейдите в папку, в которой находится используемая в этом примере модель шарового крана, введите имя файла `ball valve` и кликните **Сохранить**.

7 Кликните **Файл > Выход**, чтобы выйти из **Калькулятора**.

Чтобы рассчитать величину местных потерь, необходимо из полученного значения потерь полного давления вычесть потери на трение в прямой трубе такой же длины и диаметра. Для этого необходимо провести такие же расчеты в модели шарового крана при угле его поворота 0^o. Нужная конфигурация уже существует - **00_DEGREES_LONG_VALVE**.

Условия в экземплярах **40_DEGREES_LONG_VALVE** и **00_DEGREES_LONG_VALVE** должны быть одинаковы, поэтому необходимо просто скопировать уже существующий проект FloEFD в экземпляр **00_DEGREES_LONG_VALVE**.

Склонируйте текущий проект в экземпляр **00_DEGREES_LONG_VALVE**.



Когда угол поворота крана равен нулю, течение воды осуществляется просто через прямую трубу. Поэтому нет необходимости делать **Минимальный зазор** меньше значения, определенного автоматически (исходя из геометрических размеров поверхностей модели, на которых заданы граничные условия). Обратите внимание, что задание меньшего значения зазора приведет к построению более подробной сетки, и, следовательно, для расчета потребуется больше процессорного времени и памяти. Чтобы решить задачу наиболее эффективным способом, рекомендуется задать оптимальные настройки.

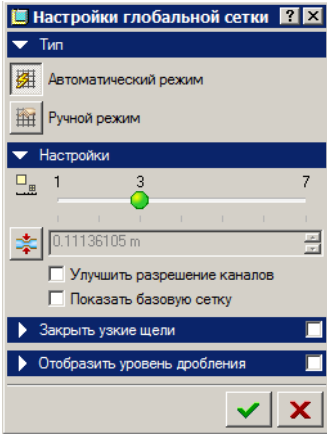
Изменение настроек сетки

Убедитесь в том, что активным является проект **Project 3**.

1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

2 Нажмите кнопку **Минимальный зазор** , чтобы отменить заданное вручную значение.

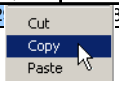
3 Кликните **OK** .



Кликните **Flow Analysis > Расчет> Запустить**. Для того, чтобы начать расчет, нажмите кнопку **Запустить**.

После окончания расчета создайте **Цель**. Будет создан новый документ Excel **Цели2**. Перейдите в Excel, затем выберите обе ячейки в столбце **Значение** и скопируйте их в буфер обмена.

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение
ПЦ Ср Полное Давление 1	[Pa]	102028,2609	102039,6075	102024,2042
ПЦ Ср Полное Давление 2	[Pa]	10182	328,9696	101827,9773



Теперь можно рассчитать потери полного давления в прямой трубе.

1 Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Калькулятор**.

2 В меню **Калькулятора** кликните **Файл > Открыть**. Перейдите в папку, куда Вы ранее уже сохраняли файл калькулятора для этого примера, и выберите этот файл **ball valve.fwc**. Кликните **Открыть**.

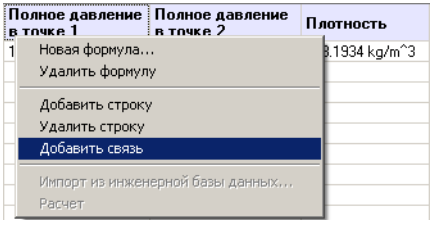
3 Кликните в ячейку **B4** и на панели инструментов калькулятора нажмите кнопку , чтобы вставить данные из буфера.

4 Сохраните существующее значение потерь полного давления: кликните в ячейку **A2**, нажмите кнопку , затем кликните в ячейку **A7** и нажмите кнопку .

5 Дважды кликните в ячейку **Имя7** и введите `40 градусов`.

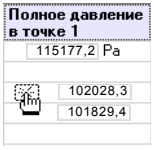
Потери полного давления	Потери полного давления	Полное давление в точке 1
	26,71936	115177,2 Pa
		102028,3
		101829,4
40 градусов	26,71936	

6 Правой кнопкой мыши кликните в ячейке **Полное давление в точке 1** и из контекстного меню выберите **Добавить связь**. Появится указатель .

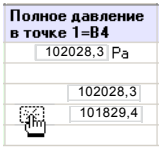


7 Кликните в ячейке **B4**. Теперь значение полного давления будет извлекаться из ячейки **B4**.

8 Правой кнопкой мыши кликните в ячейке **Полное давление в точке 2** и из контекстного меню выберите **Добавить связь**.



9 Кликните в ячейке **B5**. Теперь значение полного давления будет извлекаться из ячейки **B5**. Сразу же будут рассчитаны потери полного давления.



Теперь можно определить местные потери в шаровом кране при угле поворота 40^{o}.

Потери полного давления (40 градусов)	Потери полного давления (0 градусов)	Местные потери давления
26,72	0,40	26,32

B2

Коэффициент сопротивления цилиндра

Постановка задачи

FloEFD позволяет исследовать процессы обтекания различных тел и определять силы, возникающие вследствие взаимодействия тел с потоком (подъемную силу и силу сопротивления). В качестве примера рассмотрим обтекание цилиндра равномерным потоком и определим его гидравлический коэффициент сопротивления. Ось вращения цилиндра направлена перпендикулярно потоку.

Расчеты проводятся при различных числах Рейнольдса: 1, 1000 и 10^5. Для числа Рейнольдса справедлива следующая формула: $\mathrm{Re}= \frac{\rho UD}{\mu}$, где D - диаметр цилиндра, U - скорость потока, ρ - плотность, μ - динамическая вязкость. Коэффициент сопротивления цилиндра определяется следующим образом:

$$C_D= \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 DL}$$

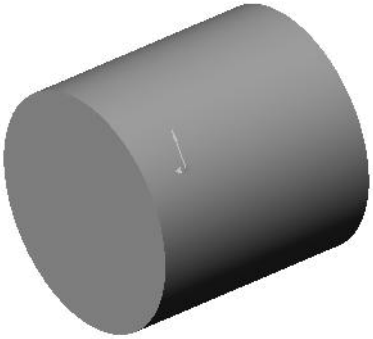
где F_D - сила сопротивления, D диаметр цилиндра, L - длина цилиндра. Цель данного моделирования - определить коэффициент сопротивления цилиндра с помощью FloEFD и сравнить полученное значение с экспериментальным **[1]**.

Открытие модели

Скопируйте папку **B2 - Drag Coefficient** в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные. Запустите FloEFD. Кликните **Файл > Открыть**. В диалоговом окне **Открыть файл** перейдите к сборке **cylinder_001m.asm**, расположенной в папке **B2 - Drag Coefficient\cylinder 0.01m**, и кликните **Открыть**.

🕮 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку cylinder_001m.asm, расположенную в папке **B2 - Drag Coefficient\cylinder 0.01m\Ready To Run**, или сборку cylinder_001m.asm, расположенную в папке **B2 - Drag Coefficient\cylinder 1m\Ready To Run**, и запустить на расчет нужные проекты.*

Рассматриваемая в данном примере задача является **внешней** задачей FloEFD.



🕮 *Внешняя задача - это задача обтекания каких-либо тел (самолетов, автомобилей, зданий и т.д). В таких задачах границами расчетной области являются внешние границы - плоскости расчетной сетки, параллельные координатным плоскостям и полностью лежащие в области текучей среды. Внешние границы могут пересекать стенки модели. FloEFD позволяет также решать задачи, в которых одновременно присутствует как внешнее, так и внутреннее течение (например, обтекание здания потоком воздуха и воздухообмен внутри него). В этом случае следует задавать Внешний тип течения.*

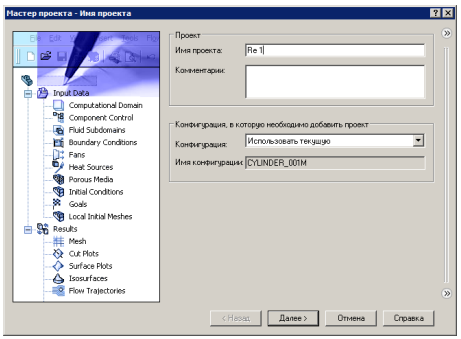
Сначала необходимо создать проект FloEFD.

Создание проекта FloEFD

1 Кликните **Flow Analysis > Проект > Мастер проекта**. Мастер проекта поможет Вам пошагово создать новый проект FloEFD. В первом случае примем число Рейнольдса равным1.

2 В диалоговом окне **Имя проекта** введите имя нового проекта: Re 1.

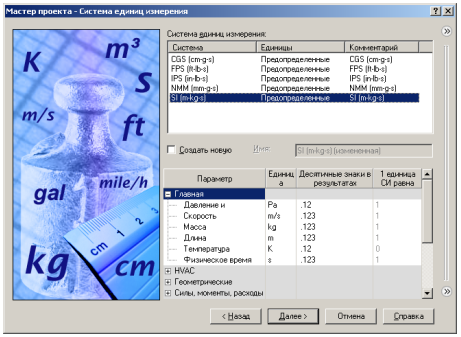
Кликните **Далее**.



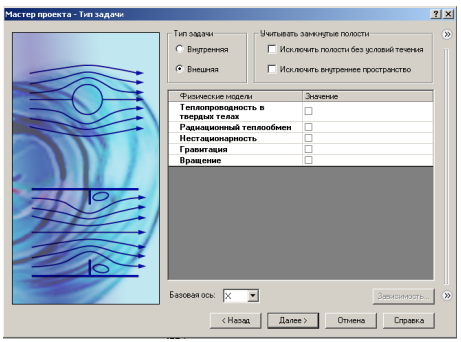
3 В диалоговом окне **Система единиц измерения** необходимо выбрать систему единиц, которая будет использоваться как для входных, так и для выходных данных (результатов).

В данном проекте удобно использовать заданную по умолчанию Международную систему единиц **SI**.

Кликните **Далее**.



4 В диалоговом окне **Тип задачи** выберите **Внешняя**. Также здесь можно указать физические модели, которые будут включены в проект. В данном случае физические модели задавать не будем.



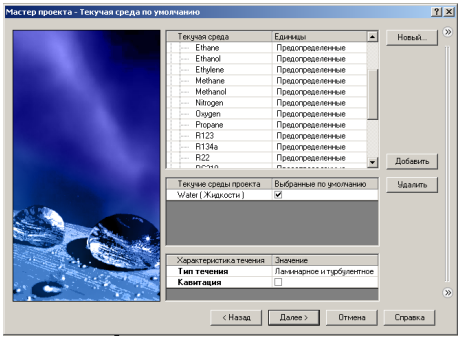
📖 *Чтобы пренебречь отдельными замкнутыми областями внутри тела, следует включить опцию **Исключить внутреннее пространство**. Однако в рассматриваемом цилиндре такие области отсутствуют. **Базовая ось глобальной системы координат** (X, Y или Z) используется для того, чтобы данные можно было задать в виде таблиц или*

формул в цилиндрической системе координат с указанной осью вращения.

🕮 *При числе Рейнольдса Re < 40 обтекание цилиндра является стационарным, при Re > 40 - нестационарным. В рассматриваемом случае при Re=1 задача считается стационарной.*

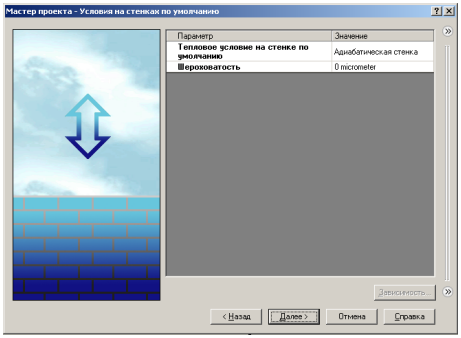
Кликните **Далее**.

5 В данной задаче исследуется течение воды, поэтому в качестве текучей среды из списка **Жидкости** выберите **Water**.



Кликните **Далее**.

6 Тепловое условие, задаваемое в диалоговом окне **Условия на стенках по умолчанию**, будет относиться ко всем стенкам модели, контактирующим с текучей средой.

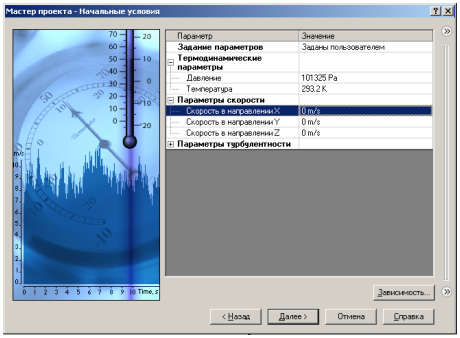


В данном проекте будем использовать заданное по умолчанию условие **Адиабатическая стенка**. Оно означает, что все стенки модели являются теплоизолированными. Значение **Шероховатости** стенок по умолчанию равно 0, т.е. стенка считается гладкой. Это значение менять не требуется.

Кликните **Далее**.

🕮 *В нестационарных Внешних задачах (в рассматриваемом примере при Re= 1000 и Re=10^5) в диалоговом окне Начальные и внешние условия необходимо задать параметры невозмущенного потока. Таким образом будут определены начальные условия внутри Расчетной области и условия на границах Расчетной области. Внешними условиями являются термодинамические параметры (статическое давление и температура), скорость и параметры турбулентности.*
В данном проекте используем термодинамические параметры, заданные по умолчанию (давление 101325 Па и температура 293,2 К). Необходимо только задать скорость входящего потока (в данном случае X-компоненту) в соответствии с числом Рейнольдса:

Чтобы задать скорость потока в этом случае, необходимо открыть диалоговое окно **Зависимость**.



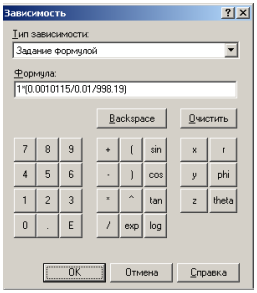
7 Кликните в поле **Скорость в направлении X**. Кнопка **Зависимость** станет активной.

8 Нажмите кнопку **Зависимость**. Появится диалоговое окно **Зависимость**.

📖 *В диалоговом окне* **Зависимость** *данные можно задавать различными способами: в виде констант, формул или функций от x, y, z, θ, φ, радиуса r и времени t (только для нестационарных задач). Радиусом r является расстояние от какой-либо точки до* ***Базовой оси****, выбранной в соответствии с системой координат (в* **Мастере проекта** *и в диалоговом окне* **Общие настройки** *это* ***Глобальная система координат****). θ и φ – полярный и азимутальный углы сферической системы координат. Таким образом, с помощью координат r, θ, и φ данные можно задавать как в цилиндрической, так и в сферической системах.*

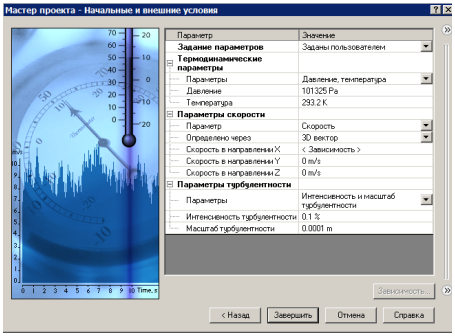
9 Из списка **Тип зависимости** выберите **Задание формулой**.

10 В поле **Формула** введите выражение для скорости потока при определенном числе Рейнольдса: `1*(0.0010115/0.01/998.19)`. Здесь:



1 – число Рейнольдса (Re)
0.0010115 (Pa*s) - динамическая вязкость (μ) при заданной температуре 293.2 K
0.01 (m) - диаметр цилиндра (D)
998.19 (kg/m^3)- плотность воды (ρ) при заданной температуре 293.2 K

11 Кликните **OK**. Вы вернетесь в диалоговое окно **Начальные и внешние условия**.



В большинстве случаев сложно заранее оценить интенсивность турбулентности течения. Поэтому рекомендуется использовать параметры турбулентности, заданные по умолчанию. Для внешних задач интенсивность турбулентности по умолчанию задана равной 0.1%, для внутренних - 2%. Как правило, эти значения являются подходящими. В данном проекте примем значение 0.1%.

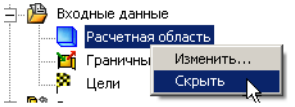
Кликните **Завершить**.

Чтобы уменьшить процессорное время и необходимую для расчета память, решим двумерную задачу (без учета трехмерных эффектов).

Задание 2D моделирования

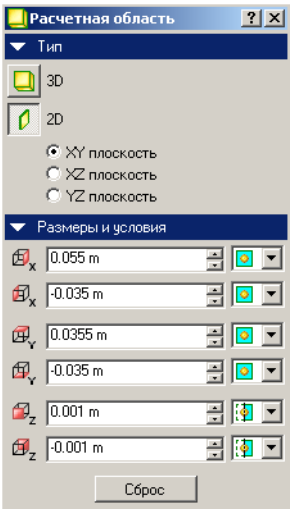
1 В дереве анализа FloEFD раскройте группу **Входные данные**.

2 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Расчетная область** и из контекстного меню выберите **Изменить**.



3 В группе **Тип** нажмите кнопку **2D** и выберите плоскость **XY плоскость** (т.к. ось цилиндра - Z).

4 В группе **Размеры и условия** для границ Расчетной области **Z min** и **Z max** автоматически будет задано условие **Симметрия**.

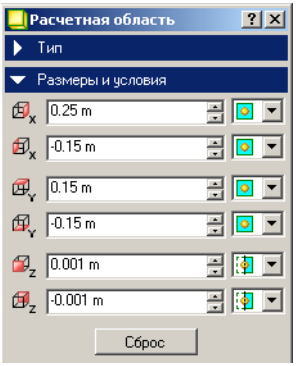


Границы **Z min** и **Z max** устанавливаются автоматически в зависимости от размеров модели.

Таким образом, длина цилиндра L, необходимая для расчета коэффициента сопротивления (C_D), равна $L = Z\ max - Z\ min = 0.002\ m$.

🕮 *В большинстве случаев, для того, чтобы исследовать обтекание тела и определить, как на этот процесс влияют конструктивные изменения, рекомендуется использовать **Расчетную область**, сгенерированную FloEFD автоматически. Однако в данном случае результаты, полученные с помощью FloEFD, будут сравниваться с точными экспериментальными данными. Границы **Расчетной области** расположены близко к цилиндру, из-за чего могут возникать возмущения входящего потока. Это может повлиять на получаемые результаты. Поэтому границы расчетной области необходимо установить на более отдаленном расстоянии от цилиндра. Увеличение размеров **Расчетной области** позволит снизить требуемые для расчета ресурсы компьютера.*

5 В группе **Размеры и условия** задайте координаты X и Y границ Расчетной области так, как показано на рисунке справа.



6 Кликните **OK** .

Т.к. входящий поток направлен вдоль оси X, коэффициент сопротивления цилиндра рассчитывается, исходя из X-компоненты силы сопротивления.

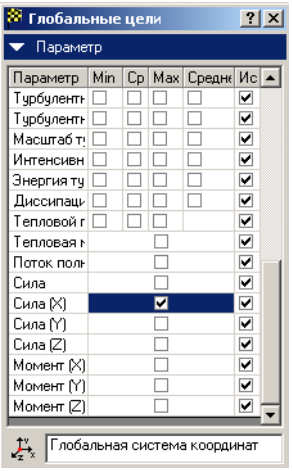
X-компонента силы сопротивления может быть рассчитана с помощью соответствующей цели FloEFD. В данном примере в качестве **Глобальной цели** необходимо задать параметр **Сила (X)**. Это гарантирует, что расчет не завершится до тех пор, пока не будет достигнута полная сходимость цели по параметру **Сила (X)** во всей расчетной области.

Задание глобальной цели

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > глобальные цели**.

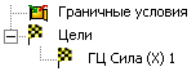
2 В таблице **Параметр** поставьте галочку напротив параметра **Сила (X)**.

3 Не снимайте галочку **Исп. для сход.**, чтобы эта цель использовалась для контроля сходимости.



🕮 *При выборе x, y, z-компонент силы (или момента) Вы можете выбрать Координатную систему, в которой будут рассчитываться эти цели. В данной задаче удобно использовать заданную по умолчанию Глобальную систему координат.*

4 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится элемент **ГЦ Сила (X) 1**.



Задание цели-выражения

Когда расчет завершится, Вы сможете вручную рассчитать коэффициент сопротивления цилиндра исходя из полученного значения силы. Если же Вы зададите **Цель-выражение**, это значение будет автоматически рассчитано FloEFD.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Цель-выражение**.

2 На панели в нижней части экрана нажмите кнопку **Добавить цель** .

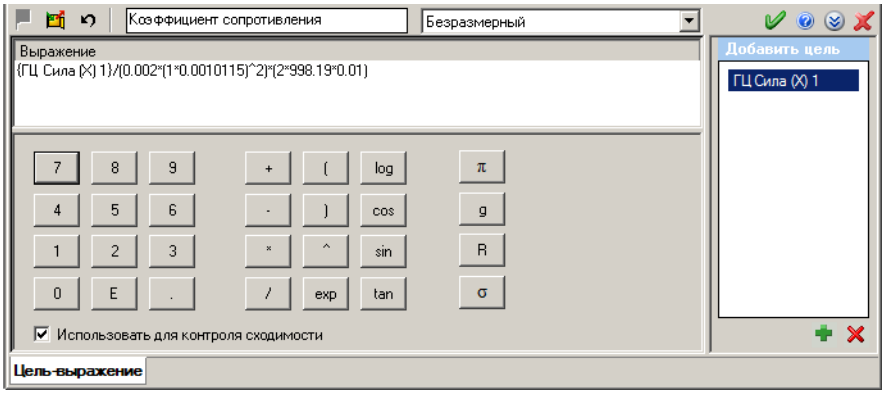
3 Из списка **Добавить цель** выберите цель `ГЦ Сила (X) 1` и кликните **Добавить** . Выбранная цель появится в поле **Выражение**.

4 Введите остальные члены выражения, используя кнопки калькулятора или клавиатуру:

`{ГЦ Сила (X) 1}/(0.002*(1*0.0010115)^2)*(2*998.19*0.01).`

5 Из списка **Размерность** выберите **Безразмерный**.

6 В поле **Имя цели** введите `Коэффициент сопротивления`.



7 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится новая цель-выражение.

Чтобы сравнить результаты, полученные с помощью FloEFD, с экспериментальной кривой **[1]**, также проведем расчеты при числах Рейнольдса 10^3 и 10^5. Для расчета при числе Рейнольдса 10^3 будет использоваться та же модель **cylinder_001m.asm**, что и для предыдущего расчета при Re = 1. Для расчета при числе Рейнольдса 10^5 будет использоваться модель **cylinder_001m.asm**.

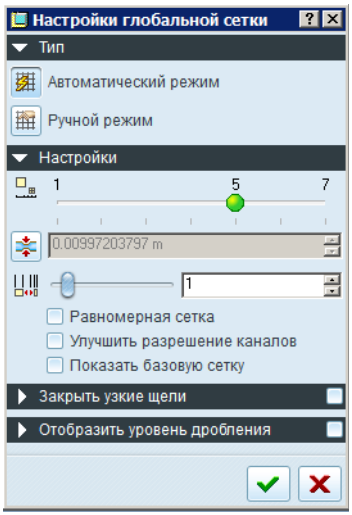
Задание настроек глобальной сетки

1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

2 По умолчанию выбран **Автоматический режим** .

3 В группе **Настройки** задайте **Уровень начальной сетки** равным 5 и оставьте заданные по умолчанию **Минимальный зазор** и **Коэффициент разбега до границ расчетной области**.

Кликните **OK** .



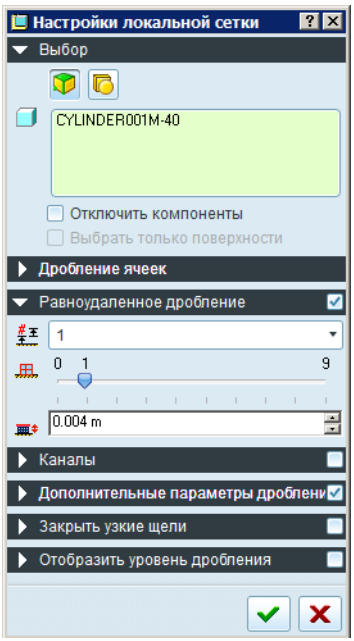
Задание настроек локальной сетки

Для того, чтобы подробно разрешить локальную область вблизи цилиндра, зададим настройки **Локальной сетки**.

1 Кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка** и из контекстного меню выберите **Добавить локальную сетку**.

2 В графической области выберите боковую поверхность цилиндра.

Поставьте галочку **Равноудаленное дробление** и в этой группе задайте **Число оболочек** = 1, **Максимальный уровень равноудаленного дробления** = 1 и **Отступ 1** = 0.004 m.



Адаптирование сетки в процессе расчета

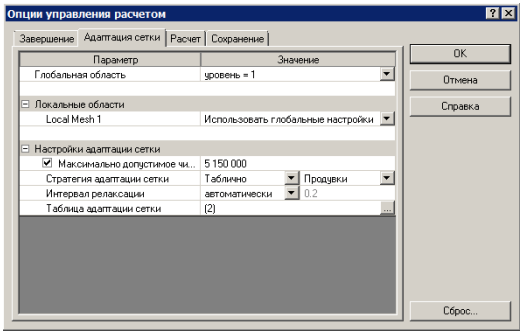
Уровень начальной сетки был задан равным 5, но этого значения недостаточно для точного разрешения вихревой дорожки позади цилиндра. Для того, чтобы улучшить качество решения в этой области, следует произвести адаптирование сетки в процессе расчета.

1 Кликните **Flow Analysis > Опции управления расчетом**.

2 Перейдите на вкладку **Адаптация сетки**.

3 В группе **Глобальная область** выберите **уровень = 1**.

4 Раскройте группу **Настройки адаптации сетки** и убедитесь, что в качестве **Стратегии адаптации сетки** выбрано **Таблично**.



5 Перед тем, как отредактировать таблицу адаптаций сетки, убедитесь, что в качестве **Единиц измерения** выбраны **Продувки**. Затем нажмите кнопку ... в поле **Таблица адаптаций сетки**.

6 В появившемся окне кликните **Добавить строку**. Появится пустая строка.

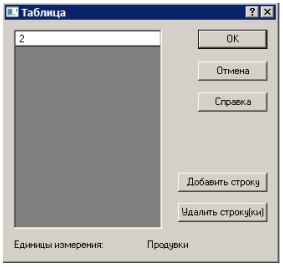
7 Введите в эту строку значение 2. Это означает, что дробление сетки в процессе расчета произойдет, когда число продувок достигнет 2.

8 Кликните **OK**. Перейдите на вкладку **Завершение**.

9 Убедитесь, что в группе **Условия завершения** включено условие **Адаптации сетки**.

10 Выключите условие **Продувки**.

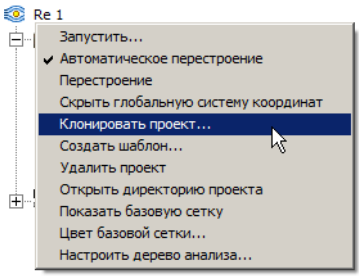
11 Кликните **OK**.



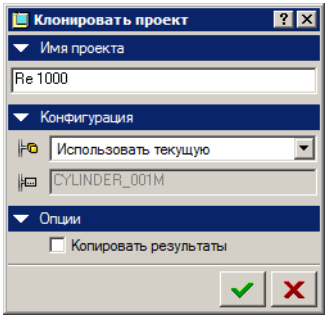
Клонирование проекта

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Re 1** и из контекстного меню выберите **Клонировать проект**.

2 В поле **Имя проекта** введите `Re1000`.



3 Кликните **OK**. Будет создан новый проект FloEFD с прикрепленными к нему данными FloEFD.



Т.к. новый проект является копией FloEFD проекта **Re 1**, необходимо изменить только значение скорости течения в соответствии в с числом Рейнольдса 1000. Чтобы изменить данные, определенные в **Мастере проекта**, воспользуйтесь диалоговым окном **Общие настройки**. Настройки **Единиц измерения** и настройки разрешения геометрии не требуют изменений.

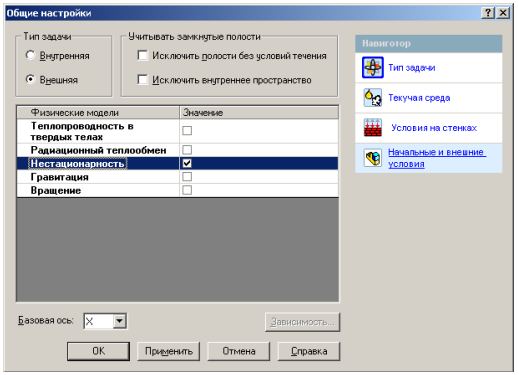
🕮 *В окне **Общие настройки** представлены текущие настройки проекта. Здесь Вы можете внести изменения в соответствии с требованиями проекта. Таким образом можно менять настройки, заданные в **Мастере проекта**, или проект, созданный с помощью **Шаблона** FloEFD.*

Изменение настроек проекта

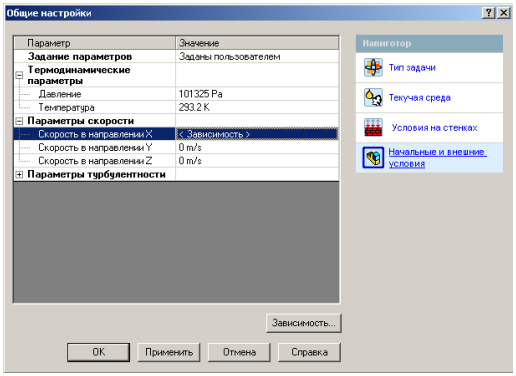
1 Кликните **Flow Analysis > Общие настройки**. Появится диалоговое окно **Общие настройки**.

2 Как уже было сказано ранее, при Re > 40 обтекание цилиндра является нестационарным. Поэтому в проекте необходимо включить опцию **Нестационарность**.

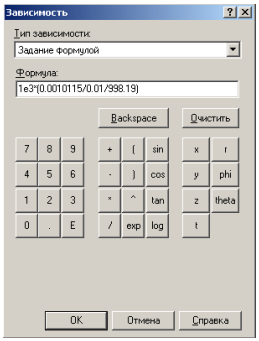
3 В **Навигаторе** кликните по вкладке **Начальные и внешние условия**.



4 Кликните в поле **Скорость в направлении X** и нажмите кнопку **Зависимость**.



5 В поле **Формула** введите формулу с новым числом Рейнольдса: `1e3*(0.0010115/0.01/998.19).`



6 Кликните **OK**, чтобы вернуться в диалоговое окно **Общие настройки**.

7 Кликните **OK**, чтобы сохранить изменения и выйти из диалогового окна **Общие настройки**.

Изменение цели-выражение

1 В группе **Цели** кликните правой кнопкой мыши по элементу **Коэффициент сопротивления** и из контекстного меню выберите **Изменить**.

2 В поле **Выражение** введите выражение с новым числом Рейнольдса: `{ГЦ Сила (X) 1}/(0.002*(0.0010115*10^3)^2)*(2*998.19*0.01).`

3 В качестве **Размерности** выберите **Безразмерный**.

4 Кликните **OK** , чтобы сохранить изменения и закрыть панель **Цель-выражение**.

Чтобы провести исследование при числах Рейнольдса 10^3 и 10^5, необходимо увеличить как скорость, так и геометрические размеры модели (т.е. диаметр цилиндра). Добиться возрастания числа Рейнольдса только за счет увеличения скорости сложно, т.к. тогда придется увеличить ее значение во много раз. Для того, чтобы провести исследование при $Re=10^5$, необходимо увеличить диаметр цилиндра до 1 м.
Если необходимо создать подобный проект для одной и той же модели, предпочтительнее использовать клонирование проекта. Для того, чтобы общие настройки проекта применить к другой модели, следует воспользоваться **Шаблоном** FloEFD.

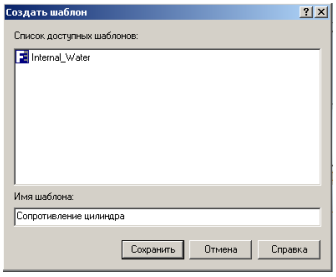
🕮 ***Шаблон*** *включает в себя основные настройки проекта, которые могут служить основой для нового проекта. Это тип задачи, физические модели, текучие среды, материалы, начальные и внешние параметры течения, тепловое условие на стенке, настройки разрешения геометрии, а также система единиц измерения. Обратите внимание, что* ***Граничные условия***, ***Вентиляторы***, ***Начальные условия***, ***Цели*** *и другие элементы, доступные из меню* ***Flow Analysis > Добавить****, в шаблоне не хранятся. По умолчанию доступен только шаблон Internal Water, но Вы также можете создать свои собственные шаблоны.*

Создание шаблона

1 Кликните **Flow Analysis > Проект > Создать шаблон**. Появится диалоговое окно **Создать шаблон**.

2 В поле **Имя шаблона** введите `Сопротивление цилиндра`.

3 Кликните **Сохранить**. Будет создан новый шаблон FloEFD.



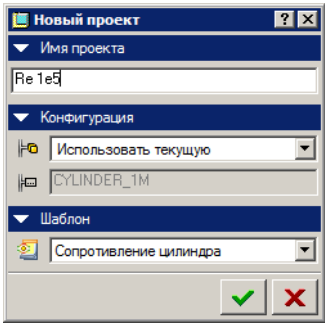
🕮 *Все шаблоны сохраняются в виде файлов* **.fwp** *в директории* **<install_dir>/Template**. *Вы можете с легкостью можете применить шаблон к любым ранее созданным моделям.*

4 Сохраните модель.

Теперь на основе шаблона **Сопротивление цилиндра** необходимо создать новый проект.

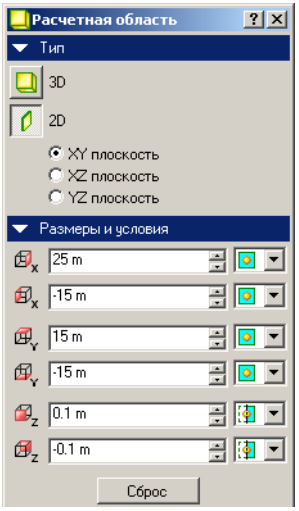
Создание проекта на основе шаблона

Откройте файл **ylinder_1m.asm**, расположенный в папке **cylinder 1m**.



1. Кликните **Flow Analysis > Проект > Новый**. Появится диалоговое окно **Новый FloEFD проект**.
2. В поле **Имя конфигурации** введите `Re 1e5`.
3. Из **Списка шаблонов** выберите **Сопротивление цилиндра**.
4. Кликните **OK**.

Новый проект содержит такие же настройки, как и проект **Re 1000**, поставленный в модели **cylinder_001m**. Другими являются только **Разрешение геометрии** и размеры **Расчетной области**, который рассчитываются FloEFD, исходя из геометрических размеров модели.
Обратите внимание, что настройки **2D моделирования** и **Глобальная цель** сохранились. Поэтому Вы можете изменить эти настройки в соответствии с новой геометрией модели.

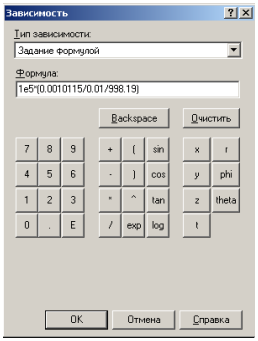


1. Кликните **Flow Analysis > Расчетная область** и измените размеры расчетной области, как показано на рисунке.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Проект > Расчетная область.***

2. Кликните **OK** .
3. Откройте диалоговое окно **Общие настройки**, кликните по вкладке **Начальные и внешние условия**, затем кликните в поле **Скорость в направлении X** и нажмите кнопку **Зависимость**.

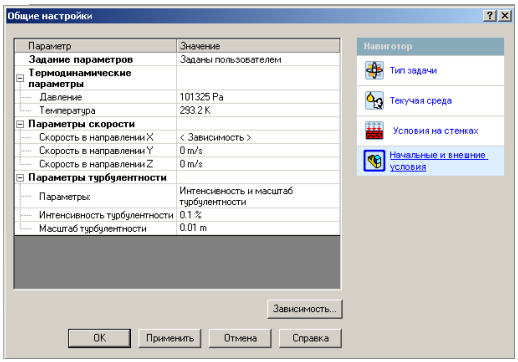
4 Измените выражение для X-компоненты скорости, как показано ниже:
`1e5*(0.0010115/1/998.19)`.



Кликните **OK**, чтобы вернуться в диалоговое окно Общие настройки.

По умолчанию FloEFD устанавливает масштаб турбулентности равным 1% от размеров модели (в данном случае диаметра цилиндра). Т.к. проект **Re 1e5** был создан на основе шаблона, масштаб турбулентности соответствует цилиндру меньшего диаметра (d = 0.01m). Для модели **cylinder_1m** это значение необходимо изменить.

5 В диалоговом окне **Общие настройки** раскройте группу **Параметры турбулентности**. В поле **Масштаб турбулентности** введите значение `0.01`.



6 Кликните **OK**.

7 Создайте **Цель-выражение** для коэффициента сопротивления цилиндра, как было описано ранее. В поле Выражение введите следующую формулу:

`{ГЦ Сила (X) 1}/(0.2*(0.0010115*10^5)^2)*(2*998.19*1)`.

8 В качестве **Размерности** выберите **Безразмерный**.

9 В поле **Имя цели** введите `Коэффициент сопротивления`.

10 Кликните **OK** .

11 Откройте диалоговое окно **Настройки локальной сетки**.

12 В группе **Равноудаленное дробление** установите **Отступ 1** = `0.4 m`.

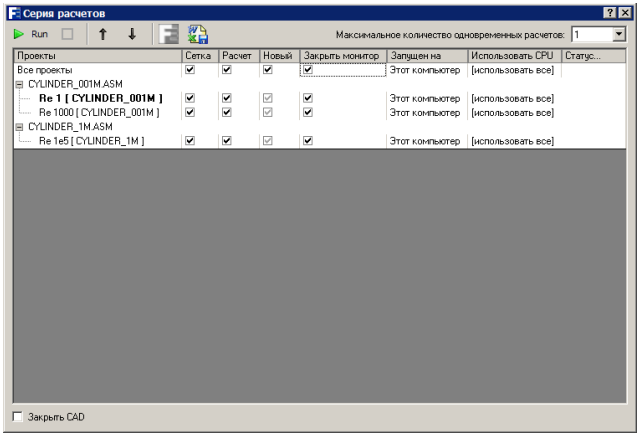
Теперь Вы можете рассчитать проекты, поставленные в двух различных конфигурациях.

Запуск серии расчетов

FloEFD позволяет автоматически рассчитать серию проектов, открытых в ткущей сессии.

1 Кликните **Flow Analysis > Расчет > Серия расчетов**.

2 Поставьте галочку **Расчет** в поле **Все проекты**. Таким образом, **Расчет** будет выбран для всех проектов (**Re 1**, **Re 1000**, **Re 1e5**). Также в поле **Все проекты** поставьте галочку **Закрыть монитор**. Когда поставлена галочка **Закрыть монитор**, после окончания расчета FloEFD автоматически закрывает **Окно монитора**.



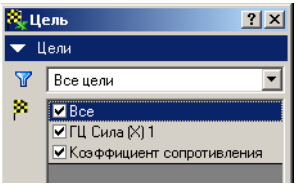
3 Кликните **Запустить**.

Получение результатов

После того, как все расчеты завершатся, активируйте проект **Re 1000** в дереве проектов FloEFD. Чтобы получить значение **Коэффициента сопротивления**, создайте **Цель**:

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Результаты** и из контекстного меню выберите **Загрузить**.

2 В дереве анализа FloEFD в группе **Результаты** кликните правой кнопкой мыши по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить**. Появится диалоговое окно **Цель**.



3 Выберите **Все**.

4 Кликните **OK** . Будет создан документ Excel **Цели1**. Перейдите в этот документ, чтобы получить нужное значение.

Активируйте проект **Re 1** и загрузите результаты.

CYLINDER_001M.ASM [RE1]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение
ГЦ Сила (X) 1	[N]	1,1386E-09	1,15627E-09	1,11011E-09	2,06157E-09
Коэффициент сопротивления	[ ]	11,10844264	11,28083059	10,83046835	20,11312581

CYLINDER_001M.ASM [RE1000]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение
ГЦ Сила (X) 1	[N]	0,000129989	0,000136542	0,000112933	0,000154444
Коэффициент сопротивления	[ ]	1,268204163	1,332128674	1,101802671	1,506785172

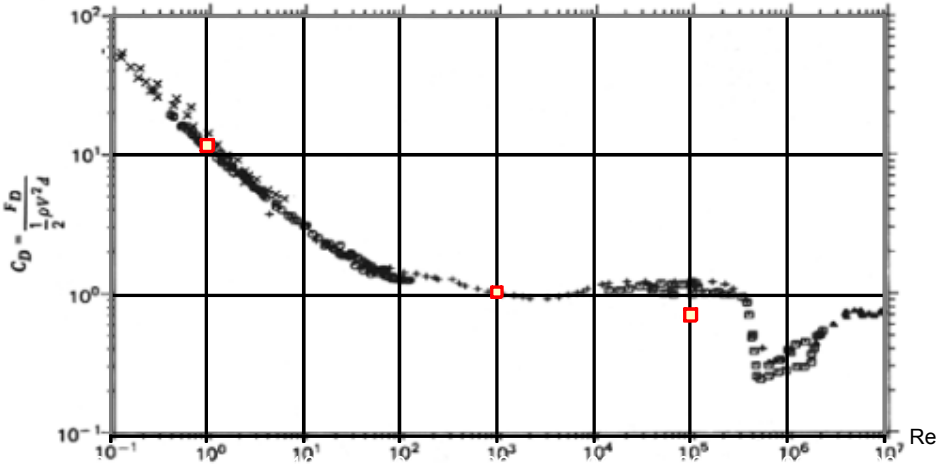
5 Переключитесь в модель **cylinder 1m**, активируйте проект **Re 1e5** , загрузите результаты и выведите значения всех целей.

CYLINDER_1M.ASM [RE1E5]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение
ГЦ Сила (X) 1	[N]	0,772709671	0,788164611	0,736301818	0,840534993
Коэффициент сопротивления	[ ]	0,753872304	0,768950478	0,718352014	0,820044159

Для сравнения результатов, полученных с помощью FloEFD, с экспериментальной кривой, предпочтительнее выбирать средние значения коэффициента сопротивления. Как в стационарной, так и в нестационарной задаче для средних значений цели менее заметны отклонения.

Результаты сравнения представлены на рисунке ниже.



1 Roland L. Panton, “Incompressible flow” Second edition. John Wiley & sons Inc., 1995

B3

КПД теплообменника

Постановка задачи

С помощью FloEFD можно исследовать течение и теплопередачу в различных инженерных конструкциях. Множество постпроцессорных элементов FloEFD позволяют подробно изучить картину распределения различных параметров внутри конструкции. Таким образом, можно получить представление о том, какие процессы протекают в аппарате. Исходя из этого, инженер-проектировщик может определить, каким образом конструкцию можно оптимизировать.

В качестве примера рассмотрим, как с помощью FloEFD можно рассчитать производительность противоточного теплообменника. Мерой производительности является эффективность теплообмена между горячим и холодным теплоносителями, т.е. КПД теплообменника. Это значение определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\text{пр}}}$$

Здесь Q - теплопроизводительность аппарата, т.е. количество теплоты, переданное от горячего теплоносителя к холодному, $Q_{\text{пр}}$ - предельная теплопроизводительность, т.е. максимально возможное количество теплоты, которое может быть передано от горячего теплоносителя к холодному. Предельная теплопроизводительность достигается в случае, когда температура одного из теплоносителей изменяется на величину, равную максимально возможной разности температур. Максимальная разность температур рассчитывается как разность температур горячего и холодного теплоносителей на входе: $(T_{hot}^{inlet} - T_{cold}^{inlet})$. Таким образом, КПД противоточного теплообменника равен:

$\varepsilon = \frac{T_{hot}^{inlet} - T_{hot}^{outlet}}{T_{hot}^{inlet} - T_{cold}^{inlet}}$ - если расход горячего теплоносителя меньше расхода холодного теплоносителя;

$\varepsilon = \frac{T_{cold}^{outlet} - T_{cold}^{inlet}}{T_{hot}^{inlet} - T_{cold}^{inlet}}$ - если расход горячего теплоносителя больше расхода холодного теплоносителя.

Под расходом подразумевается произведение массового расхода на удельную теплоемкость: $C = \dot{m}c$ **[2]**

Температуры теплоносителей на входах должны быть заданы, а на выходах их можно рассчитать.

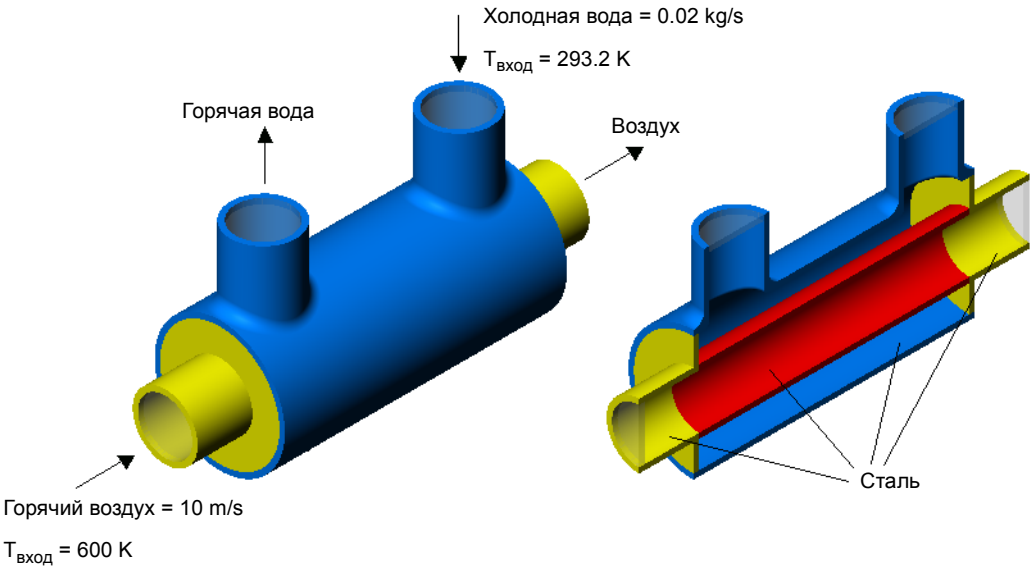
Помимо КПД, необходимо также определить среднюю температуру стенки внутренней трубы теплообменника. Полученное значение может быть использовано в дальнейшем для проведения прочностного и усталостного анализа.

Открытие модели

Скопируйте папку **B3 - Heat Exchanger** в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные. Запустите FloEFD.

Кликните **Файл > Открыть**. В диалоговом окне **Открыть файл** перейдите к сборке **heat_exchanger.asm**, расположенной в папке **B3 - Heat Exchanger**, и кликните **Открыть** (или дважды кликните по файлу сборки).

🕮 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **heat_exchanger.asm**, расположенную в папке **B3 - Heat Exchanger\Ready To Run**, и запустить проект на расчет.*

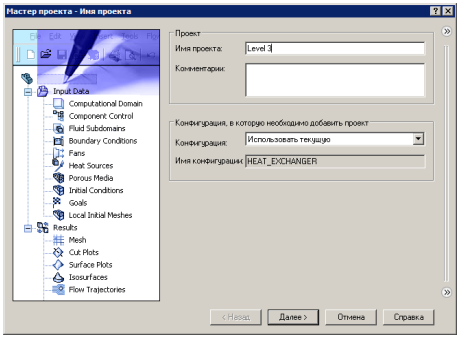


Создание проекта FloEFD

1 Кликните **Flow Analysis > Проект > Мастер проекта**.

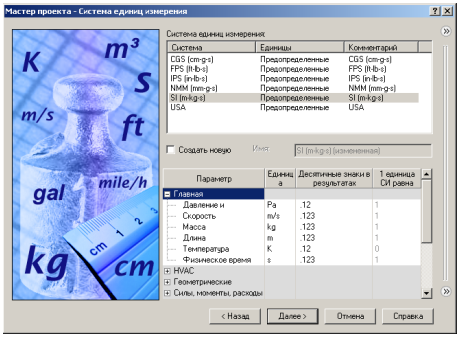
2 В качестве **Имени проекта** введите `Level 3`. Расчет будет проводиться с **Уровнем начальной сетки** равным 3, поэтому было задано соответствующее имя ‘Level 3’.

Кликните **Далее**.

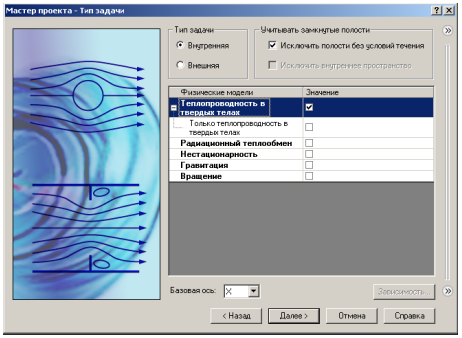


3 В диалоговом окне **Система единиц измерения** необходимо выбрать систему единиц, которая будет использоваться как для входных, так и для выходных данных (результатов). В данном проекте удобно использовать заданную по умолчанию Международную систему единиц **SI**.

Кликните **Далее**.



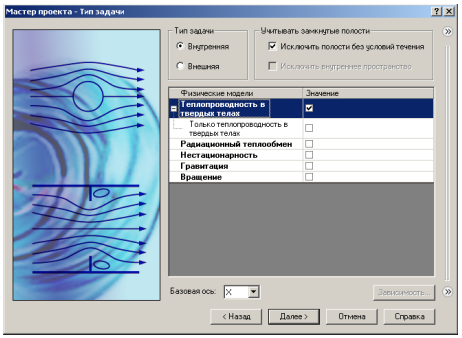
4 В диалоговом окне **Тип задачи** в таблице **Физические модели** поставьте галочку **Теплопроводность в твердых телах**.



📖 *По умолчанию в FloEFD рассматривается теплопередача только за счет конвекции. Включение опции* **Теплопроводность в твердых телах** *позволяет решать задачи сопряженного теплообмена, т.е. рассматривать конвекцию в совокупности с теплопроводностью в твердых телах. В данной задаче будет исследоваться теплопередача между текучими средами через стенки модели, а также теплообмен внутри тел.*

Кликните **Далее**.

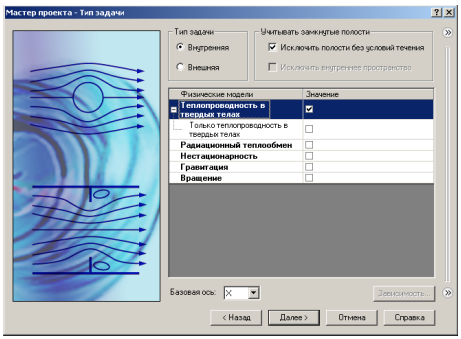
5 В проекте используются две текучие среды - вода и воздух. Раскройте группу **Жидкости** и добавьте **Water** в список **Текучие среды проекта**. Таким же образом добавьте в список **Air** из группы **Газы**. Убедитесь в том, что в качестве **Типа по умолчанию** выбраны **Жидкости**.



Кликните **Далее**.

6 Так как в окне **Тип задачи** была включена опция **Теплопроводность в твердых телах**, то на следующем шаге появляется диалоговое окно **Материал по умолчанию**. Материалы, задаваемые в этом диалоговом окне, по умолчанию применяются ко всем компонентам модели. Чтобы задать другой материал для одного или нескольких компонентов, после создания проекта можно будет воспользоваться элементом **Материал**.

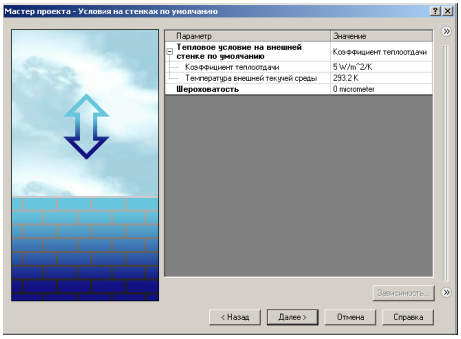
Если из списка **Материалов** Вы не можете выбрать подходящий, Вы можете создать свой собственный материал. Для этого необходимо нажать на кнопку **Новый** и создать новый элемент в **Инженерной базе данных**.



Внутренняя и внешняя трубы теплообменника выполнены из нержавеющей стали. Поэтому выберите материал **Steel Stainless 321** из группы **Alloys**. По умолчанию этот материал применяется ко всем компонентам модели.

Кликните **Далее**.

7 В диалоговом окне **Условие на стенке по умолчанию** в качестве **Теплового условия на стенке по умолчанию** выберите **Коэффициент теплоотдачи**.



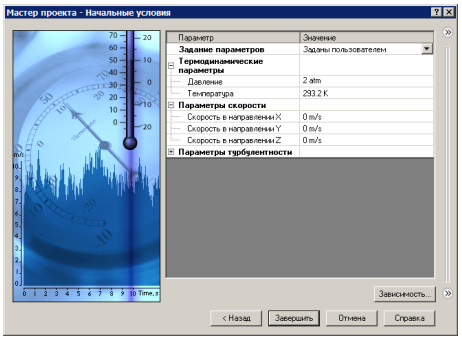
📖 *Это условие позволяет задать теплопередачу от внешних стенок модели к текучей среде, которая находится снаружи модели и в проекте не указывается. В качестве условия можно задать характерную температуру текучей среды и коэффициент теплоотдачи.*

Задайте значение **Коэффициента теплоотдачи** равным 5 $W/m^2/K$.

Шероховатость стенок по умолчанию равна 0. Это значение изменять не требуется.

Кликните **Далее**.

8 В диалоговом окне **Начальные условия** в группе **Термодинамические параметры** задайте значение **Давления** `2 atm`. FloEFD автоматически преобразует введенное значение в соответствии с выбранной системой единиц измерения.



Не меняя значения других параметров, кликните **Завершить**.

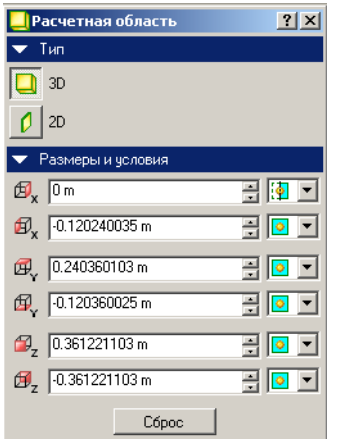
После окончания работы с **Мастером проекта** необходимо завершить создание проекта. Сначала необходимо задать условие симметрии: в данном случае можно рассматривать только половину модели, т.е. она является симметричной. Это не является обязательным, однако рекомендуется сделать для того, чтобы уменьшить процессорное время и требуемую для расчета задачи память.

Задание условия симметрии

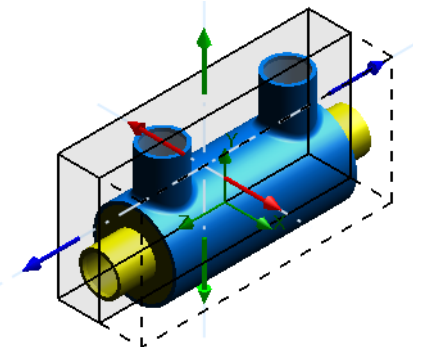
1 В дереве анализа FloEFD раскройте группу **Входные данные**.

2 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Расчетная область** и из контекстного меню выберите **Изменить.**

3 В группе **Размеры и условия** на границе **X max** выберите условие **Симметрия** и в поле для **X max** введите 0.



Чтобы изменить расчетную область вручную, в дереве анализа FloEFD выберите элемент **Расчетная область**, *кликните в графической области и потяните в нужное положение стрелки, расположенные на каждой грани каркасного параллелепипеда. В появляющихся выносках введите точные координаты.*



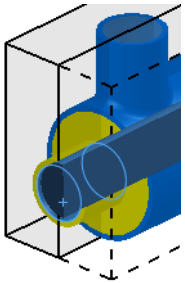
4 Кликните **OK** .

Задание подобласти течения

В Мастере проекта в окне **Текучая среда по умолчанию** в качестве **Типа по умолчанию** были выбраны **Жидкости**, а в качестве текучей среды, **Выбранной по умолчанию** - вода (**Water**). Однако горячим теплоносителем в теплообменнике является воздух. Поэтому во внутренней трубе необходимо задать **Air**. Это можно сделать с помощью элемента **Подобласть текучей среды**. В качестве типа текучей среды в этой области следует выбрать **Газ**, в качестве текучей среды - **Air**. Зададим следующие начальные условия: начальная температура воздуха 600 K, скорость течения - 10 m/s.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Подобласть течения**.

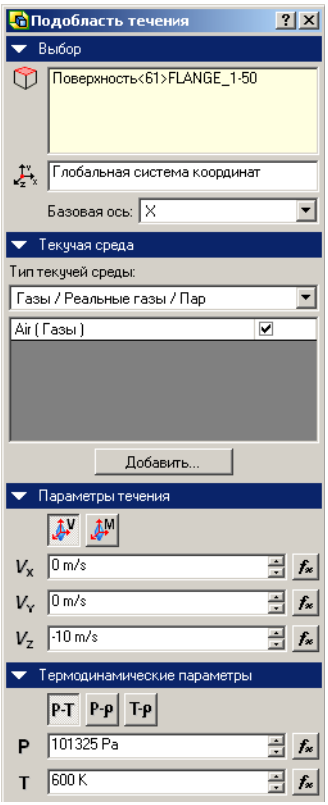
2 Выберите внутреннюю поверхность фланца (компонент **FLANGE_1**), контактирующую с воздухом. Создаваемая подобласть течения сразу же отобразится в графической области в виде тела, окрашенного в голубой цвет.



🕮 *Чтобы внутри области с одной текучей средой (вода) задать область с другой текучей средой (воздух), необходимо выбрать поверхность, которая обтекается второй текучей средой (воздух).Заданная таким образом подобласть течения будет применена ко всей области, заполненной второй текучей средой (воздух). Визуализация подобласти течения в графической области позволяет проверить, правильно ли выбрана поверхность.*

3 Заданную по умолчанию **Систему координат** и **Базовую ось** изменять не требуется.

4 Из списка **Тип текучей среды** выберите **Газы / Реальные газы / Пар**. Т.к. в Мастере проекта в качестве одной из **Текучих сред проекта** был задан воздух (**Air**), то он будет определен как текучая среда подобласти течения.



🕮 *FloEFD позволяет выбрать тип текучей среды и/ или текучую среду для данной подобласти течения в группе* **Текучая среда**, *а также задать параметры течения в соответствии с выбранным типом текучей среды.*

5 В группе **Параметры течения** в поле **Скорость в направлении Z** V_z введите значение `-10`.

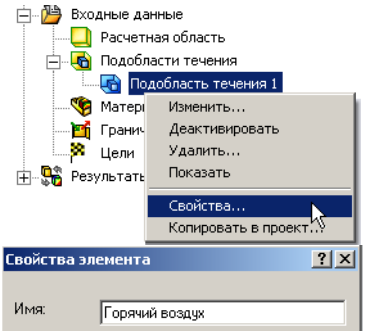
🕮 *FloEFD позволяет задавать начальные параметры течения, начальные термодинамические параметры, а также начальные параметры турбулентности. Эти настройки применяются к создаваемой подобласти течения.*

6 В группе **Термодинамические параметры** задайте значения **Статического давления** P и **Температуры** T равными `1 atm` и 600 K соответственно. FloEFD автоматически преобразует их в соответствии с выбранной системой единиц измерения.

Эти условия задавать не обязательно, т.к. параметры входящего потока горячего воздуха будут заданы в виде граничных условий. Однако уточнение начальных параметров позволит ускорить сходимость расчета задачи.

7 Кликните **OK** . В дереве анализа появится элемент **Подобласть течения 1**.

8 Для большей наглядности элемент **Подобласть течения1** можно переименовать. Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Подобласть течения1** и из контекстного меню выберите **Свойства**. В поле **Имя** введите `Горячий воздух` и кликните **OK**.



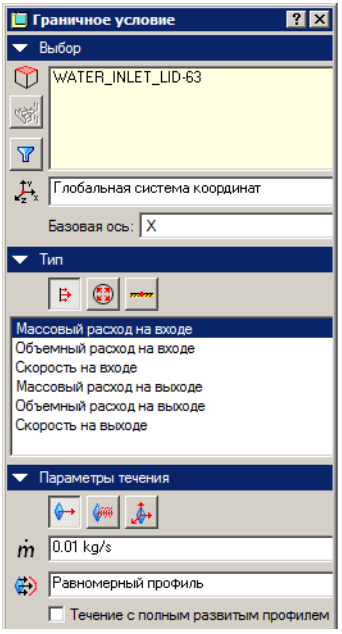
🕮 *Вы также можете дважды (через паузу) кликнуть по элементу и переименовать его прямо в дереве анализа FloEFD.*

Задание граничных условий

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**. Появится диалоговое окно **Граничное условие**.

2 Выберите компонент **WATER_INLET_LID**.

Выделенный компонент появится в поле **Поверхности для задания граничного условия** .



3 Заданные по умолчанию **Систему координат** и **Базовую ось** изменять не требуется.

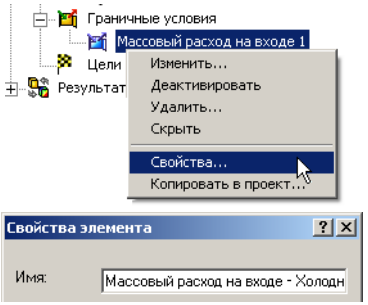
🕮 *Когда Вы создаете новое граничное условие, в графической области появляется выноска, в которой отображается имя создаваемого условия и заданные по умолчанию значения параметров. Чтобы открыть диалоговое окно быстрого редактирования, дважды кликните по выноске.*

4 Кликните в поле **Массовый расход** и введите значение `0.01 kg/s`. Действительный массовый расход равен 0.02 kg/s. Задаем 1/2 этого значения, т.к. отверстие разделено плоскостью симметрии пополам.

5 Кликните **OK** . В дереве анализа появится новый элемент **Массовый расход на входе 1**.

Это граничное условие означает, что вода поступает в теплообменник с массовым расходом 0.02 kg/s при температуре 293.2 K.

6 Переименуйте элемент **Массовый расход на входе 1** в `Массовый расход на входе - Холодная вода`.



Далее необходимо задать условие **Давление окружающей среды** на отверстии, из которого выходит вода.

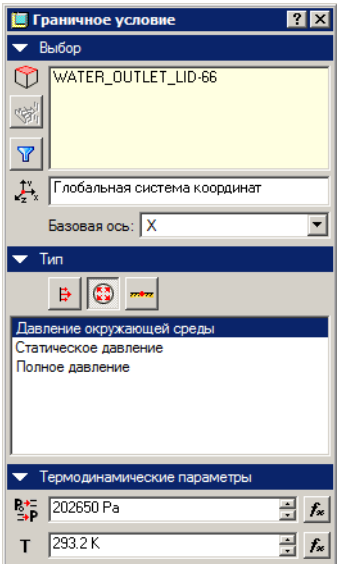
1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**.

2 Выберите компонент **WATER_OUTLET_LID**. Выделенный компонент появится в списке **Поверхности для задания граничного условия** .

3 Кликните **Давление** и из списка **Тип граничного условия** выберите **Давление окружающей среды**.

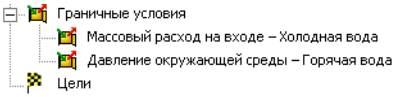
4 По умолчанию **Давление окружающей среды** равно 202650 Pa, т.к. это значение было задано в **Мастере проекта** на шаге **Начальные условия**.

Температура по умолчанию задана равной 293.2 K. Значения этих и других параметров изменять не требуется.



5 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится элемент **Давление окружающей среды 1**.

6 Переименуйте элемент **Давление окружающей среды 1** в `Давление окружающей среды - Горячая вода`.

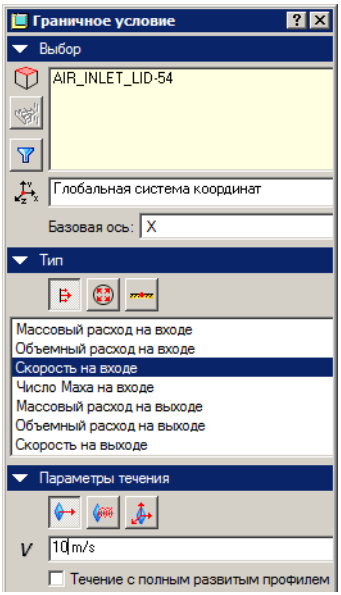


Теперь необходимо задать граничное условие на отверстии, в которое поступает горячий воздух.

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**.

2 Выберите компонент **AIR_INLET_LID**.

Выделенный компонент появится в списке **Поверхности для задания граничного условия** . Заданные по умолчанию **Систему координат** и **Базовую ось** изменять не требуется.



3 В группе **Тип** выберите условие **Скорость на входе**.

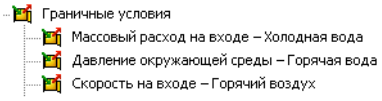
4 Кликните в поле **Скорость по нормали к поверхности** и введите значение `10` (единицы измерения будут поставлены автоматически).

5 Раскройте группу **Термодинамические параметры**. Значение температуры по умолчанию равно значению, заданному в качестве начальной температуры воздуха в диалоговом окне **Подобласть течения**. Эти значения не требуют изменений.

6 Кликните **OK** . В дереве анализа FloEFD появится новый элемент **Скорость на входе 1**.

Это граничное условие означает, что воздух поступает во внутреннюю трубу теплообменника со скоростью 10 m/s при температуре 600 K.

7 Переименуйте элемент **Скорость на входе 1** в `Скорость на входе - Горячий воздух`.

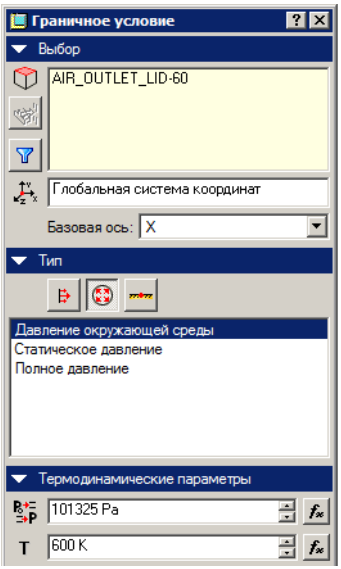


Далее необходимо задать условие **Давление окружающей среды** на отверстии, из которого выходит воздух.

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**. Появится диалоговое окно **Граничное условие**.

2 Выберите компонент **AIR_OUTLET_LID**.

Выделенный компонент появится в списке **Поверхности для задания граничного условия** .

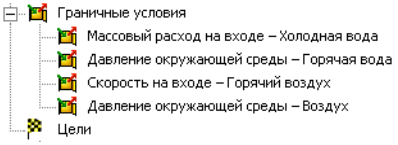


3 Кликните **Давление** и из списка **Тип граничного условия** выберите **Давление окружающей среды**.

4 Убедитесь, что значения **Давления окружающей среды** и **Температуры** равны соответственно 101325 Pa и 600 K. Значения других параметров также не требуют изменений.

Кликните **OK** .

5 Переименуйте элемент **Давление окружающей среды 1** в `Давление окружающей среды - Воздух`.



В данном проекте включена опция **Теплопроводность в твердых телах**. Поэтому необходимо назначить материал компонентам модели, а также задать их начальную температуру.

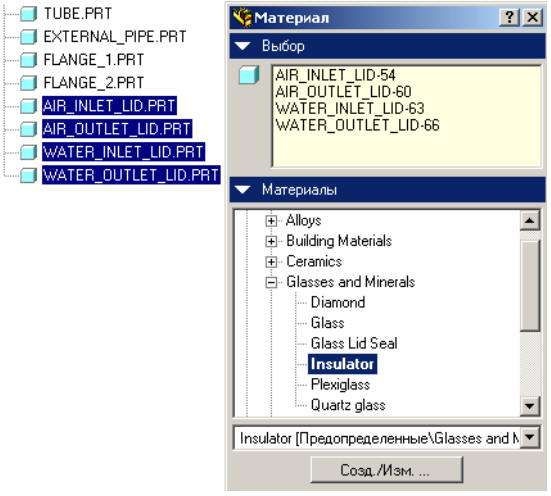
Задание материалов

По умолчанию все твердые тела в этом проекте считаются выполненными из нержавеющей стали (этот материал был выбран в **Мастере проекта**). В том числе и крышки, которые закрывают отверстия. Однако в таком случае они будут влиять на теплопередачу внутри теплообменника. Отключить крышки в диалоговом окне **Управление компонентами** нельзя. Это связано с тем, что на их поверхностях заданы граничные условия, что возможно только на поверхностях твердого тела, контактирующих с текучей средой. Однако в качестве материала крышек можно задать изоляционный материал, исключив тем самым их влияние на теплопередачу.

1 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Материалы** и из контекстного меню выберите **Добавить материал**.

2 В дереве модели выберите все детали, обозначающие крышки. Названия этих компонентов появятся в списке **Компоненты для задания материла** .

3 В группе **Материалы** раскройте список **Предопределенные** и из группы **Glasses & Minerals** выберите **Insulator**.



4 Кликните **OK** . Теперь крышки считаются выполненными из изоляционного материала.

🕮 *Теплопроводность материала* **Insulator** *равна нулю, поэтому теплопередача через крышки отсутствует.*

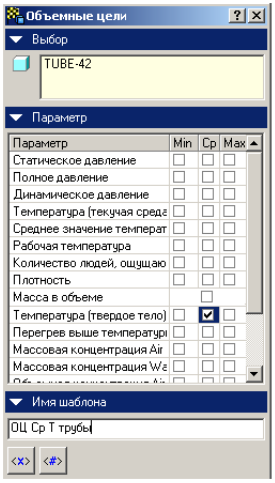
5 Переименуйте элемент **Insulator Материал 1** в `Изоляторы`.

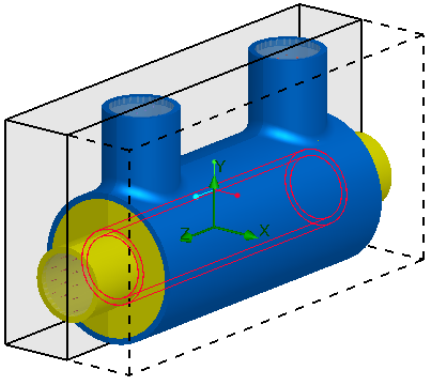
Задание объемной цели

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Цели** и из контекстного мню выберите **Добавить объемные цели**.

2 В дереве модели выберите трубу (компонент **Tube**).

3 В таблице **Параметр** поставьте галочку **Ср** в поле **Температура (Твердое тело)**. Не снимайте галочку





Исп. для сход., чтобы эта цель использовалась для контроля сходимости.

4 В поле **Имя шаблона** введите `ОЦ Ср Т трубы`.

5 Кликните **OK** .

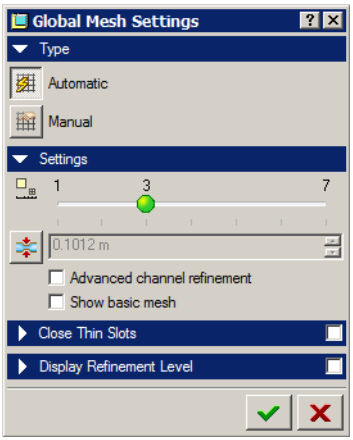
Задание настроек сетки

1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

2 По умолчанию выбран **Автоматический режим** .

3 В группе **Настройки** оставьте **Уровень начальной сетки** равный 3 и **Минимальный зазор** , заданные по умолчанию.

4 Кликните **OK** .



Запуск расчета

1 Кликните **Flow Analysis > Расчет > Запустить**. Появится диалоговое окно **Запустить**.

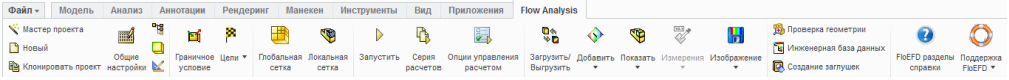
2 Нажмите кнопку **Запустить**.

После окончания расчета Вы можете получить рассчитанное значение температуры с помощью постпроцессорного элемента **Цели**.

Просмотр целей

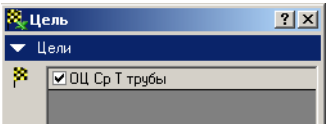
Чтобы получить быстрый доступ к наиболее часто используемым элементам FloEFD, помимо дерева анализа FloEFD, Вы можете использовать панели инструментов на ленте инструментов **Flow Analysis**. Их удобно использовать для отображения результатов.

Вкладки в нижней части ленты инструментов позволяют выбрать группу команд и элементов, которую необходимо отобразить в ленте инструментов. Чтобы получить доступ к командам и элементам FloEFD, кликните по вкладке **Flow Analysis** на ленте инструментов.



1 Кликните **Цель** на панели инструментов **FloEFD** или на вкладке **Flow Analysis > Результаты** ленты инструментов. Появится диалоговое окно **Цель**.

2 Выберите цели проекта (в данном случае цель одна).



3 Кликните **OK** . Будет создан документ Excel **Цели1**.

На листе **Сводный отчет** приведено среднее значение температуры трубы теплообменника.

HEAT_EXCHANGER.ASM [LEVEL3]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Прогресс сходимости [%]	Использовать в сходимости
ОЦ Ср Т трубы	[K]	344,504625	343,93285	343,1591445	344,5243078	100	Да

Просмотр картин в сечении

1 Кликните **Картина в сечении** на панели инструментов **FloEFD** или на вкладке **Flow Analysis > Результаты** ленты инструментов. Появится диалоговое окно **Картина в сечении**.

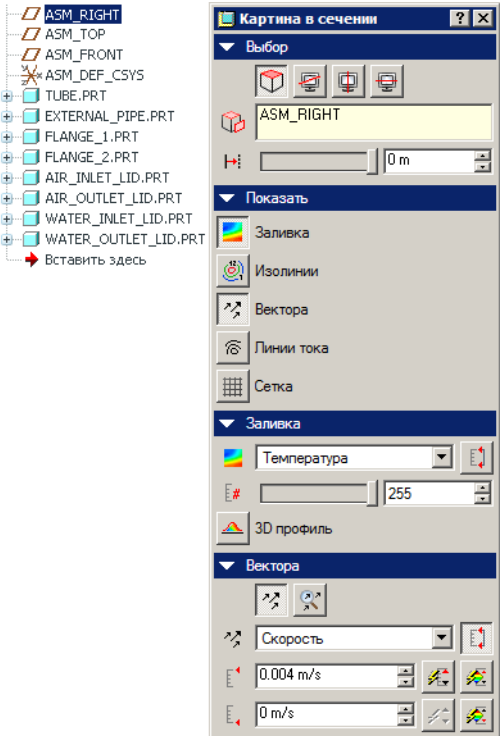
2 В дереве модели выберите плоскость **ASM_RIGHT**.

3 В диалоговом окне **Картина в сечении** в дополнение к **Заливке** выберите **Вектора**.

4 В группе **Заливка** в качестве **Параметра** выберите **Температуру**.

5 С помощью ползунка установите **Количество уровней** равным 255.

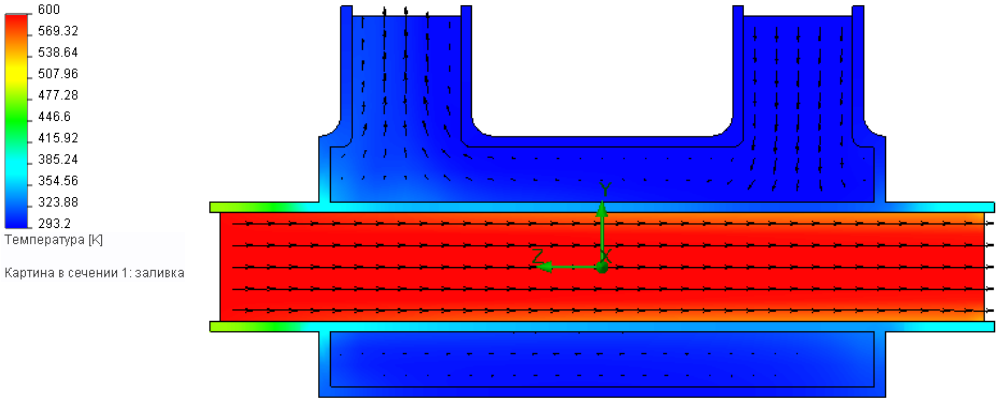
6 Убедитесь, что в группе **Вектора** выбрана опция **Статические вектора**. Кликните **Корректировать минимум и максимум** и для **Максимума** задайте значение скорости, равное `0.004 m/s`.



7 Кликните **OK** .

8 Созданная картина в сечении скрыта геометрией модели.

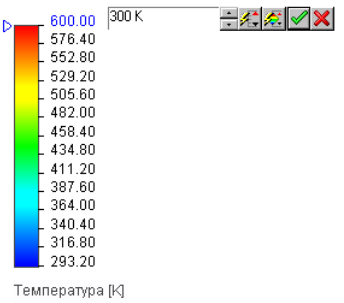
9 Чтобы скрыть модель, на панели инструментов **FloEFD** или на вкладке **Flow Analysis > Результаты** ленты инструментов кликните **Геометрия** .

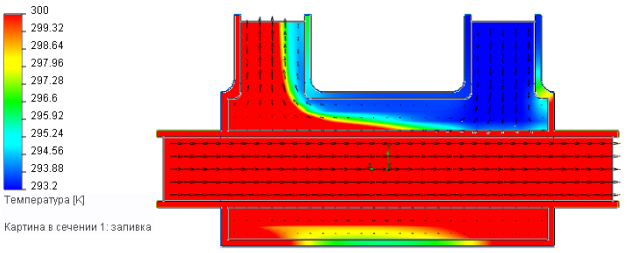


Изменение диапазона отображения параметра

1 На палитре кликните по максимальному значению и в соответствующем поле введите значение `300 K`.

2 Кликните . Картина в сечении обновится в соответствии с заданным диапазоном температур.





Исследуем развитие течения в теплообменнике.

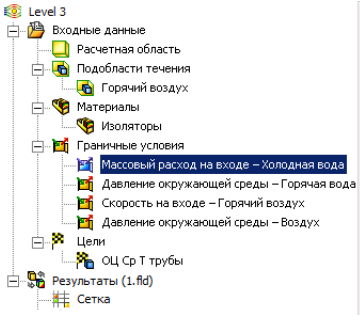
В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Картина в сечении 1** и из контекстного меню выберите **Скрыть**.

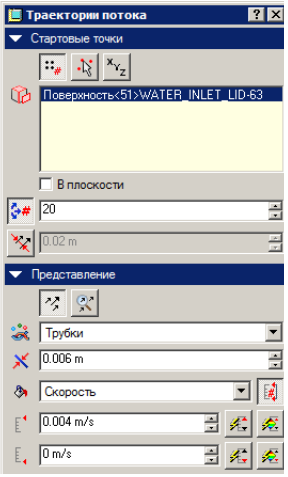
1 Чтобы показать модель, на панели инструментов **FloEFD** или на вкладке **Flow Analysis > Результаты** ленты инструментов кликните **Геометрия** . Затем на панели инструментов **Изображение модели** выберите **Стиль показа > Скрытая линия** . Будут отображены контуры модели.

Отображение траекторий потока

1 Кликните **Траектории потока** на панели инструментов **FloEFD** или на вкладке **Flow Analysis > Результаты** ленты инструментов. Появится диалоговое окно **Траектории потока**.

2 В дереве анализа FloEFD выберите элемент **Массовый расход на входе – Холодная вода**.





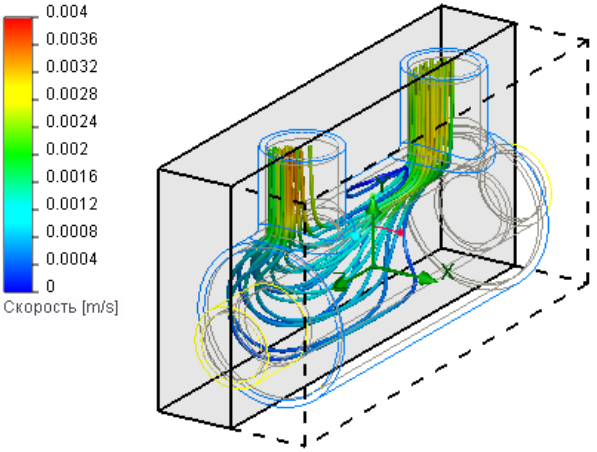
Будет выделена внутренняя поверхность крышки отверстия, в которое поступает вода (компонент **WATER_INLET_LID**). На этой поверхности будут находиться стартовые точки траекторий потока.

3 В группе **Представление** из списка **Раскрасить по** выберите **Скорость**.

4 Нажмите **Корректировать минимум / максимум и количество уровней** и задайте для скорости значение **Максимума** равным `0.004 m/s`.

5 Кликните **OK**. Вы увидите получившиеся траектории потока.

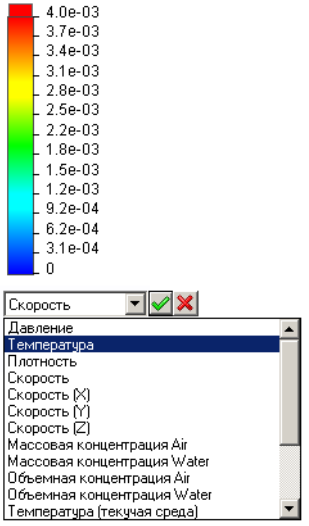
По умолчанию траектории потока окрашены в соответствии со значениями параметра, выбранного из списка **Раскрасить по** . В данном случае цвет траекторий потока соответствует значениям скорости. Чтобы задать для траекторий потока какой-то определенный цвет, из списка **Раскрасить по** следует нажать **Фиксированный цвет** и выбрать нужный.



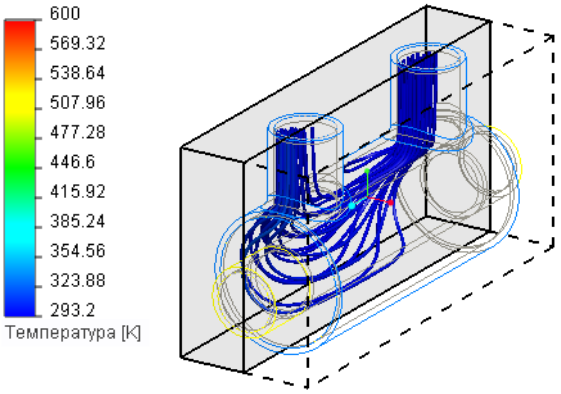
Т.к. распределение температуры в теплообменнике представляет больший интерес, раскрасим траектории потока по этому параметру.

1 На палитре кликните в поле с названием текущего отображаемого параметра и из списка выберите **Температура**.

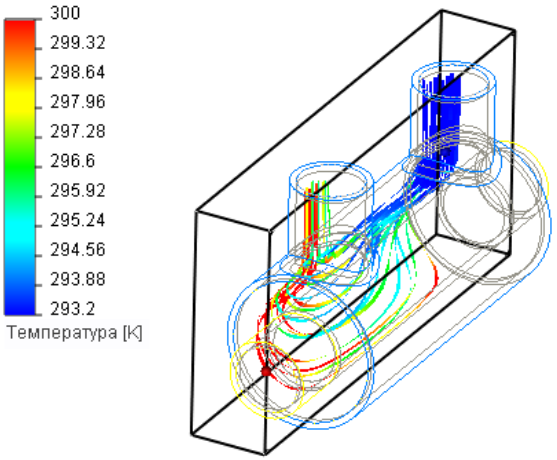
2 Кликните . Траектории потока сразу же обновятся.
Все траектории потока окрашены в синий цвет, т.к. диапазон температуры воды меньше общего (**Глобального**) диапазона (293 – 600). Чтобы



получить более детальную информацию о распределении температуры воды, необходимо вручную изменить диапазон этого параметра.



Отобразим распределение температуры воды в диапазоне между **входом и выходом**.



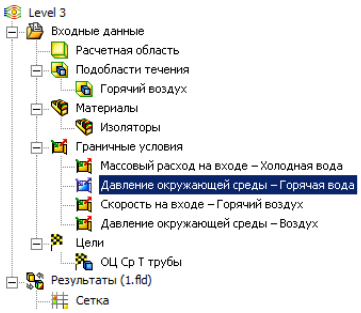
Минимальная температура воды близка 293 K. С помощью элемента **Поверхностные параметры** можно получить значения температур воздуха и воды на выходах из теплообменника. Эти значения нужны для расчета КПД теплообменника, а также для того, чтобы определить подходящий диапазон значений температуры для отображения траекторий потока.

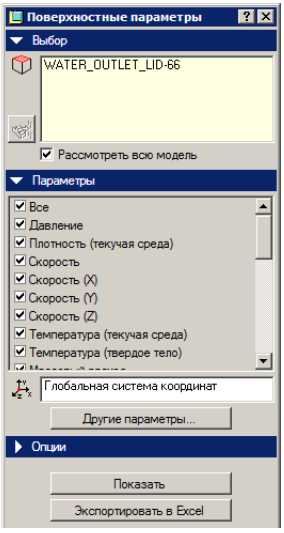
🕮 *Постпроцессорный элемент **Поверхностные параметры** позволяет отобразить минимальное, максимальное, среднее или интегральное значения параметра, рассчитанные на заданной поверхности. Все параметры делятся на две категории: локальные и интегральные. Для локальных параметров (давления, температуры, скорости и т.д.) рассчитываются максимальное, минимальное и среднее значения.*

Просмотр поверхностных параметров

1 Кликните **Поверхностные параметры** на панели инструментов **FloEFD** или на вкладке **Flow Analysis > Результаты** ленты инструментов. Появится диалоговое окно **Поверхностные параметры**.

2 В дереве анализа FloEFD выберите элемент **Давление окружающей среды - Горячая вода**. Будет выделена внутренняя поверхность крышки отверстия, через которое выходит вода (компонент **WATER_OUTLET_LID**).





3 Чтобы значения параметров были рассчитаны во всей модели, т.е. с учетом условия **Симметрии**, поставьте галочку **Рассмотреть всю модель**. Это особенно важно при расчете массового и объемного расходов.

4 В группе **Параметры** выберите **Все**.

5 Кликните **Показать.** Рассчитанные значения параметров будут отображены на панели в нижней части экрана. Слева отображаются локальные параметры, справа - интегральные.

6 Обратите внимание на локальные параметры.

Локальный параметр	Минимум	Максимум	Среднее	Среднерасходный	Площадь поверхности [m^2]
Давление [Pa]	202650	202650	202650	202650	0.0039
Плотность [kg/m^3]	991.3	997.3	995.7	995.5	0.0039
Скорость [m/s]	2.1e-004	3.9e-003	2.6e-003	3.1e-003	0.0039
Скорость (X) [m/s]	-1.5e-004	2.1e-004	-2.4e-006	-2.4e-005	0.0039
Скорость (Y) [m/s]	1.9e-004	3.9e-003	2.6e-003	3.1e-003	0.0039
Скорость (Z) [m/s]	-1.9e-004	1.5e-004	6.7e-006	2.1e-005	0.0039
Число Маха [ ]	0	0	0	0	0.0039
Температура (текучая среда) [K]	294.4	313.5	299.8	300.4	0.0039

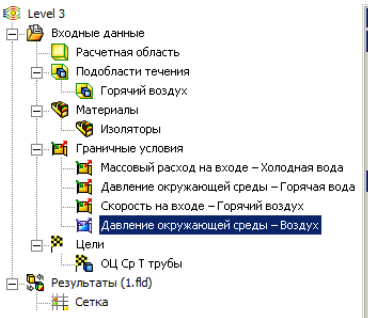
Среднерасходное значение температуры воды на выходе составляет примерно 300 K.

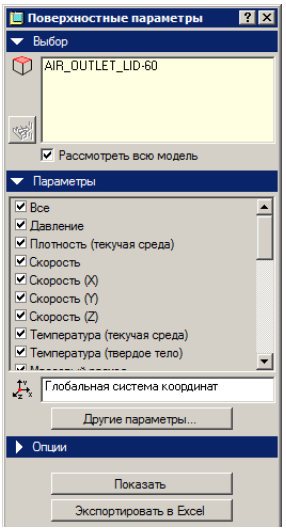
Теперь необходимо определить температуру воздуха на выходе.

1 Кликните по элементу **Давление окружающей среды - Воздух**. Будет выделена поверхность крышки отверстия, через которое выходит воздух **(компонент AIR_OUTLET_LID)**.

2 Внизу на панели кликните **Обновить** .

3 Обратите внимание на локальные параметры, расположенные на панели слева.





Локальный параметр	Минимум	Максимум	Среднее	Среднерасходный	Площадь поверхности [m^2]
Давление [Pa]	101325	101325	101325	101325	0.0039
Плотность [kg/m^3]	0.6	0.7	0.6	0.6	0.0039
Скорость [m/s]	8.1	10.2	9.8	9.8	0.0039
Скорость (X) [m/s]	-9.5e-002	0.1	-2.1e-002	-2.0e-002	0.0039
Скорость (Y) [m/s]	-8.7e-002	0.1	-2.6e-004	-2.6e-004	0.0039
Скорость (Z) [m/s]	-10.2	-8.1	-9.8	-9.8	0.0039
Число Маха [ ]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0039
Температура (текучая среда) [K]	521.1	600.0	585.5	586.0	0.0039

Среднерасходное значение температуры воздуха на выходе составляет 586 K.

4 Справа на панели отображаются значения интегральных параметров. Массовый расход воздуха равен 0.046 kg/s. Это значение рассчитано с учетом условия **Симметрии**, т.к. была включена опция **Рассмотреть всю модель**.

Интегральный параметр	Значение	X-компонента	Y-компонента	Z-компонента	Площадь поверхности [m^2]
Массовый расход [kg/s]	-0.046				0.0078
Объемный расход [m^3/s]	-0.0764				0.0078
Площадь поверхности [m^2]	0.0078	0	0	0.0078	0.0078
Поток полной энтальпии [W]	-27495.7				0.0078
Показатель однородности потока [ ]	1.9552330				0.0078
Площадь смачиваемой поверхности, измеренная в CAD [m^2]	0.0079				0.0079
Площадь твердого тела, измеренная в CAD [m^2]	0.0079				0.0079

5 Кликните **OK** , чтобы закрыть диалоговое окно.

Расчет КПД теплообменника

Теперь необходимо рассчитать КПД теплообменника. Для этого сначала нужно определить, расход какой текучей среды (воды или воздуха) является наименьшим.

Расход рассчитывается как C= $\dot{m}c$. В данном примере массовый расход воды составляет 0.02 kg/s, воздуха - 0.046 kg/s. Удельная теплоемкость воды при температуре 300 K примерно в пять раз больше удельной теплоемкости воздуха при температуре 586 K. Таким образом, расход воздуха меньше расхода воды. Согласно **[2]**, КПД теплообменника рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{T_{hot}^{inlet} - T_{hot}^{outlet}}{T_{hot}^{inlet} - T_{cold}^{inlet}},$$

где T_{hot}^{inlet} - температура воздуха на входе, T_{hot}^{outlet} температура воздуха на выходе, а T_{cold}^{inlet} - температура воды на входе.

Известно, что температура воздуха на входе составляет 600 K, а температура воды на входе - 293.2 K. Значения температур воды и воздуха на выходе были рассчитаны. Таким образом, получаем, что КПД теплообменника равен:

$$\varepsilon = \frac{T_{hot}^{inlet} - T_{hot}^{outlet}}{T_{hot}^{inlet} - T_{cold}^{inlet}} = \frac{600 - 586}{600 - 293,2} = 0,045$$

Итак, выполняя этот пример, Вы могли убедиться, что FloEFD является мощным инструментом для расчета конструкций теплообменников.

2 J.P. Holman. “Heat Transfer” Eighth edition.

B4

Оптимизация сетки

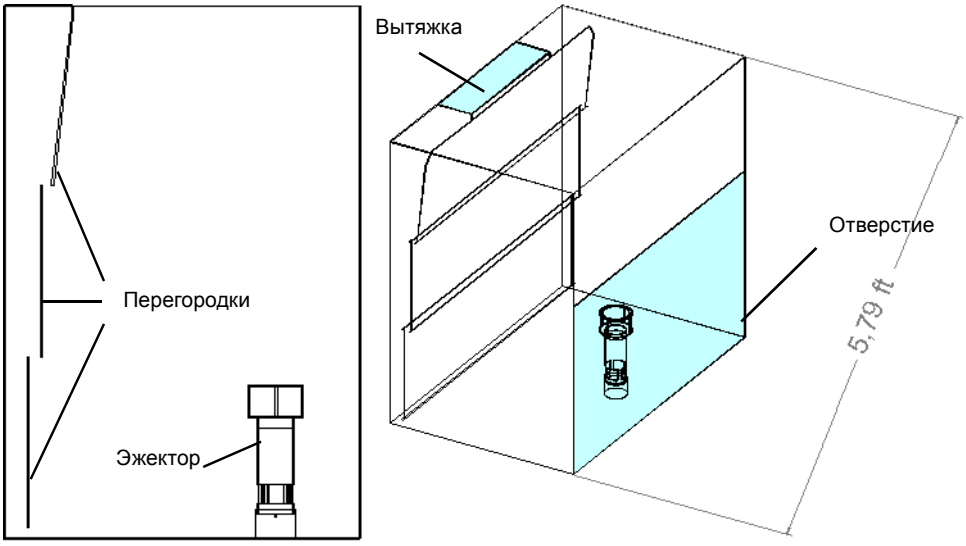
В данном примере демонстрируется, как в FloEFD можно вручную изменять настройки расчетной сетки. В большинстве задач достаточно использовать сетку, сгенерированную в соответствии с автоматическими настройками. Однако, если в модели присутствуют мелкие геометрические элементы, может образоваться большое количество ячеек, для чего ресурсов компьютера может быть недостаточно. В таких случаях рекомендуется вручную изменить настройки расчетной сетки с помощью соответствующих опций FloEFD. Таким образом можно добиться подробного разрешения мелких элементов модели и избежать чрезмерного дробления остальных областей.

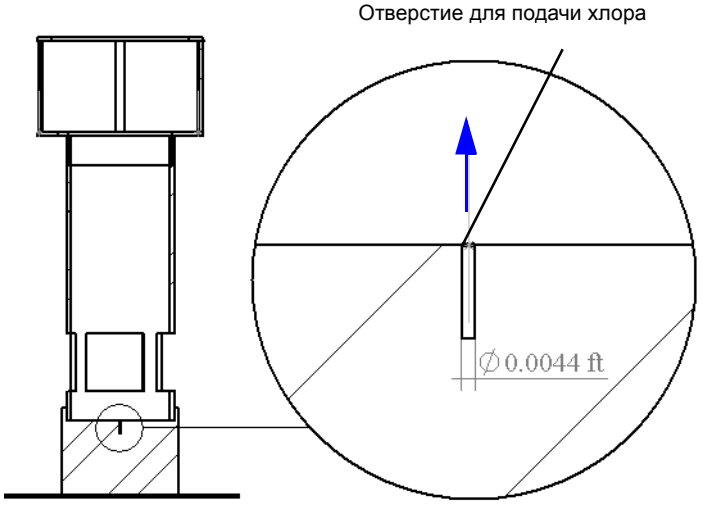
В качестве примера рассмотрим **Вытяжной шкаф с эжектором (Ejector in Exhaust Hood)**. Основные цели данного моделирования:

- установить оптимальное соотношение между задаваемым минимальным зазором и характерным размером модели за счет изменения настроек начальной сетки.
- разрешить мелкие элементы за счет задания настроек локальной сетки.

Постановка задачи

Модель вытяжного шкафа с эжектором показана на рисунке ниже. Обратите внимание, что диаметр отверстия эжектора примерно в 1000 раз меньше характерного размера модели, который определяется исходя из габаритных размеров расчетной области.





Открытие модели

Скопируйте папку **B4 – Mesh Optimization** в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные. Откройте сборку **Ejector_in_Exhaust_Hood.asm**.

🕮 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку* **Ejector_in_Exhaust_Hood.asm**, *расположенную в папке* **B4 – Mesh Optimization\Ready To Run**, *и запустить на расчет нужные проекты.*

Создание проекта FloEFD

Создайте проект с помощью Мастера проекта, как показано ниже:

Имя проекта	*Global Automatic*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц измерения	*USA*
Тип задачи	*Внутренняя; Исключить полости без условий течения*
Физические модели	*Гравитация; по умолчанию (Y компонента: -32.1850394 ft/s^2)*
Текучая среда по умолчанию	*Air, Chlorine*
Условия на стенках по умолчанию	*Адиабатическая стенка, гладкие стенки по умолчанию (шероховатость равна 0)*
Начальные условия	Начальные концентрации газов: *Air – 1, Chlorine - 0*

🕮 *При включении опции* ***Гравитация*** *необходимо учитывать, что гидростатическое давление рассчитывается в соответствии с глобальной системой координат:*
$P_{гидростат.} = \rho(g_x*x + g_y*y + g_z*z)$, *где* ρ *– характерная плотность,* g_i *- компоненты вектора гравитационного ускорения и x, y, z - координаты в глобальной системе координат.*

Задание граничных условий и настроек глобальной сетки

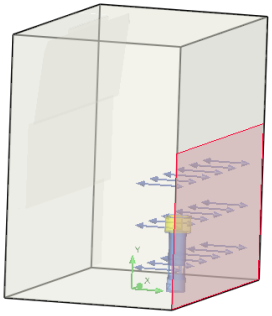
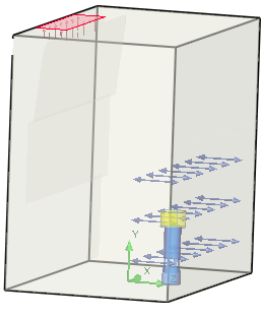
Сначала необходимо задать граничные условия, т.к. они влияют на автоматические настройки глобальной сетки: минимальный зазор определяется исходя из характерных размеров поверхностей, на которых задаются граничные условия.

📖 *FloEFD определяет минимальный зазор также исходя из размеров поверхностей, на которых задаются источники, вентиляторы и цели. Поэтому все условия рекомендуется задавать до начала редактирования настроек сетки.*

Задайте следующие настройки Глобальной сетки:

Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	3 *(по умолчанию)*
Минимальный зазор	*Определенный автоматически*
Другие опции по умолчанию	

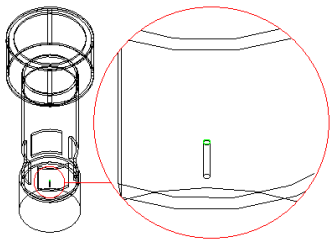
Два первых граничных условия задайте на входе и выходе вытяжного шкафа.

Граничное условие на входе	***Давление окружающей среды*** *Крышка, которая закрывает отверстие в корпусе (убедитесь, что выделена внутренняя поверхность крышки)* ***Давление окружающей среды*** *14.6959 lbf/in^2, газ – Air* ***Температура*** *68.09 °F*	
Граничное условие на выходе	**Объемный расход на выходе** *Крышка, которая закрывает вытяжку (убедитесь, что выделена внутренняя поверхность крышки)* ***Объемный расход*** *1000 ft^3/min*	

Кликните **Flow Analysis > Проект > Перестроение**.

Откройте диалоговое окно **Глобальная сетка** (в дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**). Обратите внимание, что **Минимальный зазор** , определенный автоматически, составляет 0.5 ft, что равно ширине отверстия на выходе. Кликните **Отмена**, чтобы закрыть это диалоговое окно.

В качестве следующего граничного условия зададим объемный расход хлора (Chlorine), поступающего в отверстие эжектора (компонент **Ejector**).

Граничное условие на входе	***Объемный расход на входе*** *Крышка, закрывающая отверстие в эжекторе, через которое подается хлор (убедитесь, что выбрана верхняя поверхность крышки)* ***Объемный расход*** *0.14 ft^3/min* ***Концентрации веществ****: Chlorine – 1; Air – 0*	

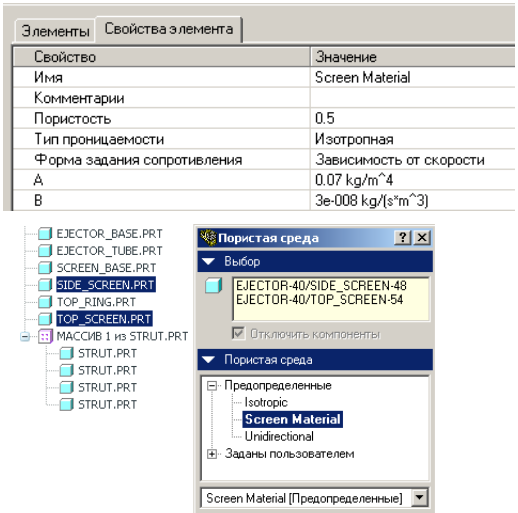
Кликните **Flow Analysis > Проект > Перестроение**.

Если Вы посмотрите на значение минимального зазора (в дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**), Вы увидите, что теперь **Минимальный зазор** составляет 0.00446 ft, что примерно равно диаметру отверстия в эжекторе.

🕮 *Задание минимального зазора влияет на расчетную сетку следующим образом: на минимальный зазор должно приходиться определенное количество ячеек. Чтобы это условие выполнялось, FloEFD устанавливает соответствующие параметры, определяющие сетку: число ячеек базовой сетки, уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели, разрешение каналов и т.д. Обратите внимание, что эти параметры применяются ко всей расчетной области, т.е. ко всем элементам с соответствующими геометрическими характеристиками.*

Т.к. минимальный зазор оказывает влияние на сетку внутри всей расчетной области, то большое различие в размерах всей модели и минимального зазора приведет к построению сетки с большим количеством ячеек. Подробно будет разрешена вся модель, а не только мелкие элементы. Т.е. будет образовано большое количество мелких ячеек в тех областях, где это не является необходимым. В результате требования памяти могут превысить доступные ресурсы компьютера. Более того, если соотношение между размерами модели и минимальным зазором превышает 1000, FloEFD не сможет корректно разрешить такую модель сеткой, сгенерированной в соответствии с автоматическими настройками.

Экраны эжектора являются пористыми телами. Поэтому необходимо создать пористую среду и задать ее в качестве материала верхнего и бокового экранов. Однако нужный материал уже существует в Инженерной базе данных. Поэтому Вы можете не создавать новую пористую среду, а при задании соответствующего условия выбрать материал "Screen Material" в группе Предопределенные Инженерной базы данных.

Пористая среда	***Материал экрана:*** *Пористость: 0.5,* *Тип проницаемости: Изотропная,* *Зависимость от скорости:* *A = 0.07 kg/m^4,* *B = 3e-008 kg/(s*m^3).* **Компоненты**: *Верхний экран TOP_SCREEN* *Боковой экран SIDE_SCREEN*	

Чтобы увидеть преимущества использования локальной сетки и опций дробления, необходимо сначала сгенерировать расчетную сетку с автоматическими настройками. Число ячеек автоматической сетки превысит 1 000 000, и памяти компьютера может быть недостаточно для завершения процесса генерации сетки (в этом случае появится соответствующее предупреждающее сообщение).

Задание минимального зазора

В данной модели можно условно выделить две части, которые существенно различаются по размеру:

- корпус, внутри которого находятся тонкие стенки, но нет мелких элементов,
- область эжектора, включающую множество мелких геометрических элементов.

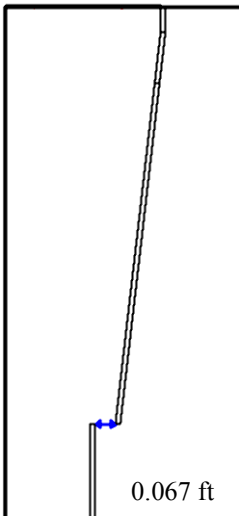
Для более подробного разрешения области эжектора требуется сетка с меньшим размером ячеек, чем для разрешения большей части модели. Однако необходимо учитывать, что область эжектора является частью всей расчетной области. Поэтому настройки сетки необходимо изменить таким образом, чтобы они применялись только к этой части модели.

Значение минимального зазора, которое автоматически определяется исходя из размеров верхнего и бокового экранов (компоненты **Top Screen** и **Side Screen**), мало, что может привести к чрезмерному разбиению сетки.

Чтобы определить подходящее значение минимального зазора, необходимо учесть следующее:

- заданные граничные условия;
- каналы, связывающие внутренний объем эжектора с остальной областью внутри корпуса;
- узкие проходные сечения между перегородками внутри корпуса.

Внимательно изучив модель, можно сделать вывод, что минимальным зазором является зазор между средней и верхней перегородками корпуса. Чтобы избежать чрезмерного разбиения сетки, такое же значение необходимо задать для минимальной толщины стенки.

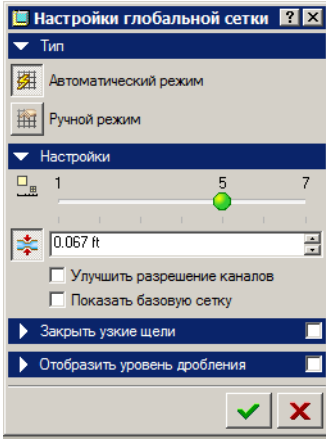


1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

2 В группе **Настройки** с помощью слайдера установите **Уровень начальной сетки** равным `5`.

3 Нажмите кнопку **Минимальный зазор** и введите значение `0.067 ft`.

4 Кликните **OK** .

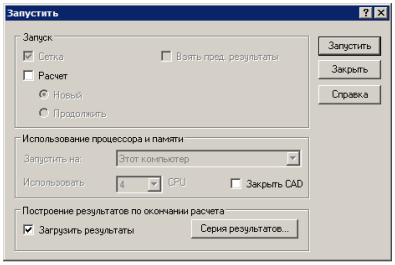


Чтобы запустить генерацию сетки, выполните следующую последовательность действий:

1 Кликните **Flow Analysis > Запустить**

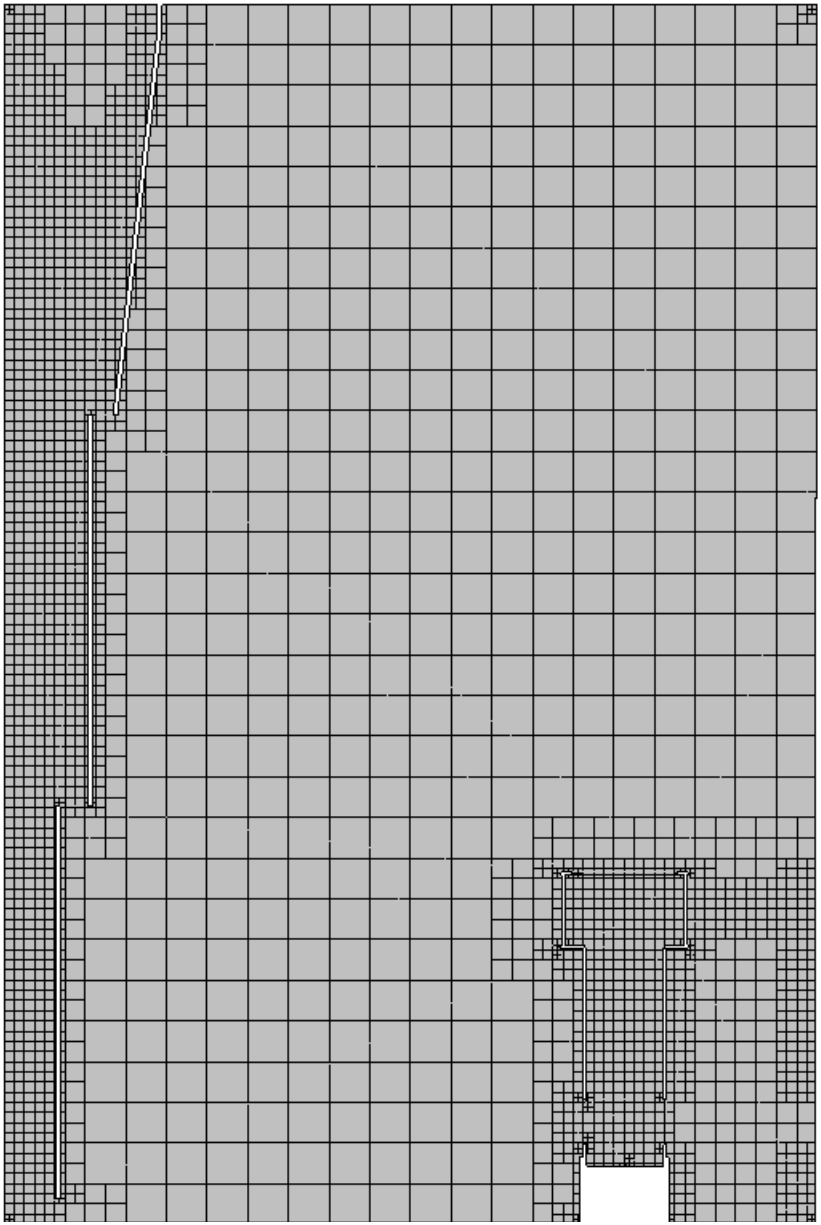
2 Снимите галочку **Расчет**, чтобы была выполнена только генерация сетки.

3 Кликните **Запустить**.



После окончания генерации сетки отобразите ее на **Картине в сечении** в плоскости ASM_RIGHT. Для этого в диалоговом окне **Картина в сечении** необходимо включить опцию **Сетка** в группе **Показать**.

Получившаяся в результате сетка имеет значительно меньше ячеек, чем та, что была сгенерирована с автоматически определенными **Минимальным зазором**. Общее число ячеек теперь составляет примерно 325 000.



Настройка сетки вручную

Использование сетки более высокого уровня позволило значительно сократить число ячеек и при этом более подробно разрешить области с мелкими геометрическими элементами. Однако в некоторых областях наличие подробной сетки не оправдано, т.к. здесь не наблюдается резкого изменения параметров течения, т.е. поля течений в этих областях не оказывают существенного влияния на решение. Число ячеек можно сократить, если отключить автоматические настройки сетки и задать их вручную. Это позволит освободить память компьютера, необходимую для подробного разрешения области эжектора.

Кликните **Flow Analysis > Проект > Перестроение**.

Кликните **Flow Analysis > Проект > Клонировать проект** и введите имя проекта: `Global Manual`.

1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

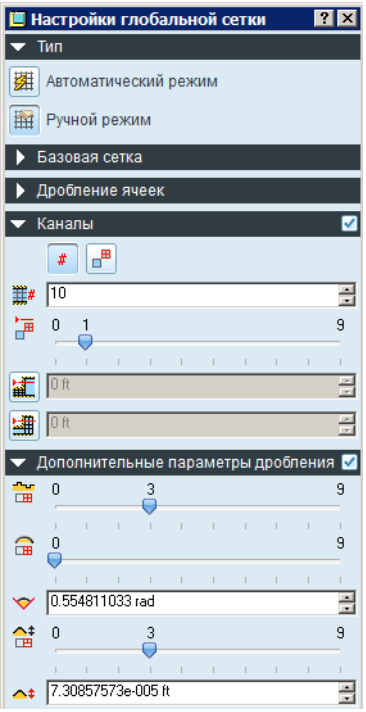
2 В группе **Тип** выберите **Ручной режим** .

3 В группе **Базовая сетка** Вы можете отредактировать базовую сетку с помощью задания **Контрольных плоскостей**.

🕮 *Расчет начинается с построения начальной сетки. Начальная сетка строится на основе **Базовой** сетки путем дробления ячеек в соответствии с заданными настройками. Базовая сетка строится за счет разбиения расчетной области на части с помощью параллельных плоскостей, ортогональных осям глобальной системы координат. Если включена опция адаптации сетки к решению, в процессе расчета могут происходить дополнительные дробления начальной сетки.*

По умолчанию параметры начальной сетки устанавливаются FloEFD в соответствии с ранее заданными автоматическими настройкам глобальной сетки, включая **Минимальный зазор.**

1 В группе **Каналы** и установите **Максимальный уровень дробления каналов** равным 1. Это позволит уменьшить число ячеек в каналах между перегородками и стенкой корпуса (компонент **Box**).

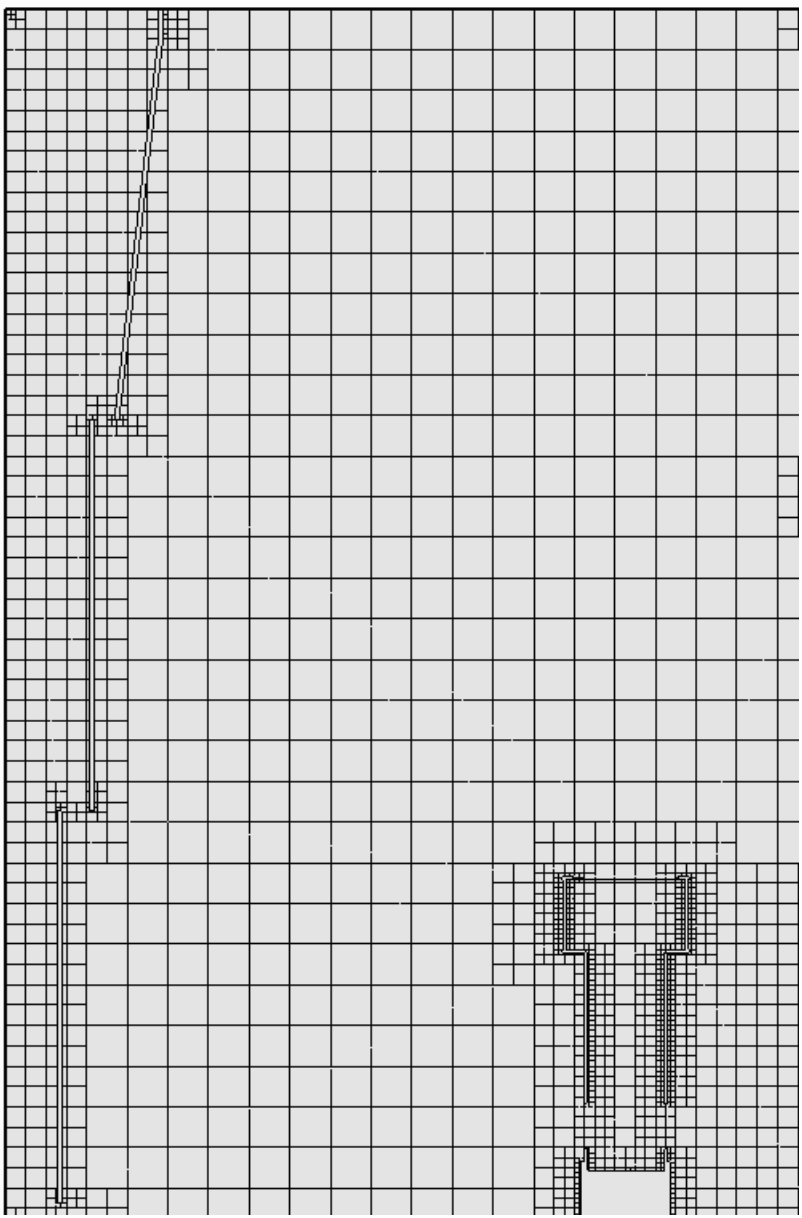


📖 ***Максимальный уровень дробления каналов*** *определяет наименьший размер ячеек в проточных сечениях модели в соответствии с размером ячеек базовой сетки. Т.е., если* ***Максимальный уровень дробления каналов*** *обозначить как N = 0…9, то размер ячеек, получающихся в результате дробления, в* 2^N *раз (в каждом направлении глобальной системы координат или в* 8^N *раз в объеме) меньше размера ячейки базовой сетки.*

2 В группе **Дополнительные параметры дробления** установите **Уровень разрешения сеткой выступов поверхности** равным 3. Это позволит уменьшить число ячеек на границе твердого тела с текучей средой.

Снова запустите генерацию сетки (без дальнейшего расчета).

Получившаяся в результате сетка показана ниже. Число ячеек в ней составляет примерно 96 000.



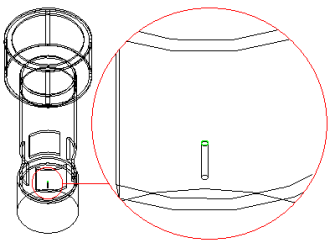
Применение опции локальная сетка

Область эжектора разрешена достаточно подробно, однако на поверхности отверстия, через которое поступает хлор, сетка должна быть еще более плотной. Это важно для корректного учета заданного граничного условия. В этом случае необходимо воспользоваться опцией **Локальная сетка**.

Эта опция позволяет задавать настройки сетки для локальных подобластей в расчетной области. Таким образом, в этих областях можно более подробно разрешить геометрию модели и/или особенности течения. Локальная область может быть задана каким-либо компонентом модели (если он относится к области текучей среды, его необходимо отключить в диалоговом окне **Управление компонентами**), а также с помощью поверхностей, кромок или вершин модели. Настройки локальной сетки применяются ко всем ячейкам, которые пересекаются этими компонентами, поверхностями, кромками, а также внутри которых находятся указанные вершины.

Кликните **Flow Analysis > Проект > Клонировать проект** и введите имя проекта: `Local Mesh 1`.

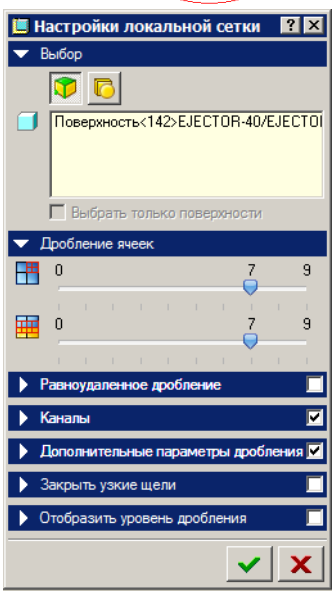
1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка** и из контекстного меню выберите **Добавить локальную сетку**.



2 Выберите поверхность отверстия в эжекторе, через которое поступает хлор, или в дереве проекта FloEFD выделите граничное условие **Объемный расход на входе 1**.

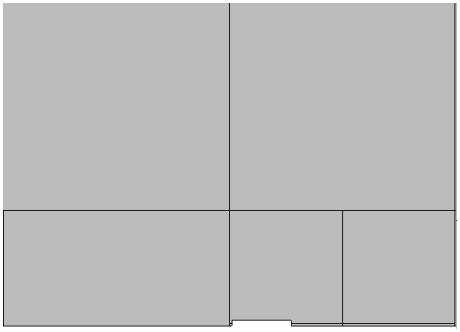
3 В группе **Дробление ячеек** с помощью слайдера установите **Уровень дробления ячеек в текучей среде** и **Уровень дробления ячеек на границе раздела твердого тела с текучей средой** равными 7.

4 Кликните **OK** .

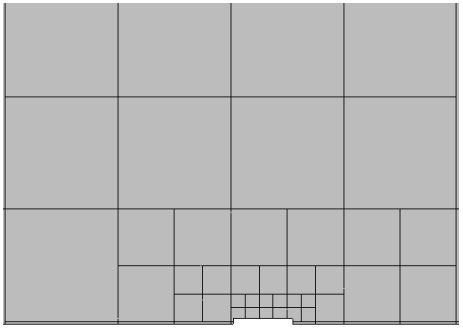


Снова запустите генерацию сетки.

Заданное условие обеспечило дробление всех ячеек вблизи поверхности отверстия эжектора до максимального уровня. Результат локального дробления сетки показан ниже.



До задания локальной сетки



После задания локальной сетки

Задание контрольных плоскостей

Генерируемая расчетная сетка во многом зависит от базовой сетки. Поэтому для получения оптимальной сетки необходимо, чтобы базовая сетка была соответствующей.

Вы можете управлять базовой сеткой различными способами:

- изменять число ячеек базовой сетки вдоль осей X, Y и Z.
- сдвигать существующие контрольные плоскости базовой сетки или добавлять новые.
- увеличивать или уменьшать ячейки базовой сетки в локальных областях с помощью изменения расстояния между контрольными плоскостями.

🕮 *Настройки локальной сетки не влияют на базовую сетку, но все уровни дробления устанавливаются относительно ячеек базовой сетки.*

Можно заметить, что рассматриваемая поверхность эжектора разбита на ячейки несимметрично. Это может повлиять на корректность учета заданного граничного условия. Чтобы граница между ячейками проходила через центр данной поверхности, необходимо создать дополнительную контрольную плоскость.

Кликните **Flow Analysis > Проект > Клонировать проект** и введите имя проекта: `Control Planes`.

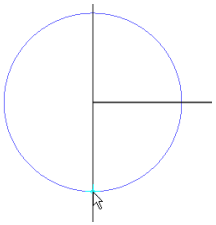
1 Чтобы отобразить только контуры модели, на панели инструментов **Изображение модели** кликните **Стиль показа > Каркас** . При таком режиме проще выбирать мелкие геометрические элементы.

2 В диалоговом окне **Глобальная сетка** в группе **Базовая сетка** нажмите кнопку **Контрольные плоскости**.

3 В нижней части экрана появится панель **Контрольные плоскости**.

4 На панели инструментов нажмите кнопки **Зависимость** и **Координата Z** .

5 Приблизьте изображение в область отверстия в эжекторе. В графической области выберите одну из вершин кромки поверхности этого отверстия, на которой задано граничное условие. Контрольная плоскость будет проходить через середину кромки параллельно выбранной плоскости в глобальной системе координат.



Убедитесь, что значение смещения вдоль оси Z, которое появилось в списке **Контрольные плоскости**, равно 0.703125 ft. Если это не так, то Вы неверно выбрали геометрический элемент. В таком случае правой кнопкой мыши кликните в таблице **Контрольные плоскости** и нажмите кнопку **Удалить**, затем попытайтесь выбрать нужную поверхность снова.

6 Кликните **OK**. В таблице **Контрольные плоскости** появится контрольная плоскость **Z1**.

🕮 *До того, как запустить проект на расчет, Вы можете отобразить базовую сетку. Чтобы это сделать, в диалоговом окне* ***Глобальная сетка*** *включите опцию* ***Показать*** *в группе* ***Базовая сетка****.*

7 Кликните **OK** , чтобы сохранить изменения и закрыть диалоговое окно **Глобальная сетка**.

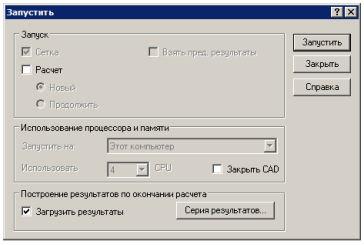
Теперь необходимо сгенерировать начальную сетку, чтобы проверить, были ли разрешены тонкие стенки и другие геометрические элементы.

1 Кликните **Flow Analysis > Расчет > Запустить**.

2 Снимите галочку **Расчет**, чтобы была выполнена только генерация сетки.

3 Снимите галочку **Загрузить результаты**.

4 Нажмите кнопку **Запустить**.



Теперь рассмотрим получившуюся в результате начальную расчетную сетку. Сначала настроим опцию FloEFD по отображению результатов на использование сеточной геометрии вместо геометрии модели.

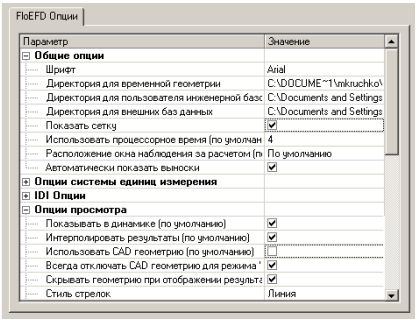
По умолчанию FloEFD отображает результаты в соответствии с геометрией модели. В зависимости от того, насколько подробно модель была разрешена расчетной сеткой, действительная геометрия модели может отличаться от геометрии, использованной в расчете. Для отображения действительной геометрии модели существует опция **Использовать CAD геометрию**.

1 Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Опции**

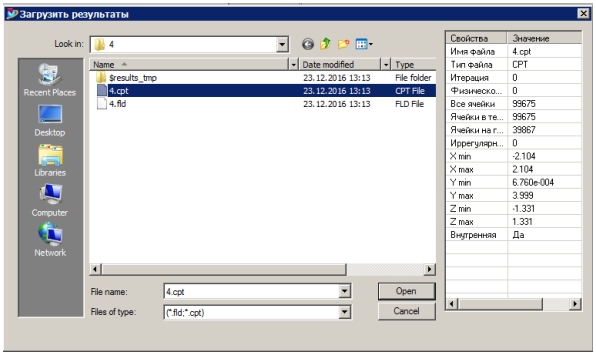
2 На вкладке **FloEFD Опции** в группе **Общие опции** поставьте галочку **Показать сетку**.

3 В группе **Опции просмотра** снимите галочку **Использовать CAD геометрию (по умолчанию)**.

4 Кликните **OK**.



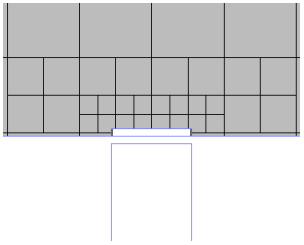
Затем загрузите файл с начальной расчетной сеткой: правой кнопкой кликните по иконке **Результаты** и выберите **Загрузить результаты**, затем выберите файл **1.cpt** и кликните **Открыть**. Обратите внимание, что общее число ячеек составляет примерно 100 000.

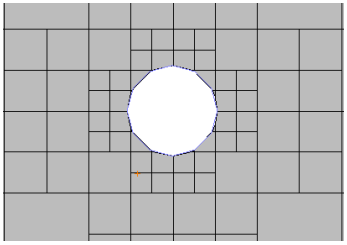


Результаты расчета сохраняются в файлы .fld. Начальная сетка сохраняется отдельно в файлах .cpt. Необходимые данные солвера хранятся в файле .cfld. Все эти файлы хранятся в папке проекта. Имя папки устанавливается FloEFD, и его не следует менять.

Создайте картину в сечении в плоскости ASM_RIGHT. Включите опцию **Генерация сетки**. Создайте вторую картину в сечении. В качестве поверхности выберите поверхность эжектора, через которую поступает хлор, и задайте значение **Смещения** от этой поверхности равным -0.00015 ft. Остальные настройки оставьте такими же, как в первом случае.

Теперь Вы видите, что была сгенерирована сетка, симметричная относительно центра поверхности отверстия в эжекторе.





Создание второй локальной сетки

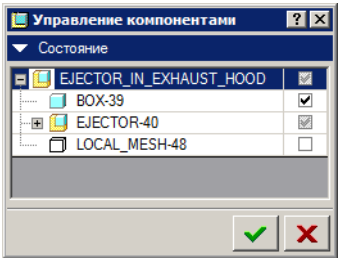
Заданные настройки сетки позволили добиться подробного разрешения геометрии эжектора. Однако, помимо мелких геометрических элементов, необходимо учитывать также особенности потока. В данной задаче хлор поступает во внутреннее пространство эжектора тонкой струей. Поэтому область внутри эжектора должна быть также тщательно разрешена. Чтобы обеспечить дополнительное дробление сетки в этой области и избежать при этом чрезмерного разбиения ячеек в других областях модели, необходимо воспользоваться опцией локальная сетка. Для задания локальной сетки был специально создан компонент, окружающий область эжектора.

Кликните **Flow Analysis > Проект > Клонировать проект** и введите имя проекта: `Local Mesh 2`.

Высветите подавленный компонент **LOCAL_MESH**. В предупреждающем сообщении FloEFD кликните **Закрыть**. Обратите внимание, что границы этого компонента находятся на небольшом расстоянии от границ эжектора. Такое расположение дополнительного компонента является необходимым, т.к. локальные настройки применяются только к тем ячейкам, центр которых лежит внутри выбранного элемента модели.

После активирования компонента **LOCAL_MESH** появляется сообщение, предупреждающее о том, что поверхность, на которой задано условие Объемный расход на входе, не лежит на границе между телом и областью текучей среды. Эта ошибка исчезает после отключения соответствующего компонента в диалоговом окне **Управление компонентами**, (т.е. этот компонент будет относиться к области текучей среды).

Кликните **Flow Analysis > Управление компонентами** и отключите компонент **LOCAL_MESH-48**. Кликните **OK**.



Выполните перестроение проекта с помощью **Flow Analysis > Проект > Перестроение**.

Теперь необходимо задать настройки локальной сетки в области эжектора.

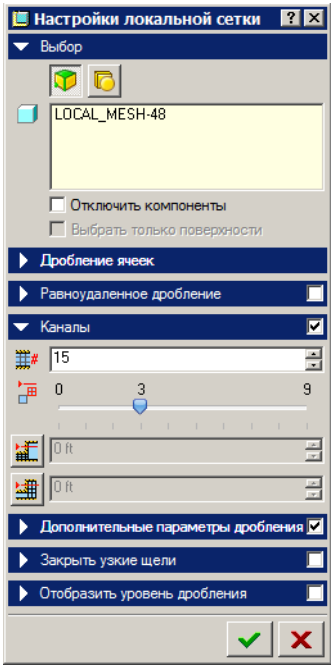
1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка** и из контекстного меню выберите **Добавить локальную сетку**

2 В дереве модели выберите компонент **LOCAL_MESH** .

3 В группе **Каналы** задайте **Характерное число ячеек поперек канала** равным `15`.

4 С помощью слайдера установите **Максимальный уровень дробления каналов** равным `3`.

5 Кликните **OK** .

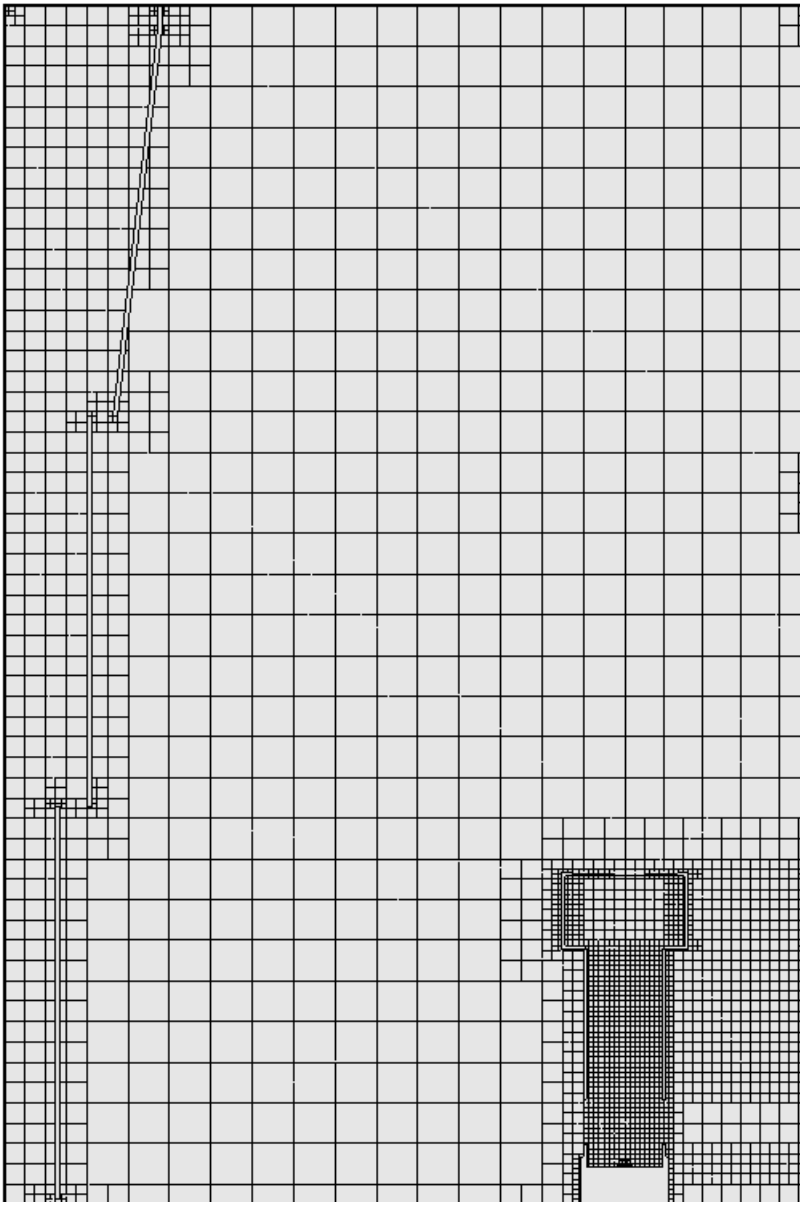


📖 *От настроек, задаваемых на вкладке **Каналы**, зависит дробление сетки в проточных сечениях модели. **Характерное число ячеек поперек канала** определяет, сколько ячеек начальной сетки (включая частичные ячейки) будет установлено поперек проточных сечений модели в направлении по нормали к поверхности раздела твердых тел с текучей средой. Число ячеек поперек канала должно быть близко или равно этому значению. Ячейки в этом направлении будут дробиться до тех пор, пока заданное условие не будет выполнено.*

Перестройте проект и снова запустите генерацию сетки.

Чтобы скрыть модель, на панели инструментов **FloEFD** или на вкладке **Flow Analysis > Результаты** ленты инструментов кликните **Геометрия** , затем в дереве модели выберите `EJECTOR.ASM` и `LOCAL_MESH.PRT`, кликните правой кнопкой мыши и из контекстного меню выберите **Скрыть**.

На рисунке ниже показана окончательная сетка. После всех изменений, внесенных в настройки сетки, число ячеек составило около 120 000. Это на порядок меньше числа ячеек сетки с автоматическими настройками. В первоначальной сетке количество ячеек превышало 1 000 000.



C

Уровень опытного пользователя

Уровень опытного пользователя включает примеры, которые демонстрируют, как можно использовать различные элементы FloEFD для решения практических инженерных задач. Предварительно рекомендуется выполнить примеры Базового уровня.

C1 - Применение "EFD масштабирования" (Application of EFD Zooming)

C2 - Текстильная машина (Textile Machine)

C3 - Течение неньютоновской жидкости в канале с массивом цилиндрических препятствий (Non-Newtonian Flow in a Channel with Cylinders)

C4 - Радиационный теплообмен (Radiative Heat Transfer)

C5 - Центробежный насос (Rotating Impeller)

C6 - Кулер процессора (CPU Cooler)

C7 - Маслоуловитель автомобиля (Oil Catch Can)

Уровень опытного пользователя:

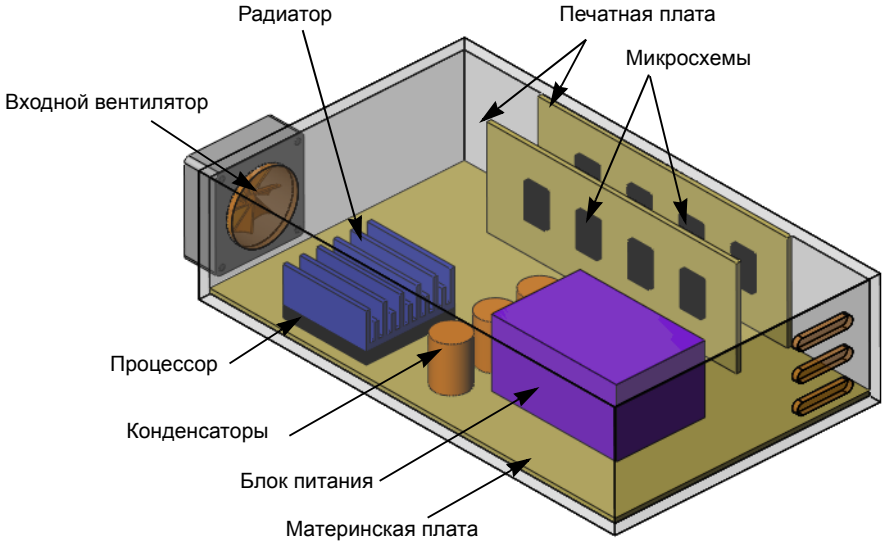
C1

Применение "EFD масштабирования"

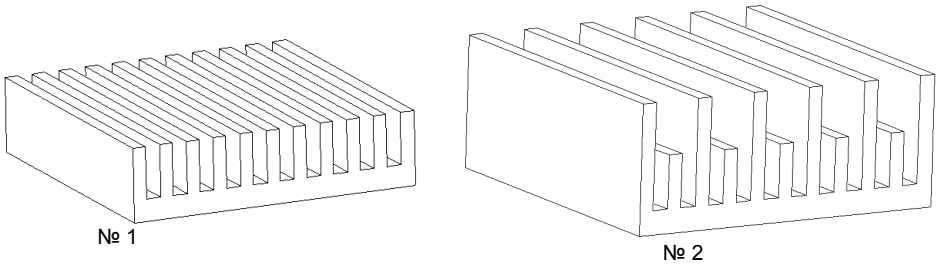
Постановка задачи

В данной задаче демонстрируются возможности FloEFD по использованию "EFD масштабирования". В качестве примера рассматривается следующая задача. Необходимо подобрать оптимальную конструкцию радиатора процессора, учитывая наличие в системном блоке других электронных компонентов.

На рисунке ниже показана трехмерная модель корпуса с электронными компонентами, включая оптимизируемый радиатор процессора. Вентилятор, установленный на входе, подает воздух сквозь корпус к отверстиям на выходе для охлаждения электронных компонентов (на которых находятся тепловые источники). Процессор размещен на материнской плате, выполненной из диэлектрика. Для лучшего охлаждения процессора на его противоположной поверхности установлен радиатор, который охлаждается потоком воздуха, создаваемым вентилятором.



Основной целью данного моделирования является определение температуры процессора при использовании двух различных конструкций радиатора (остальные условия остаются прежними). В результате будет получена разница в охлаждающей способности рассматриваемых форм радиаторов.



Конструкции радиатора (№ 1 и № 2)

Модель системного блока была предварительно упрощена, т.е. все компоненты, кроме радиатора процессора, были заданы без учета мелких деталей. Это связано с тем, что они не оказывают влияния на температуру процессора, которая является целью расчета. Конструкции радиатора, напротив, отличаются большим количеством тонких ребер (толщиной 0,1") и тонких каналов между ними (ширина зазора равна 0,1").

В FloEFD существуют два подхода к решению данной задачи.

Первый и более явный прямой путь заключается в следующем: рассчитывается все течение внутри корпуса; для построения подробной расчетной сетки в каналах и на тонких ребрах радиатора к каждой его конструкции применяется опция **Локальная сетка**. Включена опция **Теплопроводность в твердых телах**.

Второй путь ("EFD масштабирование" с использованием **Перенесенного граничного условия**) включает в себя два этапа:

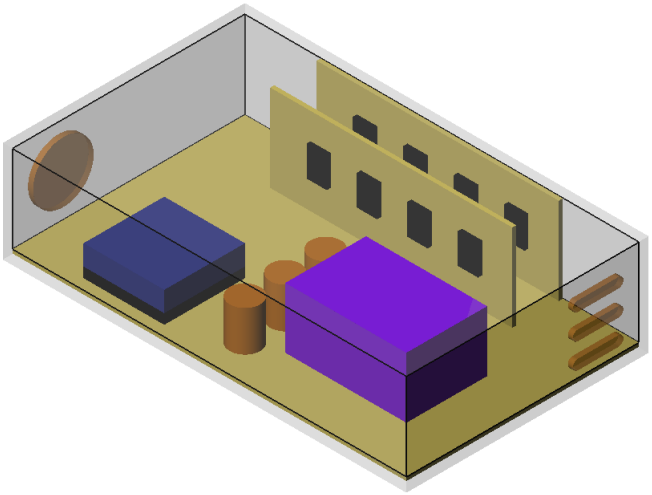
1. расчет всего течения внутри системного блока с низким уровнем начальной сетки, мелкие части радиатора остаются без дополнительного разрешения (модель радиатора упрощена и представлена в форме параллелепипеда). Опция **Теплопроводность в твердых телах** отключена;
2. расчет течения через реальный радиатор. Расчетная область уменьшена до небольших размеров вокруг процессора с радиатором; в качестве граничных условий используются результаты первого этапа расчета (применяется опция **Перенесенное граничное условие**); для разрешения каналов и тонких ребер радиатора задана подробная расчетная сетка; опция **Теплопроводность в твердых телах** включена.
   Первый этап расчета выполняется один раз, и его результаты используются для второго этапа, проводимого для каждой конструкции радиатора.

Подход "EFD масштабирования" к решению задачи

Начнем со второго способа решения данной задачи ("EFD масштабирование"), в котором применяется опция **Перенесенное граничное условие**. Затем для проверки правильности полученных результатов, решим задачу первым способом с применением опции **Локальная сетка**.

Первый этап "EFD масштабирования"

Так как первый этап "EFD масштабирования" предназначен для расчета течения внутри системного блока, в этом случае нет необходимости рассчитывать течение внутри радиатора. Поэтому в сборке модели реберные элементы радиатора деактивированы, и вместо реального радиатора представлена упрощенная модель в форме параллелепипеда.



Упрощенная модель радиатора на первом этапе "EFD масштабирования".

Упрощение модели и использование локальной сетки позволяет рассчитать течение внутри системного блока с более низким уровнем начальной сетки (в данном случае 4), а также не менять автоматически заданные значения минимального зазора и минимальной толщины стенки. Кроме того, на этом этапе нет необходимости рассчитывать теплопроводность в твердых телах, т.к. температура процессора здесь не определяется. Чтобы смоделировать нагрев потока воздуха в системном блоке, зададим поверхностные тепловые источники с одинаковой мощностью тепловыделения (5W) на поверхностях процессора и радиатора (представленного в форме параллелепипеда), а также микросхем (в задаче они тоже нагреваются). Это не является обязательным, но отключение теплопроводности в твердых телах на этом этапе сэкономит ресурсы компьютера. В результате на решение задачи потребуется гораздо меньше памяти и процессорного времени.

Проект для первого этапа "EFD масштабирования"

Открытие модели

Скопируйте папку **C1 - EFD Zooming** в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные. Откройте сборку **enclosure_assembly.asm**. В диалоговом окне **Выбрать экземпляр** выберите экземпляр **GLOBAL**. Обратите внимание, что прорези в радиаторе (компонент **HEATSINK_NO1_SC.PRT**) деактивированы, поэтому он выглядит как параллелепипед.

📖 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **enclosure_assembly.asm**, расположенную в папке **C1 - EFD Zooming\Ready To Run**, и запустить на расчет нужные проекты.*

Создание проекта FloEFD

Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как показано ниже:

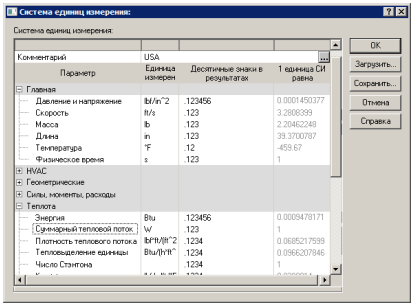
Имя проекта	*Zoom – Global – L4*
Имя конфигурации	*GLOBAL*
Система единиц измерения	*USA*
Тип задачи	*Внутренняя; Исключить полости без условий течения*
Физические модели	*Физических моделей не выбрано*
Текучая среда по умолчанию	*Air*
Условия на стенках по умолчанию	*Адиабатическая стенка (шероховатость по умолчанию равна 0)*
Начальные условия	*Условия по умолчанию*

Задание системы единиц измерения

После прохождения Мастера проекта скорректируем систему единиц измерения.

1 Кликните **Flow Analysis > Единицы измерения**.

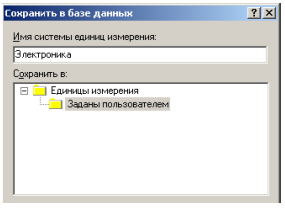
*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Проект > Единицы измерения.***



2 Для параметра **Длина** задайте **Inch**, а для параметра **Суммарный тепловой поток и мощность** - **Watt**.

3 Кликните **Сохранить**.

4 В диалоговом окне **Сохранить в базе данных** раскройте группу **Единицы измерения** и выберите элемент **Заданы пользователем**.



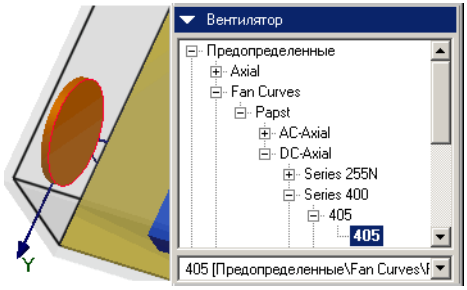
5 Присвойте новой системе единиц измерения имя `Электроника`.

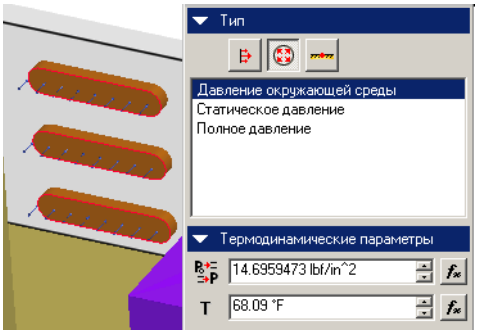
6 Кликните **OK**, чтобы вернуться в диалоговое окно **Система единиц измерения**.

7 Кликните **OK**.

Задание граничных условий

На входе зададим условие Входной внешний вентилятор, а на трех выходах - Давление окружающей среды. Для более детального объяснения задания этих условий Вы можете обратиться к примеру **Сопряженный теплообмен**.

Граничное условие на входе	***Входной внешний вентилятор**: Предопределенные\Fan Curves\ PAPST\ DC-Axial\ Series 400\ 405\ 405 с настройками по умолчанию (внешнее давление 14.6959 lbf/in^2, температура 68.09 °F), задается на крышке на входе (компонент **INLET_LID**);*	

Граничное условие на выходе	***Давление окружающей среды**:* *Термодинамические параметры по умолчанию (внешнее давление 14.6959 lbf/in^2, температура 68.09 °F), задается на крышках на выходе (компоненты **OUTLET_LID**s).*	

Задание тепловых источников

Для того, чтобы смоделировать нагрев потока воздуха в системном блоке, задаем поверхностные тепловые источники с одинаковой мощностью тепловыделения (5W) на поверхностях процессора, радиатора (упрощенной формы) и микросхем. До тех пор, пока в проекте не рассматривается теплопроводность в твердых телах, поверхностный тепловой источник применяется только к поверхностям, контактирующим с текучей средой.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхностный тепловой источник**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > Поверхностный тепловой источник**.*

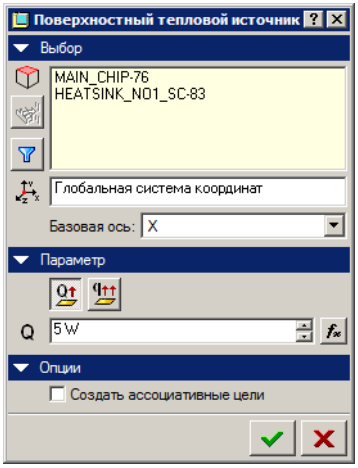
2 В дереве модели выберите радиатор и процессор (компоненты **HEATSINK_NO1_SC** и **MAIN_CHIP**).

Выбранные компоненты появятся в списке **Поверхностей для задания поверхностного теплового источника** .

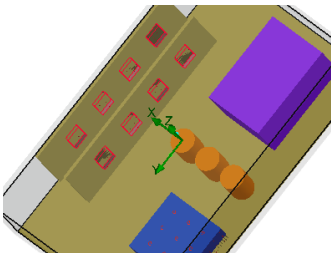
3 В группе **Параметр** введите значение **Мощности тепловыделения** Q , равное 5 W.

Заданное на тепловом источнике значение (Тепловая мощность) распределяется между выбранными поверхностями пропорционально их площадям.

4 Кликните **OK** .

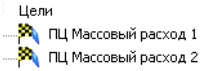


Выполняя тот же порядок действий, создайте тепловой источник мощностью 5 W на поверхностях микросхем, контактирующих с текучей средой.



Задание целей

На входе и выходе задайте поверхностные цели по массовому расходу.



Задание настроек сетки

Для этого проекта будем использовать автоматическую глобальную сетку и расчетную область, определенную по умолчанию.

Задайте следующие настройки глобальной сетки:

Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	4
Другие опции по умолчанию	

Запуск расчета

Запустите расчет. После того как расчет завершится, Вы можете приступить ко второму этапу "EFD масштабированию".

Сохраните модель.

Второй этап "EFD масштабирования"

Целью второго этапа "EFD масштабирования" является расчет температуры процессора. Течение через радиатор рассчитывается в уменьшенной расчетной области вокруг процессора с радиатором. В качестве граничных условий используются результаты первого этапа расчета, для чего применяется опция **Перенесенное граничное условие**. Для расчета температуры твердых тел необходимо включить опцию **Теплопроводность в твердых телах**. Так как на данном этапе расчетная область существенно уменьшена, то даже при учете теплопроводности в твердых телах в каналах и на тонких ребрах радиатора может быть построена подробная расчетная сетка с допустимым числом ячеек.

Проект для второго этапа "EFD масштабирования"

Открытие модели

Активируйте конфигурацию (экземпляр) **SINK_1_ZOOM**.

Создание проекта FloEFD

Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как показано ниже:

Имя проекта	*Zoom – Sink 1 – L4*
Имя конфигурации	*SINK_1_ZOOM*
Система единиц измерения	*Электроника*
Тип задачи	*Внутренняя*
Физические модели	*Включена теплопроводность в твердых телах*
Текучая среда по умолчанию	*Air*
Материал по умолчанию	*Metals/Aluminum*
Условия на стенках по умолчанию	*Адиабатическая стенка (шероховатость по умолчанию равна 0)*
Начальные условия	*Начальные условия по умолчанию (в частности, начальная температура твердого тела 68.09°F)*

Далее необходимо уменьшить расчетную область, чтобы выполнить "EFD масштабирование".

Настройка расчетной области

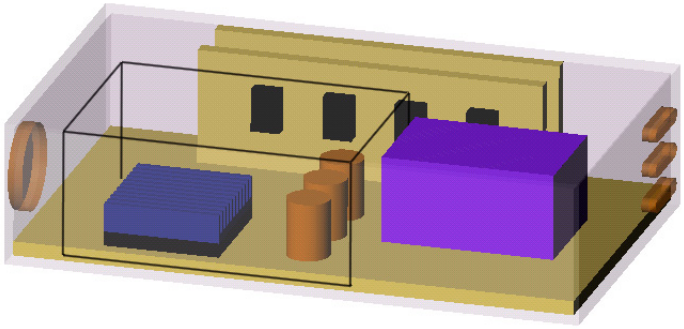
При уменьшении расчетной области для целей "EFD масштабирования" необходимо учесть, что результаты, полученные на первом этапе расчета, будут использоваться в качестве граничных условий для новой области. Поэтому, чтобы на втором этапе получить достоверные результаты, необходимо задать границы расчетной области (ограничить ее плоскостями, параллельными плоскостям X, Y и Z глобальной системы координат) так, чтобы они удовлетворяли следующим условиям:

1. взятые из первого этапа расчета параметры течения и твердого тела на этих границах должны быть максимально однородными;
2. границы не должны лежать слишком близко к интересующему нас объекту, т.е. процессору с радиатором, т.к. на первом этапе расчета мелкие детали радиатора не были разрешены. Расчетная область должна быть достаточно большой для того, чтобы исключить влияние более сложных элементов радиатора;

3 перенесенные или заданные граничные условия должны соответствовать постановке задачи (например, если в рассматриваемой задаче материнская плата выполнена из теплопроводного материала, нельзя исключать ее из границ расчетной области, т.к. это приведет к неправильному расчету значения теплового потока от процессора через материнскую плату).

В этом проекте задаются следующие границы расчетной области, удовлетворяющие перечисленным выше требованиям. Правой кнопкой мыши кликните по иконке **Расчетная область** и из контекстного меню выберите **Изменить** и измените размеры расчетной области так, как показано ниже:

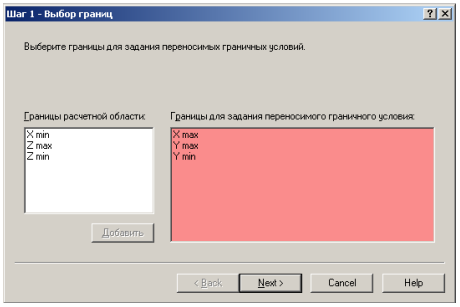
- X_{max} = 0.7 in (условия, заданные на этой границе с областью текучей среды, являются перенесенными из результатов первого этапа расчета; такие же условия, как на X_{min} = -2.95 in, автоматически генерируются на верхней границе, лежащей внутри алюминиевой стенки корпуса; условия, соответствующие Z_{min} = -1.1 in, автоматически генерируются на нижней границе, лежащей внутри материнской платы),
- X_{min} = -2.95 in (эта граница полностью лежит внутри боковой стенки корпуса, выполненной из алюминия, однако это не влияет на температуру процессора, т.к. он отделен от корпуса теплоизолирующей материнской платой и прослойкой воздуха; в качестве граничного условия здесь автоматически задается температура 68.09 °F, которая выступает в качестве начального условия для всех твердых тел),
- Y_{max} = 4 in, Y_{min} = -1 in (здесь условия задаются так же, как и на X_{max} = 0.7 in, а также, как на границе, лежащей внутри алюминиевой стенки корпуса),
- Z_{max} = 1.2 in (эта граница полностью лежит внутри верхней алюминиевой стенки корпуса, поэтому здесь автоматически генерируется такое же условие, как на Xmin = -2.95 in),
- Z_{min} = -1.1 in (эта граница полностью лежит внутри теплоизолирующей материнской платы, поэтому здесь автоматически генерируется условие адиабатическая стенка).



Уменьшенная расчетная область.

Задание перенесенных граничных условий

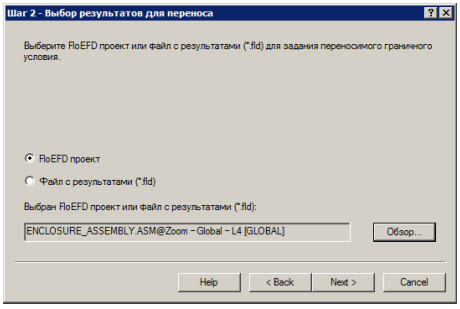
1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Перенесенное граничное условие**.



2 В список **Границы для задания переносимого граничного условия** добавьте следующие **Границы расчетной области**: **Xmax**, **Ymax** и **Ymin**. Для того, чтобы добавить границу в список, выберите ее и кликните **Добавить** или дважды кликните по выбранной границе.

3 Кликните **Далее**.

4 На **Шаге 2** кликните **Обзор** для выбора проекта FloEFD, результаты которого будут использованы в качестве граничных условий для проекта **Zoom – Sink 1 – L4** project.

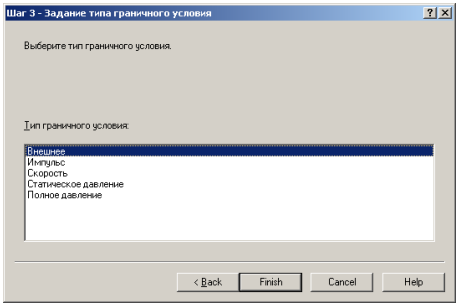


🕮 *Вы можете выбрать проект любой загруженной модели или найти файл с результатами (.fld).*

5 В диалоговом окне **Выбор проекта** выберите проект **Zoom – Global – L4** и кликните **OK**.

6 Кликните **Далее**.

7 На **Шаге 3** в качестве **Типа граничного условия** выберите **Внешнее**.

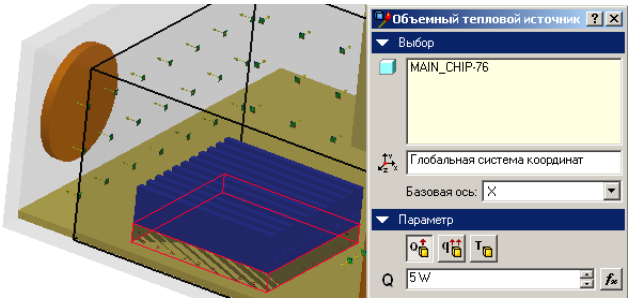


🕮 *Внешнее граничное условие состоит из заданных (взятых из предыдущего расчета) параметров течения на границе с текучей средой, таким образом они будут влиять на расчет примерно так же, как внешние условия во внешней задаче.*

8 Кликните **Завершить**.

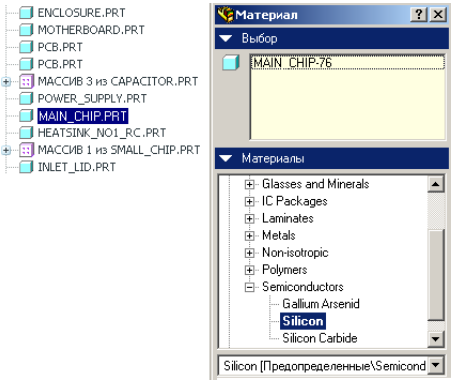
Задание тепловых источников

На процессоре задайте Объемный тепловой источник с мощностью тепловыделения 5W.

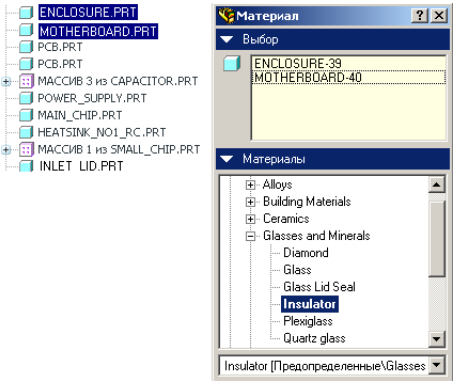


Задание материалов

a) Процессор (компонент **MAIN_CHIP**) выполнен из кремния (Предопределенные/Semiconductors/ Silicon);



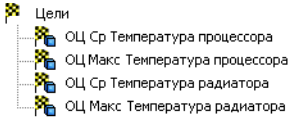
b) Материнская плата и корпус (компоненты **MOTHERBOARD** и **ENCLOSURE**) выполнены из изолятора (Предопределенные/Glasses & Minerals/Insulator);



c) остальные компоненты (например, радиатор) изготовлены из алюминия (aluminum).

Задание целей

Задайте Объемные цели по максимальной и средней температуре процессора (Main Chip) и радиатора (Heat Sink).



Задание настроек сетки

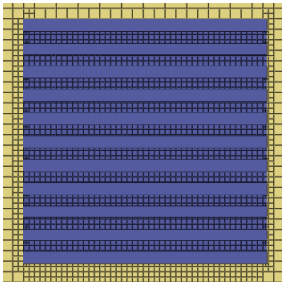
В данном случае используется автоматическая глобальная сетка, **Уровень начальной сетки** установлен в положение 4, но в отличие от первого этапа расчета для подробного разрешения элементов радиатора вручную задан **Минимальный зазор** `0.1`".

Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	`4`
Минимальный зазор	`0.1 in`
Другие опции по умолчанию	

Запуск расчета

Запустите расчет. Полученные результаты представлены в таблицах и на рисунках ниже. Эти результаты соответствуют решению задачи с использованием радиатора конструкции №1.

Если Вы обратите внимание на расчетную сетку, Вы увидите, что в ней имеется по две ячейки поперек каждого канала радиатора и по две ячейки на каждое его ребро.



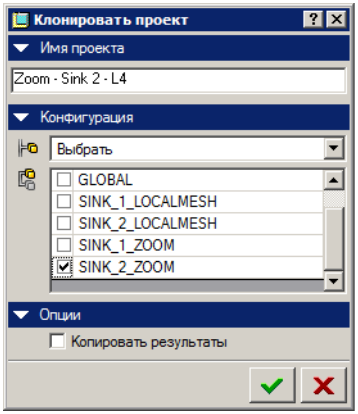
Сетка в области радиатора №1 на расстоянии *Y=-0.3"* от плоскости сечения.

Переключение конфигурации радиатора

Проверим, как на результаты расчета влияет использование радиатора конструкции №2. Для этого меняем используемую конфигурацию радиатора на конфигурацию №2, при этом все остальные настройки второго этапа "EFD масштабирования" в проекте FloEFD оставляем неизменными.

Самый простой путь для создания такого же проекта FloEFD в новой конфигурации модели - склонировать существующий проект в новую конфигурацию.

Клонирование проекта в существующую конфигурацию



1 Кликните **Flow Analysis > Проект > Клонировать проект**.

2 В поле **Имя проекта** введите `Zoom - Sink 2 - L4`.

3 В списке **Конфигурация, в которую необходимо добавить проект** выберите **Выбрать**.

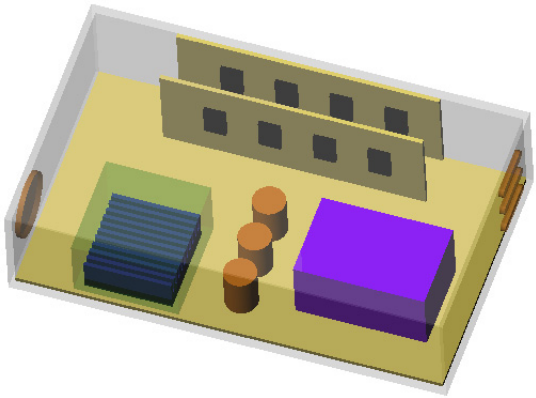
4 В списке **Конфигурации** выберите **SINK_2_ZOOM**.

Кликните **OK**. После того, как Вы нажмете OK, появятся два сообщения с вопросами о восстановлении расчетной области и о перестроении расчетной сетки. В первом сообщении нажмите **Нет**, чтобы не перестраивать расчетную сетку, а во втором - **Да**, чтобы перестроить сетку.

Полученные результаты представлены в таблицах и на рисунках в конце данного примера. Видно, что вследствие использования другой конструкции радиатора температура процессора снизилась почти на 15 °F. Это вызвано тем, что возросла площадь ребер радиатора и увеличилась интенсивность течения в каналах между ребрами (в радиаторе конструкции №1 около половины каналов были заполнены зонами с обратным течением).

Прямой подход к решению задачи

Для того, чтобы проверить, насколько достоверными являются результаты, полученные с помощью "EFD масштабирования", решим ту же задачу с применением опции **Локальная сетка**. Чтобы использовать эту опцию, в сборку модели добавляем новый элемент - параллелепипед, окружающий процессор, и деактивируем его в диалоговом окне **Управление компонентами**. Этот объем представляет собой область текучей среды, в которой можно задать отличные от всей расчетной области настройки сетки, используя опцию **Локальная сетка**.



Конфигурация с дополнительным элементом для задания локальной сетки.

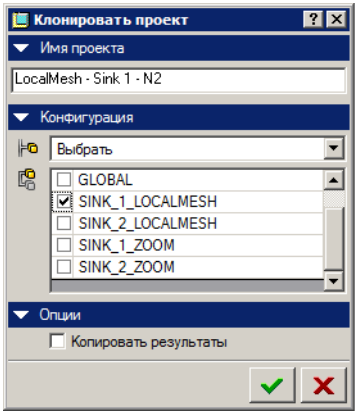
Проект FloEFD для прямого решения задачи (радиатор №1)

Чтобы в данном случае создать проект, клонируем проект **Zoom - Sink 1 - L4** в существующую конфигурацию **SINK_1_LOCALMESH**, но в отличие от предыдущего клонирования, восстанавливаем расчетную область до исходных размеров, так, чтобы она охватывала всю модель.

Активируйте проект **Zoom - Sink 1 - L4**.

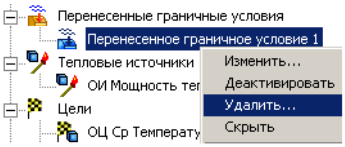
Откройте диалоговое окно **Клонировать проект**, в поле **Имя проекта** введите `LocalMesh - Sink 1 - N2`. В списке **Конфигурация, в которую необходимо добавить проект** выберите **Выбрать**. В списке **Конфигурации** выберите **SINK_1_LOCALMESH** в качестве конфигурации, в которую FloEFD склонирует проект.

Кликните **OK**, а затем в обоих появившихся сообщениях кликните **Да**.



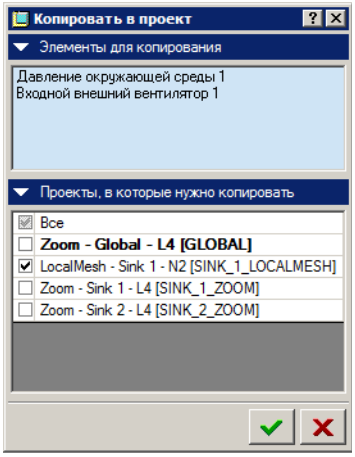
Задание граничных условий

Сначала удалите оставшееся перенесенное граничное условие. Для этого в дереве кликните правой кнопкой мыши на элементе **Перенесенное граничное условие** и из контекстного меню выберите **Удалить**.



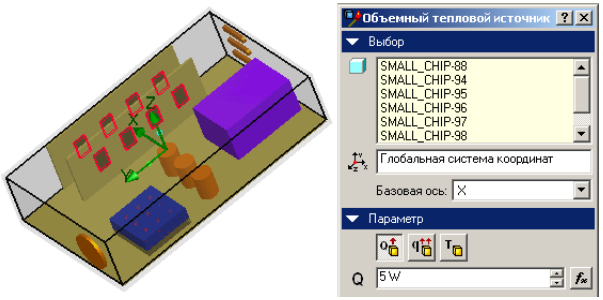
Затем с помощью инструмента **Копировать в проект** скопируйте граничные условия, заданные в проекте **Zoom - Global - L4**.

1. Активируйте проект **Zoom- Global - L4**.
2. Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Копировать в проект**. Откроется диалоговое окно **Копировать в проект**.
3. Удерживая нажатой клавишу **Ctrl**, в в дереве анализа FloEFD выберите граничные условия **Давление окружающей среды 1** и **Входной внешний вентилятор 1**. Выбранные элементы появятся в списке **Элементы для копирования**.
4. В списке **Проекты, в которые нужно копировать** выберите **LocalMesh - Sink 1 - N2**.
5. Кликните **OK** .
6. Активируйте проект **LocalMesh - Sink 1 - N2**.



Задание тепловых источников

К уже существующему объемному тепловому источнику с мощностью тепловыделения 5W, заданному на процессоре, добавьте объемный тепловой источник такой же мощности на всех микросхемах.



Задание материалов

Т.к. материалы были унаследованы из предыдущего проекта, нет необходимости создавать их заново, однако к материалу **Silicon Материал 1** нужно отнести еще и микросхемы, а к материалу **Insulator Материал 1** - крышки на входном и выходных отверстиях:

a) процессор (компонент **MAIN_CHIP**) и микросхемы выполнены из кремния (silicon);

b) материнская плата, корпус, крышки на ходе и выходе (компоненты **MOTHERBOARD**, **ENCLOSURE**, **INLET_LID** и **OUTLET_LID**s) выполнены из изолятора (insulator);

c) обе печатные платы (компоненты **PCB)**выполнены из созданного пользователем материала **Печатная плата**, который был добавлен в инженерную базу данных в примере **A2 - Сопряженный Теплообмен**.

d) остальные части выполнены из алюминия (aluminum).

Задание целей

Изменение склонированных объемных целей по максимальной и средней температуре процессора и радиатора не требуется.

Изменение уровня начальной сетки

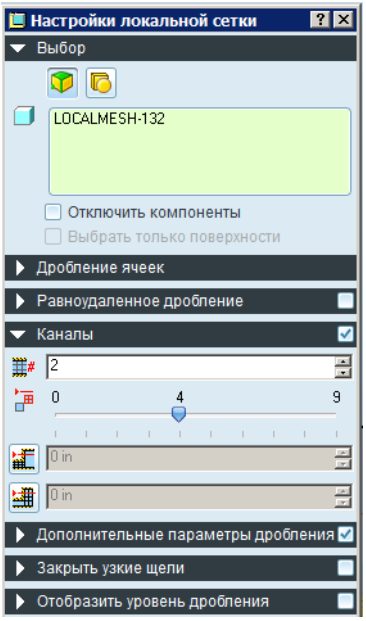
В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

Установите **Уровень начальной сетки** в положение 3. При включенной теплопроводности в твердых телах задание четвертого **Уровня начальной сетки** совместно с настройками локальной сетки приведет к образованию большого числа ячеек, в результате чего возрастет процессорное время расчета задачи. Для того, чтобы уменьшить процессорное время, снижаем **Уровень начальной сетки** до 3.

Кликните **Flow Analysis > Проект > Перестроение**.

Задание настроек локальной сетки

Для того, чтобы применить настройки локальной сетки к какой-либо области, необходимо деактивировать соответствующий этой области компонент в диалоговом окне **Управление компонентами**.



🕮 *Кроме того, отключить компонент можно в диалоговом окне **Настройки локальной сетки** с помощью опции **Отключить компоненты**.*

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Локальная сетка**.

2 в дереве модели выберите компонент **LocalMesh**.

3 В группе **Каналы** задайте **Характерное число ячеек поперек канала** равным *2*, а **Максимальный уровень дробления каналов** равным*4*.

🕮 *Термин **Каналы** является общепринятым и используется для определения проточных сечений, построенных по нормали к поверхности раздела твердых тел с текучей средой. Процедура дробления сетки будет применяться к каждому проточному сечению, находящемуся в расчетной области, если Вы не установите для FloEFD условие не дробить проточные сечения определенного размера (это задается с помощью опций **Минимальная ширина канала** и **Максимальная ширина канала**). **Характерное число ячеек поперек канала** (обозначим его как **Nc**) и **Максимальный уровень дробления каналов** (обозначим его как **L**) влияют на сетку в каналах следующим образом: базовая сетка в каналах будет дробиться так, чтобы обеспечить число ячеек **Nc** поперек канала, но до тех пор, пока получающиеся в результате ячейки будут удовлетворять значению **L**. Другими словами, каким бы ни было заданное значение **Nc**, ячейки в канале не могут быть в 8^L раз (2^L в каждом направлении глобальной системы координат) меньше, чем ячейки базовой сетки. Это необходимо для того, чтобы избежать нежелательного дробления сетки в слишком узких каналах, т.к. это может привести к образованию чрезвычайно большого числа ячеек.*

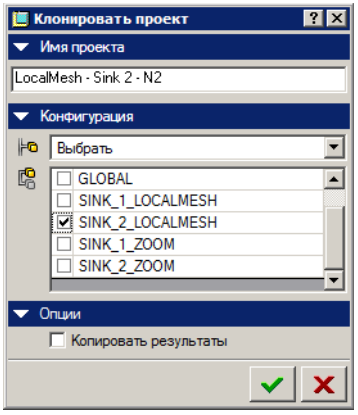
4 Кликните **OK** .

В данном случае для того, чтобы обеспечить 2 ячейки поперек канала, увеличиваем **Максимальный уровень дробления каналов** до 4.
Эти настройки применяются как для первой, так и для второй конструкций радиатора.

Проект FloEFD для прямого решения задачи (радиатор №2)

Склонируйте активный проект **LocalMesh – Sink 1 – N2** в существующую конфигурацию (экземпляр) **SINK_2_LOCALMESH**. Присвойте новому проекту имя **LocalMesh - Sink 2 - N2**. При клонировании подтвердите сообщение о перестроении сетки.

Запустите на расчет оба проекта, используя опцию **Серия расчетов**.

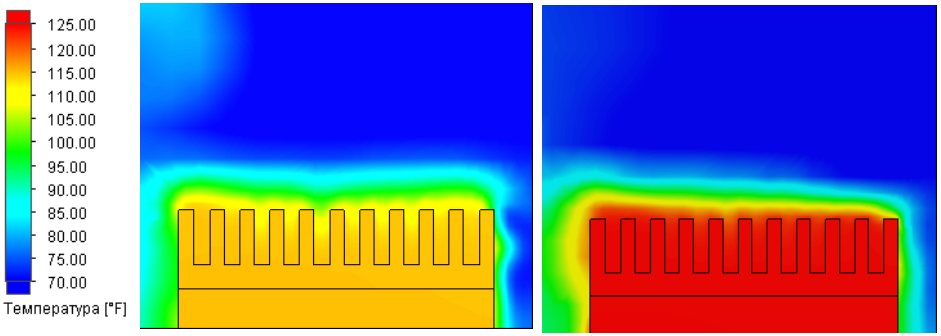


Результаты

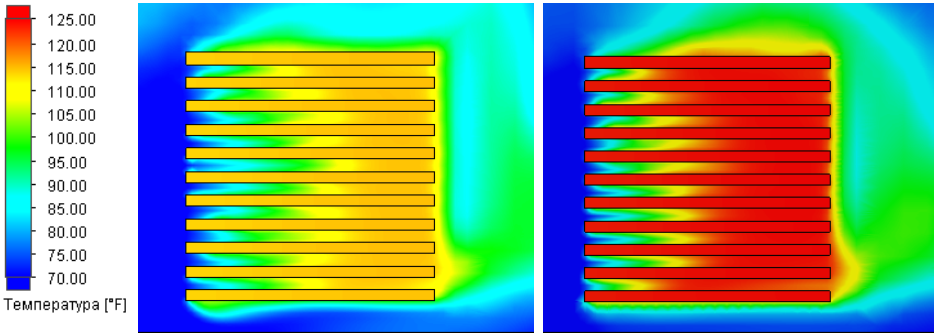
Ниже представлено сравнение результатов, полученных при решении задачи двумя способами. Как видно, результаты решения с помощью "EFD масштабирования" хорошо согласуются с результатами, полученными в расчете с настройками локальной сетки.

Параметр		Радиатор №1		Радиатор №2	
		Zoom	LocalMesh	Zoom	LocalMesh
Процессор	$t_{макс}$, °F	114,5	126,1	100,6	107,9
	$t_{ср}$, °F	114,1	125,7	100,3	107,6
Радиатор	$t_{макс}$, °F	114,4	126,0	100,5	107,9
	$t_{ср}$, °F	114,0	125,6	100,1	107,4

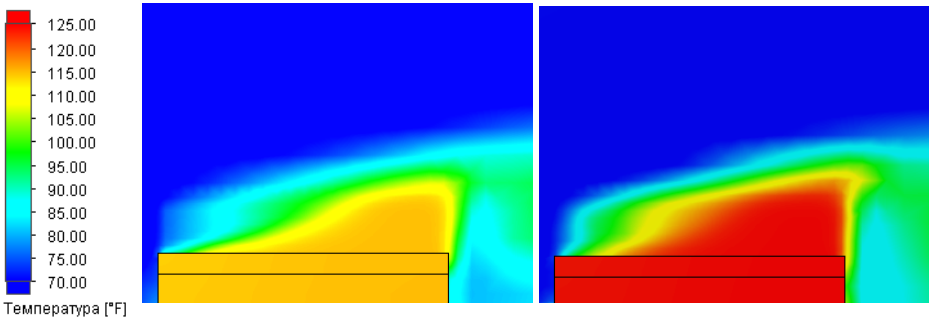
Способ с использованием "EFD масштабирования"	Способ с использованием локальной сетки



Распределение температуры в области радиатора №1 в сечении *Y=2.19"* (Плоскость ASM_TOP): способ с использованием "EFD масштабирование" (слева) и способ с использованием локальной сетки (справа).

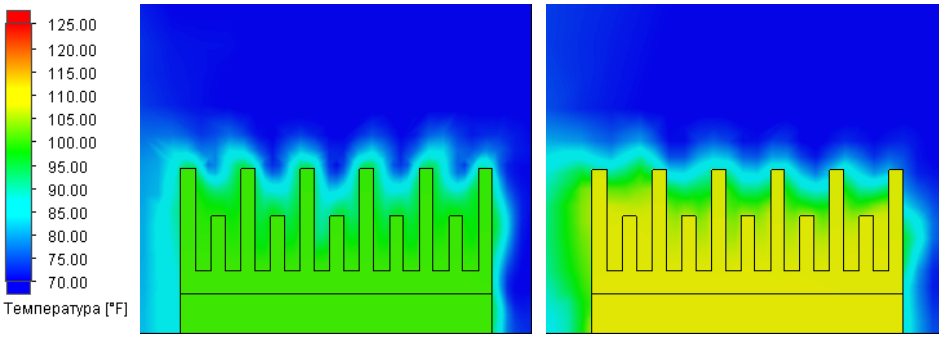


Распределение температуры в области радиатора №1 в сечении *Z= -0.32"* (Плоскость ASM_FRONT): способ с использованием "EFD масштабирование" (слева) и способ с использованием локальной сетки (справа).

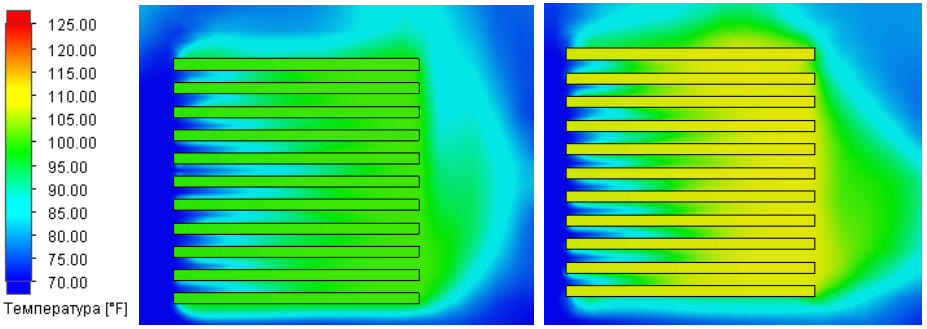


Распределение температуры в области радиатора №1в сечении *X= -1.53"* (Плоскость ASM_RIGHT): способ с использованием "EFD масштабирование" (слева) и способ с использованием локальной сетки (справа).

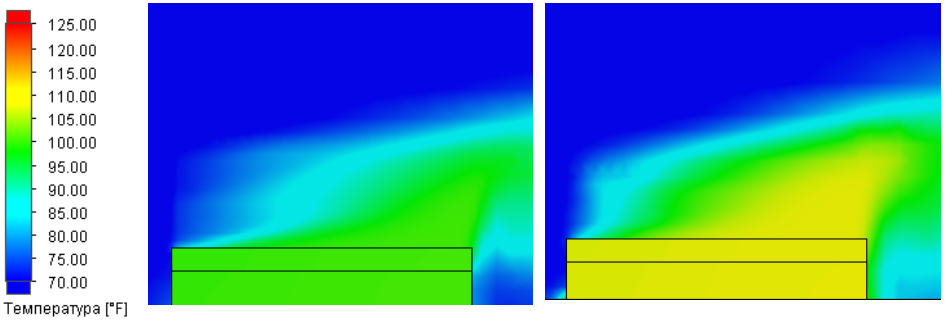
Способ с использованием "EFD масштабирования"	Способ с использованием локальной сетки



Распределение температуры в области радиатора №1 в сечении *Y=2.19"* (Плоскость ASM_TOP): способ с использованием "EFD масштабирование" (слева) и способ с использованием локальной сетки (справа).



Распределение температуры в области радиатора №1 в сечении *Z= -0.32"* (Плоскость ASM_FRONT): способ с использованием "EFD масштабирование" (слева) и способ с использованием локальной сетки (справа).



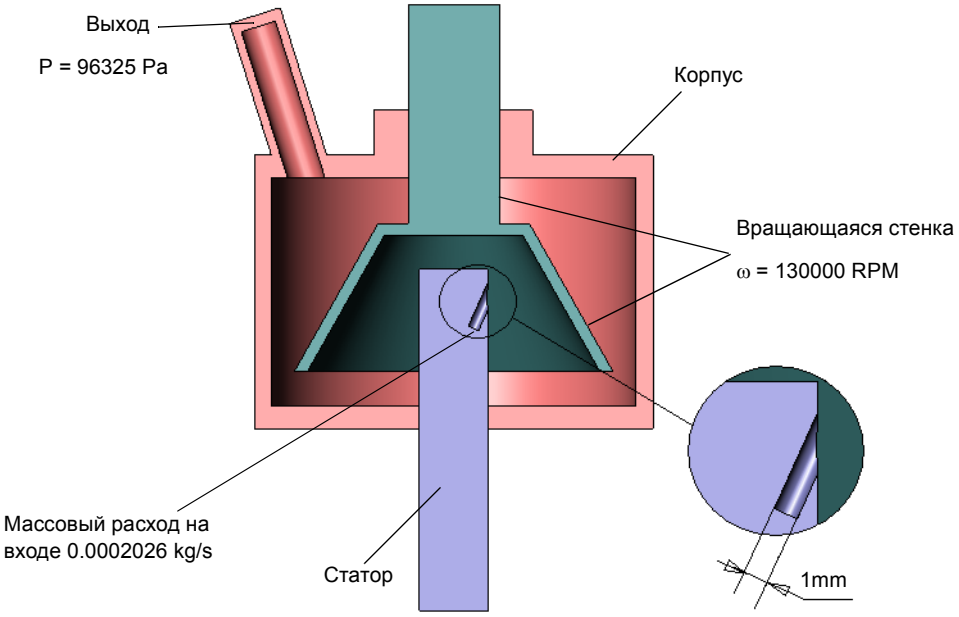
Распределение температуры в области радиатора №1в сечении *X= -1.53"* (плоскость ASM_RIGHT): способ с использованием "EFD масштабирование" (слева) и способ с использованием локальной сетки (справа).

C2

Текстильная машина

Постановка задачи

В данном примере моделируется работа текстильной машины. Конструкция машины упрощена и представляет собой замкнутый полый цилиндр, в котором находится цилиндрический статор с узким входным патрубком (см. рис. ниже). В корпус также входит устройство в виде тонкостенного конуса для наматывания волокна, которое вращается с очень высокой скоростью. Поток воздуха обтекает вращающийся конус, закручивается вследствие возникающих касательных напряжений и формирует правильное наматывание волокна, после чего поступает в выходной патрубок, находящийся в верхней части корпуса.



Внутренний диаметр полого цилиндра составляет 32 mm, внутренняя высота - 20 mm. Воздух с массовым расходом 0.0002026 kg/s поступает во входной патрубок диаметром 1 mm. Толщина стенки конуса равна 1 mm, а его кромка на 3 mm отстоит от нижней части цилиндра. Конус вращается со скоростью 130000 RPM. Статическое давление на выходе составляет 96325 Pa.

FloEFD моделирует поток воздуха без учета частиц волокна, так как их влияние на течение пренебрежимо мало. Для того, чтобы исследовать то, как течение воздействует на волокна, в поток воздуха вводятся мелкие частицы полистирола (с помощью постпроцессорного элемента **Траектории потока**). В качестве начального приближения задается тангенциальная скорость потока воздуха, равная 40 m/s, это позволяет увеличить скорость сходимости и уменьшить процессорное время расчета задачи.

Открытие модели

Скопируйте папку **C2 - Textile Machine** в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные. Откройте сборку **textile_machine.asm**.

🕮 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **textile_machine.asm** , расположенную в папке **C2 - Textile Machine\Ready To Run**, и запустить на расчет нужные проекты.*

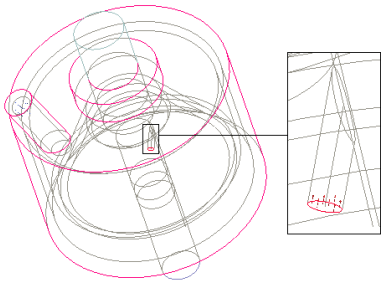
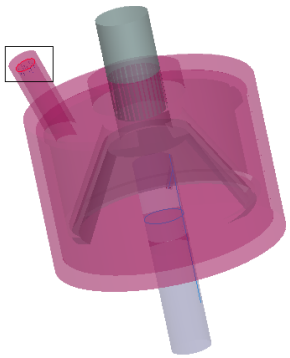
Создание проекта FloEFD

Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как показано ниже:

Имя проекта	*130000rpm*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц измерения	***SI**; для параметра **Длина** выберите **mm** (Millimeter), для параметра **Угловая скорость** выберите **RPM** (Rotations Per Minute - об/мин), для параметра **Массовый расход** в группе **Силы, моменты, расходы** выберите **kg/h** (кг/ч)*
Тип задачи	*Внутренняя; Исключить полости без условий течения*
Физические модели	*Физических моделей не выбрано*
Текучая среда по умолчанию	*Air*
Условия на стенках по умолчанию	*Адиабатическая стенка (шероховатость по умолчанию равна 0)*
Начальные условия	*Условия по умолчанию*

Задание граничных условий

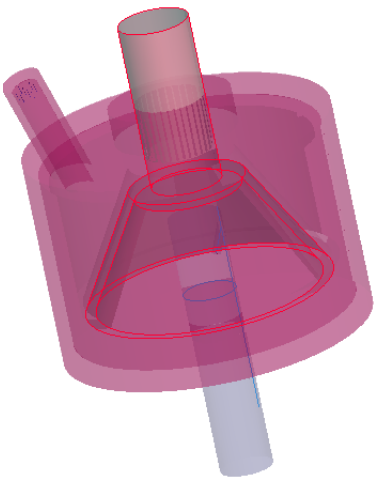
Задайте граничные условия на входе и выходе, как показано ниже:

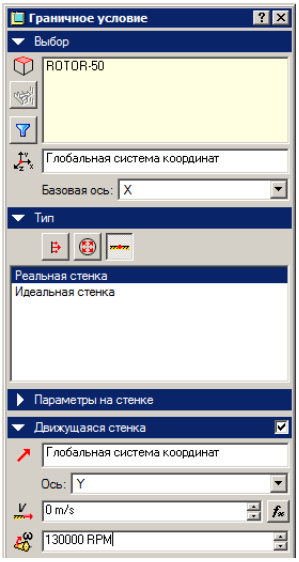
Граничное условие на входе	***Массовый расход на входе = 0.73 kg\h:*** *Массовый расход 0.73 kg/h по нормали к внутренней поверхности статора (компонент **STATOR**);*	
Граничное условие на выходе	**Статическое давление на выходе = 96325 Pa:** *Статическое давление 96325 Pa на внешней поверхности корпуса (компонент **HOUSING**) (другие параметры по умолчанию).*	

Задание вращающихся стенок

В FloEFD можно двумя способами смоделировать влияние вращающихся частей и компонентов на течение. Вы можете задать вращающуюся систему координат для выбранной области вращения, используя элемент **Область вращения**. Это позволит смоделировать вращение элементов сложной геометрии, таких как вентиляторы, насосные колеса, крыльчатки и т.д. В данном примере вращающийся компонент имеет довольно простую геометрию: все поверхности ротора текстильной машины представляют собой поверхности вращения - конус и цилиндр. Для таких компонентов более подходящим является граничное условие **Подвижная стенка**, которое в большинстве случаев позволяет получить более точные результаты.

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**.





2 Выберите **Стенка** , затем **Реальная стенка**.

3 В дереве модели выберите ротор (компонент **ROTOR**).

4 Поставьте галочку в группе **Движущаяся стенка**.

5 В качестве **Оси** вращения выберите **Y**.

6 Задайте значение **Угловой скорости** , равное 130000 RPM.

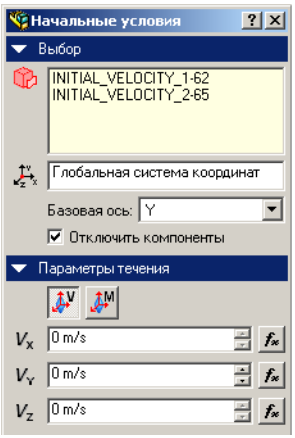
7 Кликните **OK** и измените имя элемента **Реальная стенка 1** на `Вращающаяся стенка = 130 000 rpm`.

Задание начальных условий

Для того, чтобы увеличить скорость сходимости, зададим начальное условие - тангенциальную скорость потока воздуха в корпусе, равную 40 m/s. Для задания области течение воспользуемся вспомогательными компонентами **INITIAL_VELOCITY_1** и **INITIAL_VELOCITY_2**.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Начальное условие**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > Начальное условие**.*



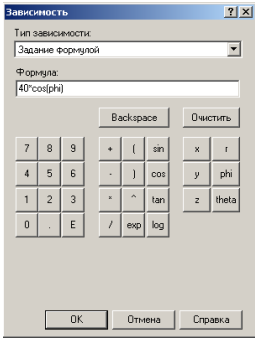
2 В дереве модели выберите компоненты **INITIAL_VELOCITY_1** и **INITIAL_VELOCITY_2**.

3 Включите опцию **Отключить компоненты**. FloEFD будет трактовать эти компоненты, как область текучей среды.

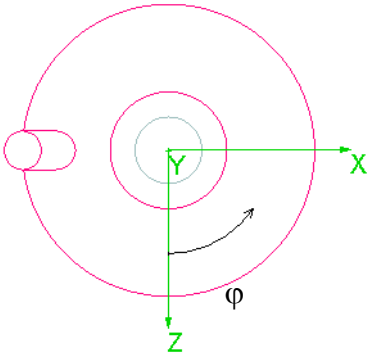
4 Из списка **Базовая ось** выберите **Y**.

5 В группе **Параметры течения** напротив параметра **Скорость в направлении X** нажмите кнопку **Зависимость** . Появится диалоговое окно **Зависимость**.

6 Из списка **Тип зависимости** выберите **Задание формулой**.



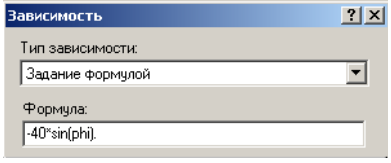
7 В поле **Формула** введите выражение для скорости в направлении X: `40*cos(phi)`.
Здесь **phi** - полярный угол φ (на рисунке ниже показано, как он определяется).



8 Кликните **OK**. Вы вернетесь в диалоговое окно **Начальное условие**.

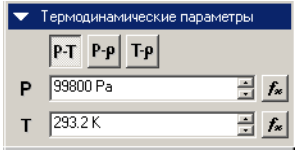
9 Кликните в поле **Скорость в направлении Z**.

10 Нажмите кнопку **Зависимость** и введите выражение для скорости в направлении Z: `-40*sin(phi)`.



11 Кликните **OK**.

12 В группе **Термодинамические параметры** задайте значение **Давления** **P** , равное `99800` Pa.



13 Кликните **OK** .

14 Дважды (через паузу) кликните по новому элементу **Начальное условие 1** и переименуйте его в `скорость = 40 m\s`.

Задание целей

Т.к. вращающийся конус закручивает поток воздуха, важно убедиться в том, что расчет завершится тогда, когда значение скорости сойдется. Для этого в качестве глобальной цели следует задать среднюю скорость потока воздуха. Кроме того, в качестве поверхностных целей зададим статическое давление на входе и массовый расход на выходе, которые послужат дополнительными критериями сходимости расчета

Задайте следующие цели:

ТИП ЦЕЛИ	ЗНАЧЕНИЕ ЦЕЛИ	ПОВЕРХНОСТЬ/КОМПОНЕНТ
Глобальная цель	Средняя скорость	
Поверхностная цель	Массовый расход	Поверхность выхода (чтобы выбрать поверхность выхода, выберите граничное условие **Статическое давление 1**)
Поверхностная цель	Среднее статическое давление	Поверхность входа (чтобы выбрать поверхность входа, выберите граничное условие **Массовый расход 1**)
Объемная цель	Средняя скорость	**INITIAL_VELOCITY_1** (выберите этот компонент в дереве модели)
Объемная цель	Средняя скорость	**INITIAL_VELOCITY_2** (выберите этот компонент в дереве модели)

Задание настроек глобальной сетки

Задайте следующие настройки глобальной сетки:

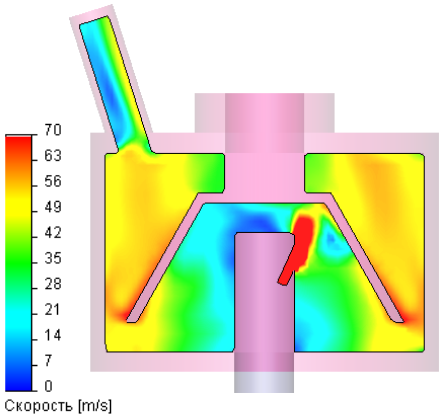
Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	4
Минимальный зазор	1 mm
Другие опции по умолчанию	

Запустите расчет.

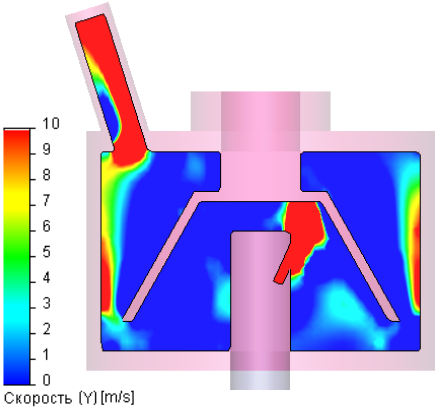
Результаты (гладкие стенки)

На рисунках ниже представлены поля скоростей (скорости потока и Y-компоненты скорости) в сечении Z = 0 (плоскость XY). Видно, что максимальная скорость потока достигается вблизи входого патрубка и вблизи внутренней поверхности нижней кромки вращающегося конуса.

Скорость в сечении Z = 0, плоскость XY (.



Скорость потока

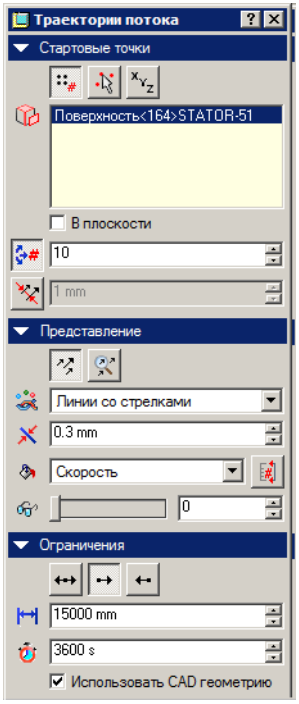


Y-компонента скорости потока

Скорость вдоль оси Y в области, близкой к внутренним и внешним поверхностям вращающегося конуса, направлена к нижней части цилиндра. В зазоре между вращающимся конусом и нижней частью цилиндра эта компонента скорости практически равна нулю, а в окрестности боковых стенок цилиндра положительна (т.е. направлена вверх). Вследствие малых значений Y-компоненты скорости, мелкие частицы, переносимые потоком воздуха в область между нижней кромкой конуса и нижней частью цилиндра, не могут ее покинуть. А частицы больше его размера, попадающие в эту область, отражаются от нижней стенки цилиндра (которая в данном примере является идеальной, т.е. рассматривается полное отражение), и возвращаются обратно в область высоких скоростей. Затем они переносятся потоком воздуха вдоль боковых стенок цилиндра к его верхней части, где остаются в области завихрения.

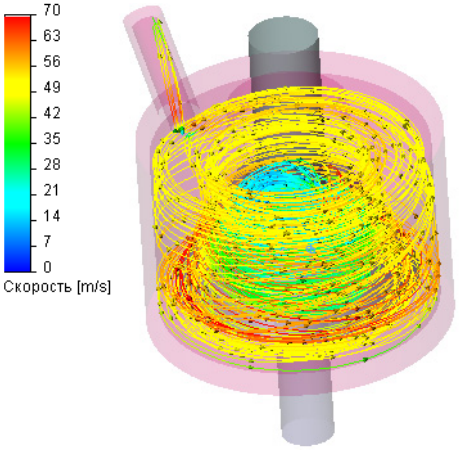
Отображение траекторий потока и траекторий движения частиц

1. В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши по элементу **Траектории потока** и из контекстного меню выберите **Добавить**.
2. В дереве анализа FloEFDвыберите граничное условие (**Массовый расход на входе = 0.73 kg\h**), чтобы выделить соответствующую поверхность.
3. Задайте **Количество точек** , равное `10`.
4. В группе **Представление** из списка **Показать траектории как** выберите **Линии со стрелками**, а из списка **Раскрасить по** выберите **Скорость**.
5. В группе **Ограничения** выберите направление **Вниз по потоку** и увеличьте значение **Максимальной длины** до `15 m`.



*Опция **Максимальная длина** ограничивает длину траекторий заданным значением. Здесь это значение было увеличено для того, чтобы лучше показать завихренность.*

6. Кликните **OK** , чтобы отобразить траектории потока.
7. Чтобы задать диапазон отображения параметра, в палитре выберите максимальное значение и в соответствующем поле введите значение `70 m/s`.

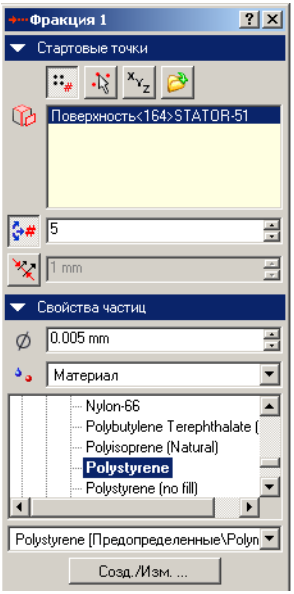


Для того, чтобы отобразить траектории движения частиц, необходимо задать начальные свойства частиц (температуру, скорость и диаметр), материал частиц и условие на стенках (поглощение или отражение).

1 В дереве анализа правой кнопкой мыши кликните по элементу **Расчеты движения частиц** и из контекстного меню выберите **Мастер проекта**.

2 Не меняя имени создаваемого Расчета движения частиц, кликните **Далее** .

3 В дереве анализа выберите граничное условие (**Массовый расход на входе = 0.73 kg\h**), чтобы выделить поверхность входа, откуда будут поступать частицы.



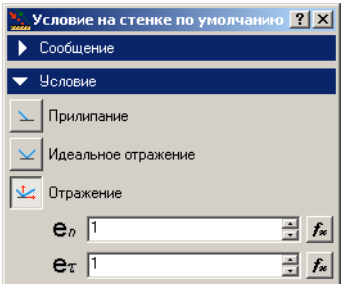
4 Задайте **Количество точек** , равное 5.

5 В группе **Свойства частиц** задайте значение **Диаметра** , равное `0.005 mm` и в качестве **Материала** (в списке рядом с этой иконкой выберите **Материал**) задайте **Polystyrene** (**Предопределенные**, **Polymers**).

Относительная скорость и температура частиц по умолчанию принимают нулевое значение, т.е. равны соответствующим параметрам входного потока. Не меняем эти настройки. Значение массового расхода также можно не изменять, т.к. оно используется только для оценки интенсивности эрозии или налипания, которые здесь не учитываются.

6 Дважды кликните **Далее** .

7 В качестве **Условия на стенке по умолчанию** выберите **Отражение**.



8 Кликните **Далее** .

9 На вкладке **Представление по умолчанию** из списка **Показать траектории как** выберите **Линии со стрелками**.

10 В группе **Ограничения** увеличьте значение **Максимальной длины** до `15 m`.

11 Кликните **OK** .В дереве анализа появляется новый элемент **Расчет движения частиц 1** с подэлементом (**Фракция 1**).

12 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Фракция 1** и из контекстного меню выберите **Клонировать**. Будет создан элемент **Фракция 2**. Для этого элемента измените размер частиц, увеличив их **Диаметр** до `0.015 mm`.

13 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Расчет движения частиц 1** и из контекстного меню выберите **Расчет**.

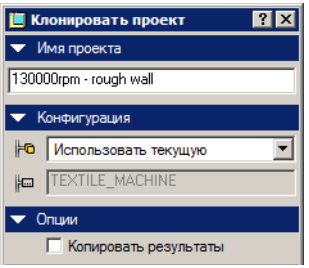
14 Для того, чтобы отобразить траектории движения частиц, кликните правой кнопкой мыши по элементу **Фракция 1** и из контекстного меню выберите **Показать**.

15 После того, как Вы закончите исследовать траектории частиц из **Фракции 1**, скройте этот элемент и отобразите траектории частиц из **Фракции 2**.

Моделирование шероховатых вращающихся стенок

В предыдущем расчете внешние и внутренние поверхности вращающегося конуса были заданы как гладкие. Чтобы исследовать то, как влияет на течение шероховатость стенок конуса, выполним еще один расчет, при этом зададим для внешних и внутренних поверхностей конуса шероховатость, равную 500 µm, а граничные условия оставим прежними.

Создайте новый проект, склонировав текущий проект в текущую конфигурацию. Присвойте ему имя `130000rpm - rough wall`.



Задание шероховатости стенок

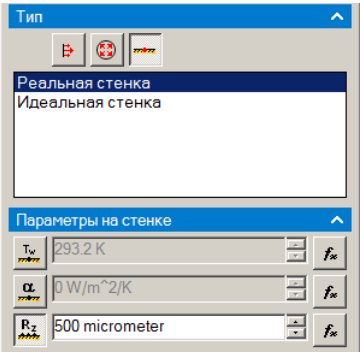
1 Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Вращающаяся стенка = 130 000 rpm** и из контекстного меню выберите **Изменить**.

2 В группе **Параметры на стенке** кликните **Задать шероховатость стенки** .

3 Введите значение шероховатости, равное `500 micrometers`.

4 Кликните **OK** .

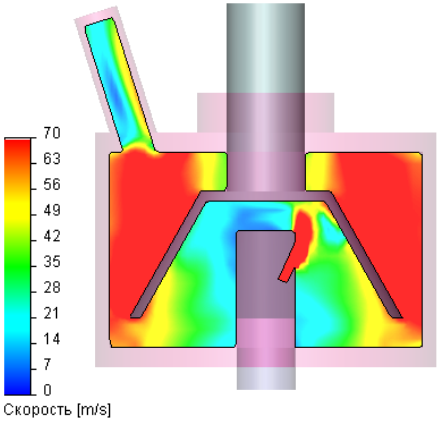
Запустите расчет.



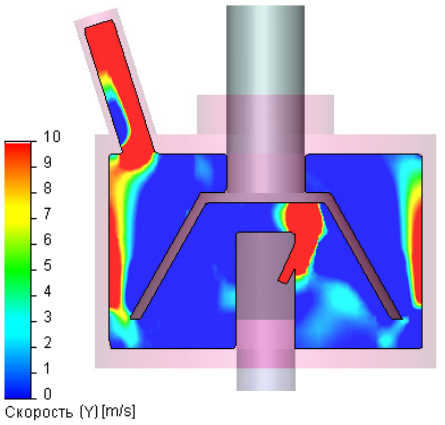
Результаты (шероховатые стенки)

На рисунках ниже показаны поля скоростей (скорости потока и Y-компоненты скорости) в различных сечениях. Как видно, Y-компонента скорости практически не изменилась по сравнению с предыдущим расчетом, т.е. траектории движения частиц остались прежними. Однако увеличение шероховатости с 0 до 500 μm привело к возрастанию тангенциальной скорости завихрения потока.

Скорость в сечении Z = 0, плоскость XY (шероховатость = 500 μm)

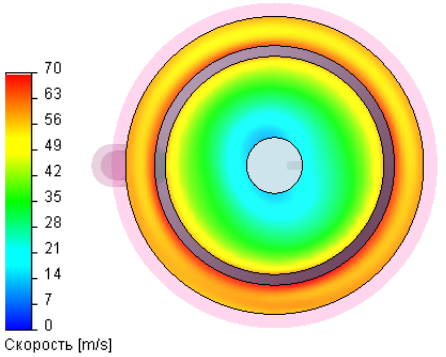


Скорость потока

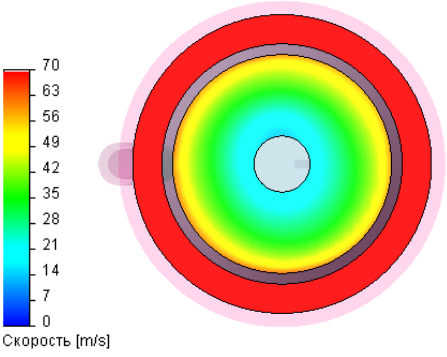


Y-компонента скорости потока

Скорость в сечении Y = 2 mm, плоскость ZX

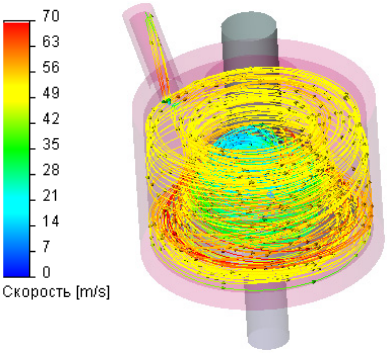


шероховатость = 0 μm

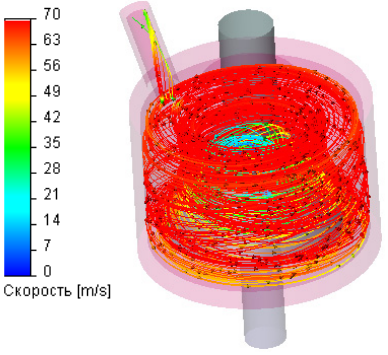


шероховатость = 500 μm

Траектории потока

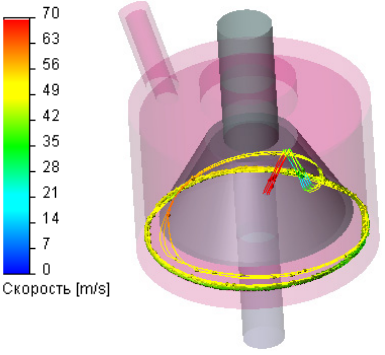


Гладкая стенка

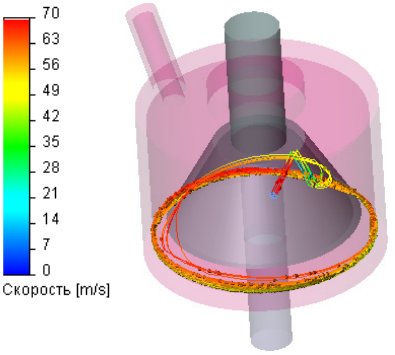


Шероховатая стенка

Траектории движения частиц диаметром 5 μm

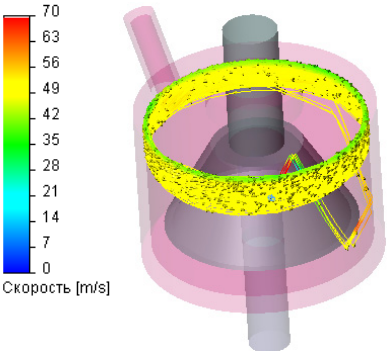


Гладкая стенка

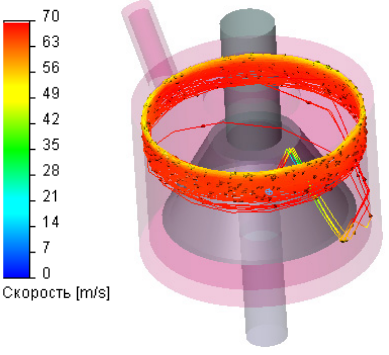


Шероховатая стенка

Траектории движения частиц диаметром 15 μm



Гладкая стенка



Шероховатая стенка

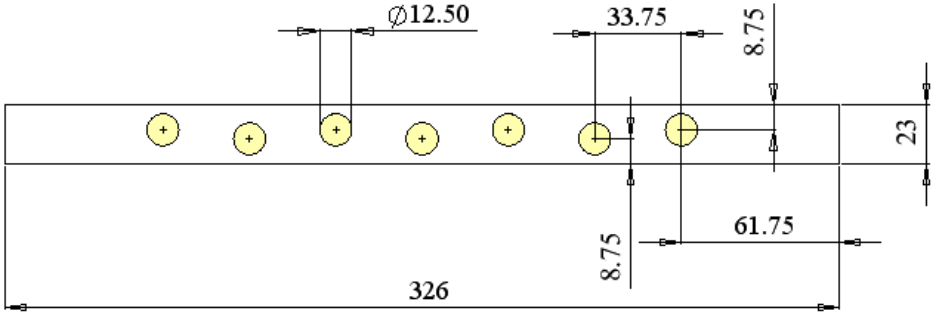
Течение неньютоновской жидкости в канале с массивом цилиндрических препятствий

Постановка задачи

Рассмотрим трехмерное течение неньютоновской жидкости в канале с цилиндрическими препятствиями. Канал имеет прямоугольное сечение. Внутри находятся семь круговых цилиндров, расположенных асимметрично относительно средней плоскости канала **[1]**. В качестве неньютоновской жидкости рассмотрим 3% водный раствор ксантановой смолы **[1].** Вязкость раствора описывается следующей зависимостью: $\eta = K \cdot \left(\dot{\gamma}\right)^{n-1}$, где K = 20 Pa×s^n - коэффициент пропорциональности, n = 0.2 - показатель степени. Т.к. раствор водный, то другие его свойства (плотность и т.д.) принимаются равными соответствующим свойствам воды.

Основная цель задачи - вычислить потери полного давления в канале. Для того, чтобы определить, как на эту величину влияет добавление в воду ксантановой смолы, рассчитаем также течение воды с тем же объемным расходом.

Расчеты FloEFD выполняются при следующих условиях: профиль скорости жидкости на входе является равномерным, объемный расход жидкости составляет 50 cm^3/s, статическое давление на выходе - 1 atm. Расчетной целью является гидравлическое сопротивление канала, т.е. перепад полного давления ΔP_o между входом и выходом.



Открытие модели

Скопируйте папку **C3 - Non-Newtonian Flow** в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные. Откройте сборку **array_of_cylinders.asm**.

📖 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **array_of_cylinders.asm**, расположенную в папке **C3 - Non-Newtonian Flow\Ready To Run**, и запустить на расчет нужные проекты.*

Задание неньютоновской жидкости

1. Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Инженерная база данных**.
2. В **Дереве базы данных** в группе **Вещества** выберите **Неньютоновские жидкости, Заданы пользователем**.
3. На панели инструментов кликните **Новый элемент** . Появится новая таблица **Свойства элемента**. Для того, чтобы задать значение какого-либо свойства, дважды кликните в соответствующую ячейку.
4. Задайте свойства вещества так, как показано в таблице ниже:

Имя	XGum
Плотность	1000 kg/m^3
Удельная теплоемкость	4000 J/(kg*K)
Теплопроводность	0.6 W/(m*K)
Вязкость	Степенная модель
Коэффициент пропорциональности	20 Pa*sn
Показатель степени	0.2

Сохраните изменения и выйдите из Инженерной базы данных.

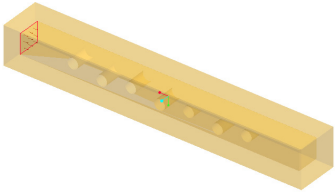
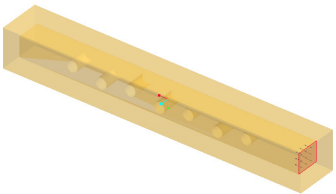
Создание проекта

Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как показано ниже:

Имя проекта	*XGS*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц измерения	***CGS** с изменениями: Pa (Pascal) для параметра **Давление и напряжение***
Тип задачи	*Внутренняя;* *Исключить полости без условий течения*
Физические модели	*Физических моделей не выбрано (по умолчанию)*
Текучая среда по умолчанию	***XGum** (Неньютоновские жидкости);* *Тип течения: Только ламинарное (по умолчанию)*
Условия на стенках по умолчанию	*Адиабатическая стенка, гладкие стенки по молчанию, условие проскальзывания по умолчанию*
Начальные условия	*Условия по умолчанию*

Задание граничных условий

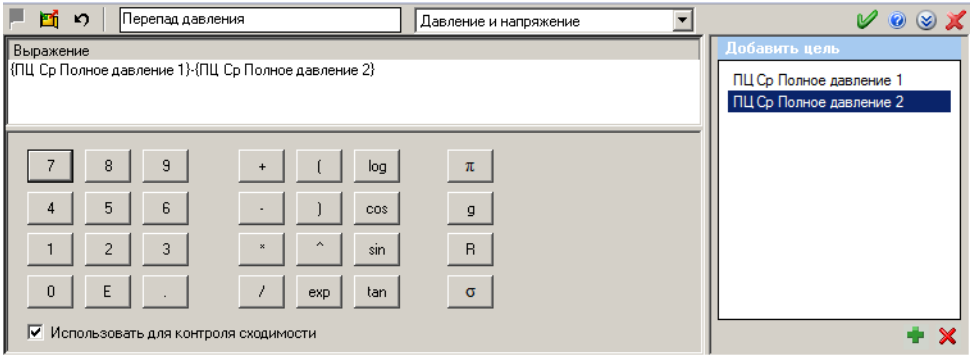
Задайте граничные условия так, как показано ниже:

Граничное условие на входе	***Объемный расход на входе 1**:* *Объемный расход 50 cm^3/s; температура по умолчанию (20.05 °C) на поверхности, показанной на рисунке;*	
Граничное условие на выходе	***Статическое давление 1**:* *Статическое давление по умолчанию (101325 Pa) на поверхности, показанной на рисунке;*	

Задание целей

На входе и выходе в качестве поверхностных целей задайте **Среднее полное давление**.

Перепад полного давления между входом и выходом задайте как цель-выражение.



Задание настроек глобальной сетки

Задайте следующие настройки глобальной сетки:

Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	`3` *(по умолчанию)*
Минимальный зазор	`0.25 cm`
Другие опции по умолчанию	

Запустите расчет. Когда расчет завершится, воспользуйтесь постпроцессорным элементом **Цели** для того, чтобы определить перепад давления между входом и выходом канала.

ARRAY_OF_CYLINDERS.ASM [XGS]

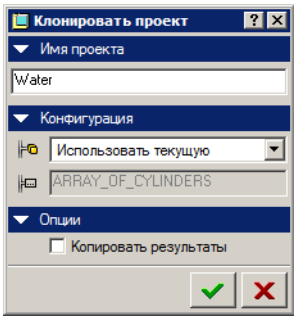
Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение
ПЦ Ср Полное давление 1	[Pa]	105652,2964	105652,217	105649,8632	105655,001
ПЦ Ср Полное давление 2	[Pa]	101329,319	101329,3176	101329,3116	101329,3199
Перепад давления	[Pa]	4322,977406	4322,899403	4320,548595	4325,681399

Как видно, потери полного давления в канале составляют примерно 4 kPa.

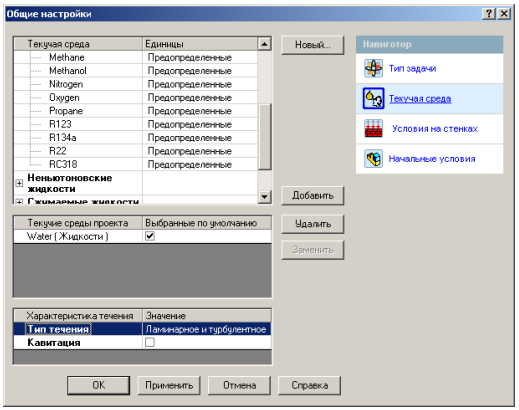
Сравнение течения неньютоновской жидкости и течения воды

Теперь рассмотрим течение воды в канале при тех же условиях, т.е. при таком же значении объемного расхода.

Создайте новый Экземпляр, склонировав текущий проект, присвойте ему имя `Water`.



Изменение настроек проекта



1 Кликните **Flow Analysis> Общие настройки**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Проект > Общие настройки.***

2 В **Навигаторе** кликните **Текучая среда**.

3 В таблице **Текучие среды проекта** выберите **XGum** и нажмите кнопку **Удалить**.

4 В группе **Жидкости** выберите **Вода** и нажмите кнопку **Добавить**.

5 В таблице **Характеристика течения** измените **Тип течения** на **Ламинарное и турбулентное**.

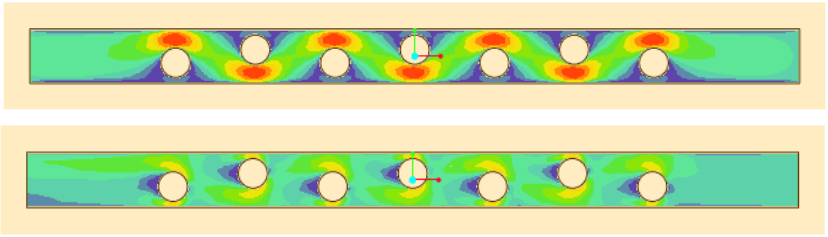
6 Кликните **OK**.

Запустите расчет. По окончании расчета с помощью постпроцессорного элемента **Цели** создайте **Цель**, поставив галочку **Все**.

ARRAY_OF_CYLINDERS.ASM [WATER]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение
ПЦ Ср Полное давление 1	[Pa]	101404,1827	101403,8876	101403,3704	101404,3257
ПЦ Ср Полное давление 2	[Pa]	101329,9385	101329,9622	101329,9138	101330,0171
Перепад давления	[Pa]	74,24418023	73,92542066	73,36800469	74,37034857

Результаты показывают, что в данном случае потери полного давления составляют примерно 70 Pa, что в 60-70 раз ниже, чем при течении 3% водного раствора ксантановой смолы. Это объясняется тем, что при соответствующих скоростях деформаций вязкость воды гораздо ниже вязкости раствора смолы.



Распределение скоростей раствора ксантановой смолы (вверху) и воды в пределах от 0 до 30 cm/s.

1 Georgiou G., Momani S., Crochet M.J., and Walters K. *Newtonian and Non-Newtonian Flow in a Channel Obstructed by an Antisymmetric Array of Cylinders*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v.40 (1991), p.p. 231-260.

C4

Радиационный теплообмен

Постановка задачи

Рассмотрим шарик диаметром 0.075 m, который постоянно нагревается тепловым источником мощностью 2 kW. С одной стороны шарик окружен концентрическим рефлектором в виде полусферы, внутренний диаметр которой составляет 0.256 m, с другой - стеклянным полусферическим корпусом такого же внутреннего диаметра. На расстоянии 1 m от шарика на одной оси с рефлектором находится круглый экран диаметром 3 m. Шарик излучает энергию в окружающее пространство, и это излучение попадает на рефлектор, а также на экран, проходя через стеклянный корпус. Все компоненты, за исключением стеклянного корпуса, выполнены из нержавеющей стали. Поверхность шарика и поверхность экрана, обращенная к шарику, являются абсолютно черными. Противоположная сторона экрана ничего не излучает.

Цель данного моделирования - определить влияние рефлектора и его радиационных свойств на температуру шарика и экрана. Для решения задачи рассмотрим три случая:

- Случай 1: внутренняя поверхность рефлектора является абсолютно белой;
- Случай 2: все поверхности рефлектора абсолютно черными;
- Случай 3: рефлектор отсутствует.

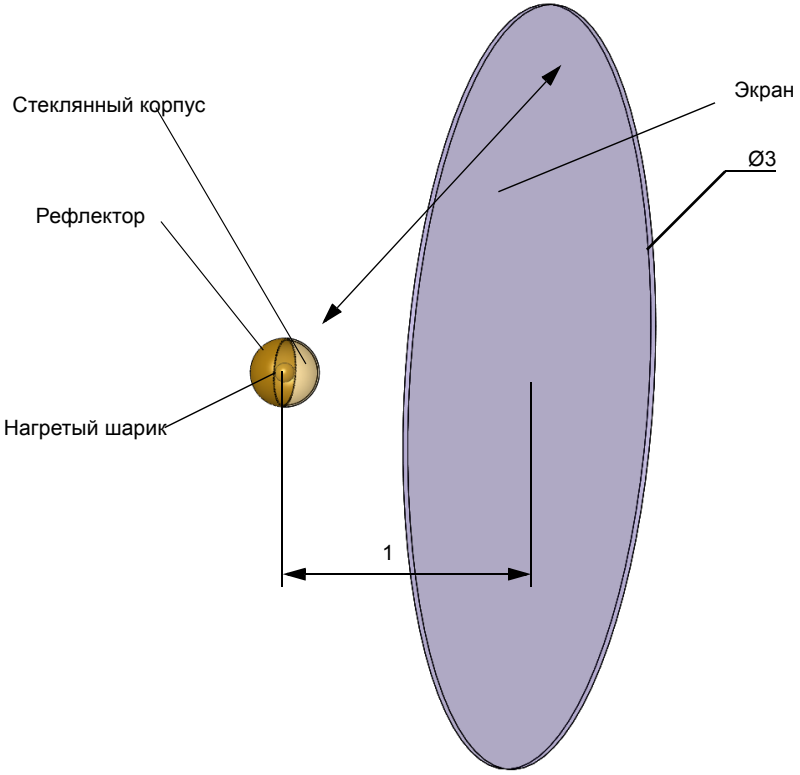
Стационарная задача решается при включенной опции **Теплопроводность в твердых телах**. Кроме того, принимаем, что интенсивность конвективного теплообмена ничтожно мала (как в разреженном воздухе), и включаем опцию **Только теплопроводность в твердых телах**. Если эта опция включена, нет необходимости задавать текучую среду для проекта, т.е. задача решается без учета потока текучей среды. Таким образом, процессорное время расчета задачи уменьшается, а теплообмен между телами ограничивается только излучением. Начальную температуру тел принимаем равной 293.2 K.

Рассмотрим решение каждого случая с помощью FloEFD.

Открытие модели

Скопируйте папку **C4 - Radiative Heat Transfer** в свою рабочую директорию и убедитесь, что с файлов снят атрибут "только для чтения", т.к. FloEFD будет сохранять в них входные данные. Откройте сборку **heated_ball_assembly.asm**.

🕮 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку* ***heated_ball_assembly.asm*** *, расположенную в папке* ***C4 - Radiative Heat Transfer\Ready To Run****, и запустить на расчет нужные проекты..*



Нагретый шарик с рефлектором и экраном.

Случай 1: Внутренняя поверхность рефлектора абсолютно белая

Создание проекта FloEFD

Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как показано ниже:

Имя проекта	*Case 1*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц	*SI*
Тип задачи	*Внешняя*
Физические модели	*Теплопроводность в твердых телах,* *Только теплопроводность в твердых телах,* *Радиационный теплообмен, Модель излучения:* *Дискретный перенос* *Температура окружающей среды* = 293.2 K;
Материал по умолчанию	*Alloys/Steel Stainless 321*
Условия на стенках по умолчанию	*Излучающие свойства поверхностей по умолчанию:* *Non-radiating surface;*
Начальные и внешние условия	*Начальная температура твердого тела* = 293.2 K

Настройка расчетной области

Задайте размеры расчетной области так, как показано ниже:

X max = 1.4 m	Y max = 1.6 m	Z max = 1.6 m
X min = -0.2 m	Y min = -1.6 m	Z min = -1.6 m

Настройка глобальной сетки

1. В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.
2. В группе **Тип** оставьте выбранный по умолчанию **Автоматический режим**. В группе **Настройки** оставьте заданный по умолчанию **Уровень начальной сетки**, равный 3:
3. Другие настройки оставьте заданными по умолчанию. Нажмите **OK** .

Редактирование настроек локальной сетки

Необходимо отредактировать расчетную сетку таким образом, чтобы добиться подробного разрешения радиационного источника и поверхностей радиационного теплообмена. Наиболее удобный способ - создание **Локальной сетки**. Локальная сетка позволяет получить точные результаты в нужных областях, избежав при этом чрезмерного дробления сетки в других областях.

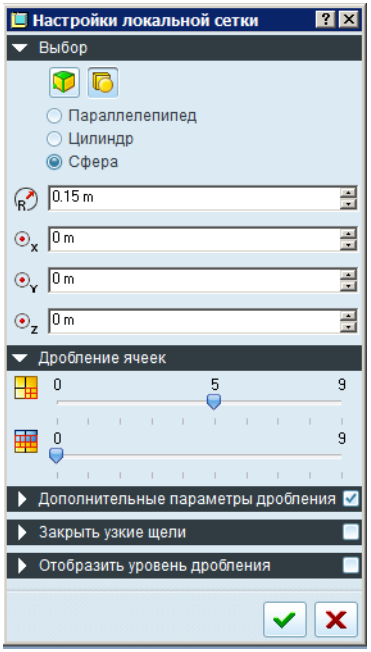
Для задания настроек локальной сетки в области нагретого шарика, рефлектора и стеклянного корпуса необходимо задать локальную область в виде сферы.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Локальная сетка**..

2 В группе **Выбор** нажмите кнопку **Область** и выберите **Сферу**. Задайте радиус сферы равным `0.15 m`, а центр сферы - в точке с координатами (0,0,0).

3 В группе **Дробление ячеек** с помощью слайдера установите **Уровень дробления ячеек в твердом теле** в положение `5`.

Остальные настройки оставьте заданными по умолчанию. Нажмите **OK** .



Для задания настроек локальной сетки в области экрана, в качестве локальной области необходимо выбрать его поверхность.

1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка** и из контекстного меню выберите **Добавить локальную сетку**.

2 В графической области выберите поверхность экрана (компонент **SCREEN**), обращенную к шарику (компонент **HEATED_SPHERE**).

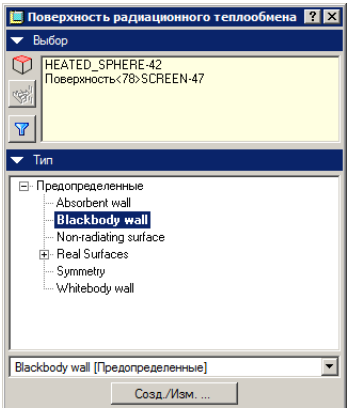
3 В группе **Дробление ячеек** с помощью слайдера установите **Уровень дробления ячеек в твердом теле** в положение `3`.

4 Остальные настройки оставьте заданными по умолчанию. Нажмите **OK** .

Задание поверхностей радиационного теплообмена

Для того, чтобы задать поверхности радиационного теплообмена, выполните следующую последовательность действий:

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхность радиационного теплообмена**.



*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > Поверхность радиационного теплообмена**.*

2 В группе **Тип** из списка **Предопределенных** поверхностей радиационного теплообмена выберите **Blackbody wall**.

3 В дереве модели выберите шарик (компонент **HEATED_SPHERE**). Затем, удерживая нажатой клавишу **CTRL**, выберите поверхность экрана (компонент **SCREEN**), обращенную к шарику (компонент **HEATED_SPHERE**).

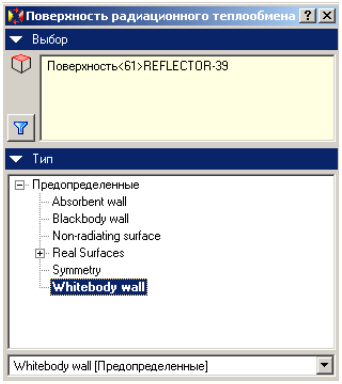
4 Кликните **OK** ✔. Переименуйте **Поверхность радиационного теплообмена 1** в `Абсолютно черные стенки`.

Для того, чтобы очистить выделение, кликните в любом месте графической области.

5 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхность радиационного теплообмена**.

6 Выберите внутреннюю поверхность рефлектора (компонент **REFLECTOR**).

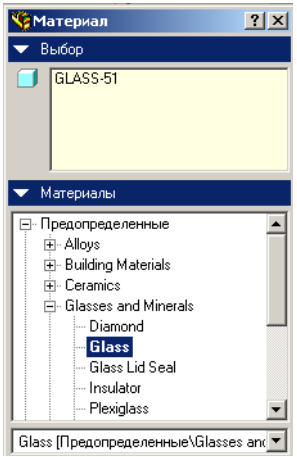
7 В группе **Тип** из списка **Предопределеннных** поверхностей радиационного теплообмена выберите **Whitebody wall**.



8 Кликните **OK** ✔. Измените имя созданной поверхности радиационного теплообмена на `Абсолютно белая стенка`.

Задание тел и материалов, прозрачных для излучения

Для стеклянного корпуса задайте материал **Glass** и определите его как тело прозрачное для излучения.



1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка** и из контекстного меню выберите **Добавить материал**.

2 В дереве модели выберите стеклянный корпус (компонент **GLASS**).

3 В группе **Материалы** в списке **Предопределенные** из группы **Glasses and Minerals** выберите **Glass**.

4 В группе **Прозрачность для излучения** кликните **Прозрачный**, затем выберите **Только тепловое излучение**.

Материал можно задать как прозрачный только для солнечного излучения или только для теплового излучения от всех остальных источников, включая нагретые тела. Т.к. в данном проекте нет источников солнечного излучения, то для того, чтобы задать материал полностью прозрачным для излучения, достаточно выбрать ***Только тепловое излучение****.*

5 Кликните **OK**. Теперь FloEFD будет трактовать этот материал и все тела, которые из него сделаны, как полностью прозрачные для теплового излучения.

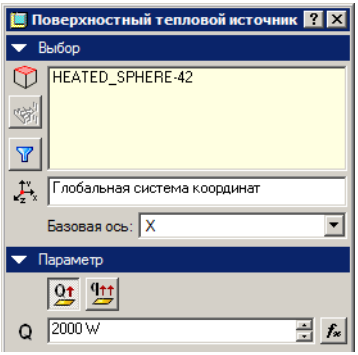
Задание теплового источника и целей

На поверхности шарика задайте поверхностный тепловой источник с мощностью тепловыделения 2 kW:

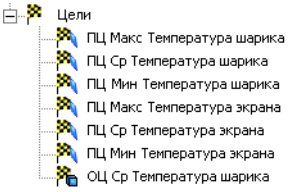
1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхностный тепловой источник**.

2 В дереве модели выберите шарик (компонент **HEATED_SPHERE**).

3 Выберите **Мощность тепловыделения** и в соответствующем поле введите значение, равное 2000 W.



Задайте поверхностные цели по максимальной, средней и минимальной температуре поверхности шарика (компонент **HEATED_SPHERE**), а также абсолютно черной поверхности экрана (компонент **SCREEN**).
Кроме того, задайте объемную цель по средней температуре шарика (компонент **HEATED_SPHERE**). (В качестве параметра во всех случаях следует выбирать **Температура (твердое тело)**. Для того, чтобы было проще отслеживать цели в процессе расчета, Вы можете переименовать их так, как показано на рисунке.



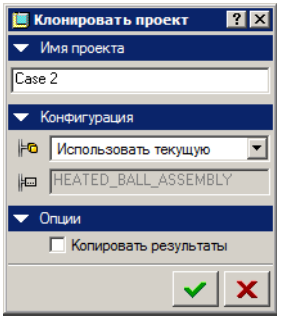
Сохраните модель и запустите расчет.

Если Вы обратите внимание на сходимость целей, Вы увидите, что в начале расчета температура шарика принимает высокое значение. Это объясняется следующим: тепло, выделяемое поверхностным тепловым источником мощностью 2000 W, не может быть отведено за счет излучения, т.к. начальная температура шарика (293.2 K) является для этого слишком низкой.

Случай 2: Поверхности рефлектора абсолютно черные

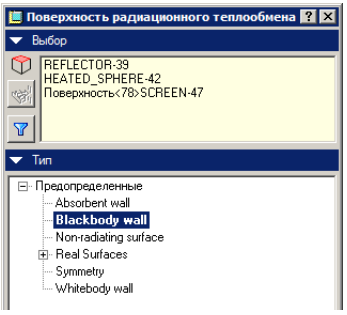
В данном случае внутренняя и все остальные поверхности рефлектора являются абсолютно черными.

Создайте новый проект **Case 2**, склонировав текущий проект **Case 1**.



Редактирование поверхностей радиационного теплообмена

1. Удалите условие **Абсолютно белая стенка**.
2. Правой кнопкой мыши кликните по элементу **Абсолютно черные стенки** и из контекстного меню выберите **Изменить**.
3. В дереве модели выберите рефлектор (компонент **REFLECTOR**). Этот компонент будет добавлен в список.
4. Кликните **OK** .

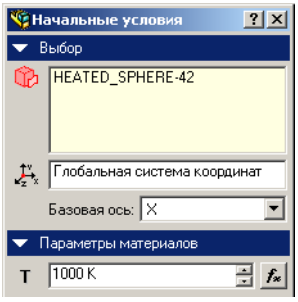


Задание целей

Задайте дополнительные поверхностные цели по максимальной, средней и минимальной температуре внутренней и внешней поверхностей рефлектора (компонент **REFLECTOR**).

Задание начального условия в теле

С помощью элемента **Начальное условие** задайте начальную температуру нагретого шарика равной 1000 K.



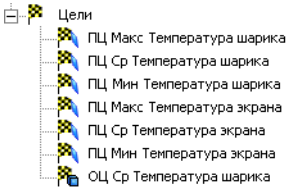
Сохраните модель.

Случай 3: Рефлектор отсутствует

В отличие от первых двух случаев (проекты **Case 1** и **Case 2**), в третьем случае рефлектор отсутствует.

Создайте новый проект **Case 3**, склонировав текущий проект **Case 2**.

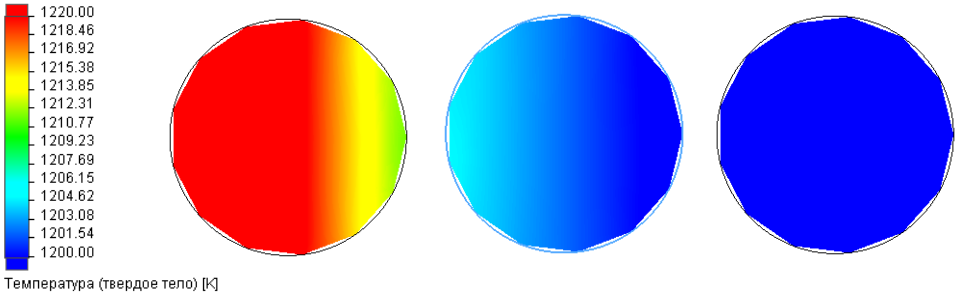
1. Измените условие **Абсолютно черные стенки**: в группе **Выбор** удалите из списка все поверхности, принадлежащие рефлектору (компонент **Reflector)**. Чтобы удалить поверхность/компонент из списка **Задание поверхностей радиационного теплообмена**, выберите нужную поверхность/компонент и нажмите **Удалить**.
2. Удалите поверхностные цели, относящиеся к рефлектору.
3. Деактивируйте рефлектор (компонент **REFLECTOR**) в диалоговом окне **Управление компонентами**.



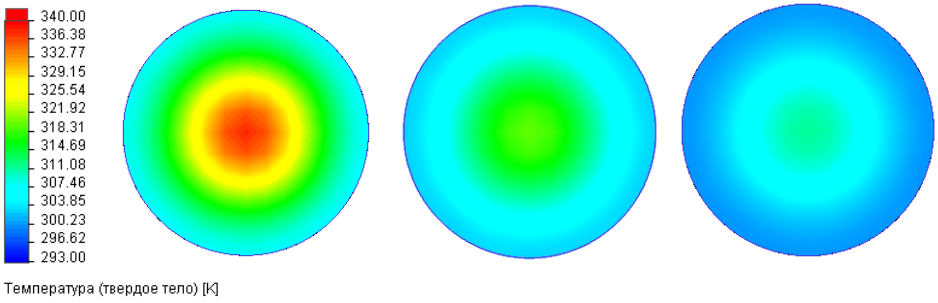
Запустите расчет второго и третьего проектов, используя **Серию расчетов**.

Результаты

В первом случае (проект Case 1) температура поверхности шарика, обращенной к рефлектору, выше температуры поверхности, обращенной к экрану (см. рис. ниже). Это связано с тем, что рефлектор полностью отражает тепло, полученное от шарика. Поэтому и температура экрана в этом случае выше, чем в двух других.
Во втором случае (проект Case 2) излучение, исходящее от шарика, нагревает рефлектор, и его внешняя поверхность излучает тепло во внешнюю среду. Чем меньше тепла излучает рефлектор, тем ниже температура шарика, хотя излучение распространяется точно так же, как и в первом случае. На экран от рефлектора также поступает меньше тепла, поэтому температура экрана в данном случае ниже, чем в первом.
В третьем случае (проект Case 3) рефлектор отсутствует, и обратно тепло шарику не переотражается. В данном случае температура шарика ниже, чем во втором случае, и по большей части распределена равномерно (неравномерность менее 1 K). Т.к. при отсутствии рефлектора тепло на экран поступает только от шарика, то в данном случае температура экрана является наименьшей.



Распределение температуры в сечении шарика (плоскость ASM_FRONT) в случаях CASE 1 (слева), CASE 2
(в центре) и CASE 3 (справа) в пределах от 1200 до 1220 K



Распределение температуры по поверхности экрана в случаях CASE 1 (слева), CASE 2 (в центре) и CASE 3 (справа) в пределах от 295 до 340 K.

Параметр		Случай 1	Случай 2	Случай 3
Температура шарика, K	Максимальная	1251,56	1231,28	1222,93
	Средняя	1228,66	1211,29	1204,06
	Минимальная	1210,7	1199,37	1194,32
Температура экрана, K	Максимальная	340,85	322,18	311,91
	Средняя	317,82	308,97	303,59
	Минимальная	307,64	303,18	299,85

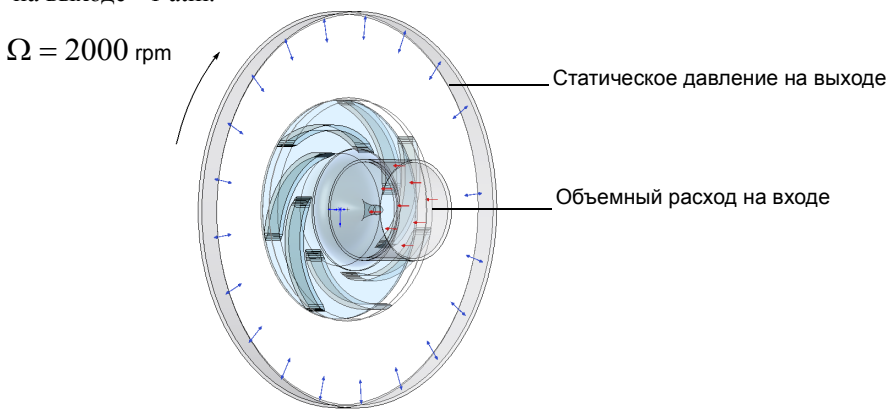
C5

Центробежный насос

Постановка задачи

Рассмотрим течение воздуха в центробежном насосе, основным элементом которого является рабочее колесо, насаженное на вал (см. рис. ниже). На рабочем колесе имеется семь лопастей постоянной толщины, передние и задние кромки которых имеют клиновидную форму. Лопасти вписаны во внутреннюю и внешнюю окружности, радиусы которых составляют 120 mm и 240 mm. Для каждой лопасти угол между радиусом рабочего колеса и касательной к ней на входе равен 65^o, а на выходе - 70^o. Рабочее колесо вращается с угловой скоростью 2000 rpm. Поток воздуха через входной патрубок радиусом 92 mm поступает в в направлении оси вращения, закручивается перпендикулярно осевому направлению и засасывается рабочим колесом. На выходе из рабочего колеса поток воздуха попадает в неподвижный радиальный диффузор.

Объемный расход воздуха на входе в насос составляет 0.3 m^3/s (профиль скорости равномерный, вектора скорости параллельны оси вращения), статическое давление на выходе - 1 atm.



Центробежный насос с рабочим колесом.

Открытие модели

Скопируйте папку **C5 - Rotating Impeller** в свою рабочую директорию. Откройте сборку **pump.asm**.

📖 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **pump.asm**, расположенную в папке **C5 - Rotating Impeller\Ready To Run**, и запустить проект на расчет.*

Создание проекта FloEFD

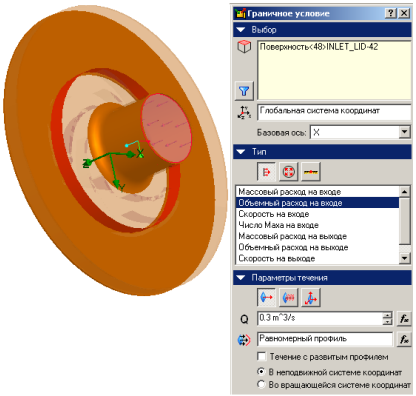
Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как показано ниже:

Имя проекта	*Impeller Efficiency*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц измерения	*SI*
Тип задачи	*Внутренняя,* *Исключить полости без условий течения*
Физические модели	*Вращение:* *Тип: Глобальное вращение,* *Ось вращения: Z ось Глобальной системы координат,* *Угловая скорость* = `2000 RPM` *(209.43951 rad/s)*
Текучая среда по умолчанию	*Air*
Условия на стенках по умолчанию	*Адиабатическая стенка, гладкие стенки по умолчанию*
Начальные условия	*Условия по умолчанию*

Задание граничных условий

Задайте граничные условия на входе и выходе, как показано в таблице ниже:

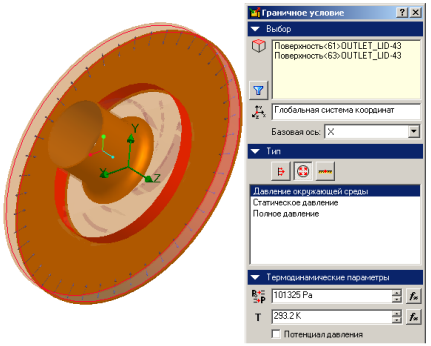
Тип	**Объемный расход на входе**
Имя	**Объемный расход на входе 1**
Поверхности	внутренняя поверхность крышки на входе (компонент **INLET_LID**)
Параметры: **Объемный расход** `0.3 m^3/s`, вид профиля **Равномерный профиль**, включена опция **В неподвижной системе координат**	



🕮 *Если включена опция **Во вращающейся системе координат**, то предполагается, что заданная скорость (число Маха) равна скорости (числу Маха) во вращающейся системе координат:*

$$V_{specified} = V_r = V_{abs} - \omega \times r$$

где $V_{specifed}$ - заданное значение скорости, V_r - значение скорости во вращающейся системе координат, V_{abs} - значение скорости в неподвижной системе координат, r - расстояние до оси вращения, ω - угловая скорость вращающейся системы координат. Если тангенциальная составляющая скорости перпендикулярна нормали к поверхности (например, когда нормаль к поверхности совпадает с осью вращения), то ее значение не влияет на значение массового (объемного) расхода, т.е. значение массового или объемного расхода, заданное во вращающейся системе координат, будет таким же, как и в неподвижной системе координат.

Тип	**Давление окружающей среды**	
Имя	**Давление окружающей среды 1**	
Поверхности	внутренняя поверхность крышки на выходе (компонент **OUTLET_LID**)	
Термодинамические параметры: Значения по умолчанию (101325 Pa и 293.2 K) в неподвижной системе координат (опция **Потенциал давления** выключена)		

📖 *Если Вы выбрали вращающуюся систему координат, Вы можете включить опцию **Потенциал давления**. В этом случае статическое давление будет считаться равным давлению во вращающейся системе координат и может быть рассчитано следующим образом:*

$$P_{specified} = P_r = P_{abs} - \frac{1}{2}\rho\omega^2 \cdot r^2$$

*Здесь $P_{specified}$ - заданное значение давления, P_r - давление во вращающейся системе координат, P_{abs} - значения давления в неподвижной системе координат, ρ - плотность среды, r - расстояние до оси вращения. Когда опция **Потенциал давления** отключена, заданное статическое давление считается равным давлению в неподвижной системе координат.*

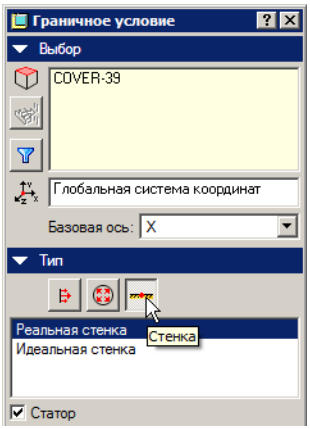
Если Вы выбираете вращающуюся систему координат и не задаете какие-либо стенки как неподвижные, то считается, что вся модель вращается с заданной угловой скоростью. Для того, чтобы сделать стенки неподвижными, на них необходимо задать граничное условие Статор. Задание такого граничного условия равнозначно заданию нулевой скорости стенок в неподвижной системе координат. Обратите внимание, что поверхность статора должна быть симметрична относительно оси вращения.

Задание неподвижных стенок

На соответствующих стенках насоса зададим условие Статор.

1 В дереве модели выберите корпус насоса (компонент **COVER**).

2 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**.



3 Кликните **Стенка**, выбранный по умолчанию тип условия **Реальная стенка** изменять не требуется.

4 Включите опцию **Статор**.

5 Кликните **OK** и переименуйте созданное условие `Реальная Стенка 1` в `Стенки статора`.

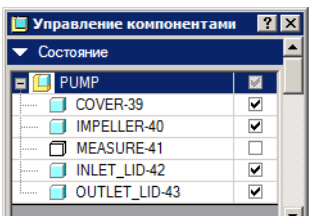
Сведения к расчету КПД рабочего колеса

Инженерам, работающим с насосным оборудованием, необходимо знать его КПД. КПД (η) рассматриваемого насоса может быть рассчитано следующим образом (F.M.White "Fluid Mechanics", 3rd edition, 1994):

$$\eta = \left| \frac{\left(P_{outlet} - P_{inlet}\right) \cdot Q}{\Omega \cdot M} \right|$$

где P_{inlet} - значение статического давления на входе насоса, P_{outlet} - среднерасходное значение давления на выходе рабочего колеса (Pa), Q - объемный расход воздуха (m^3/s), Ω - угловая скорость вращения рабочего колеса (rad/s), M - крутящий момент рабочего колеса (N·m). Для того, чтобы рассчитать P_{outlet}, в том месте, где поток выходит из рабочего колеса, был размещен вспомогательный компонент **MEASURE**, представляющий собой тонкое кольцо.

Компонент **MEASURE** должен быть деактивирован в диалоговом окне **Управление компонентами**, т.к. он используется только для расчета давления (соответствующая цель будет задана на внутренней поверхности компонента **MEASURE**).



1 Кликните **Flow Analysis > Управление компонентами**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Проект > Управление компонентами.***

2 Отключите элемент **MEASURE**.

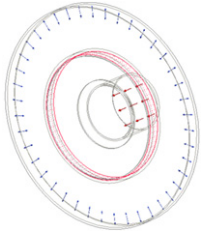
3 Кликните **OK**, чтобы закрыть диалоговое окно.

Задание целей проекта

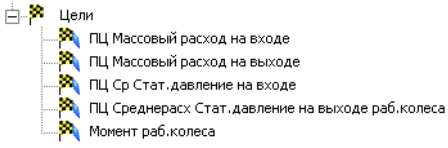
Теперь необходимо задать поверхностные цели на входе и выходе насоса. В качестве параметра целесообразно выбрать массовый расход, это позволит контролировать массовый баланс, который может служить дополнительным критерием сходимости расчета.

ТИП ЦЕЛИ	ПАРАМЕТР ЦЕЛИ	ПОВЕРХНОСТЬ
Поверхностная цель	Массовый расход	Внутренняя поверхность крышки на входе (компонент **INLET_LID**)
Поверхностная цель	Массовый расход	Внутренняя поверхность крышки на выходе (компонент **OUTLET_LID**)

Затем задайте цели, необходимые для расчета КПД рабочего колеса:

ТИП ЦЕЛИ	ПАРАМЕТР ЦЕЛИ	ПОВЕРХНОСТЬ
Поверхностная цель	Среднее Статическое давление	Внутренняя поверхность крышки на входе (компонент) **INLET_LID**
Поверхностная цель	Среднерасходное Статическое давление	Внутренняя поверхность кольца на выходе рабочего колеса (компонент **MEASURE**) 
Поверхностная цель	Момент (Z)	Все поверхности контакта **рабочего колеса** с воздухом (см. ниже).

Переименуйте созданные цели, как показано ниже:



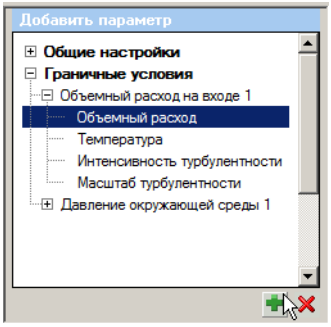
И в заключение задайте Цели-выражения:

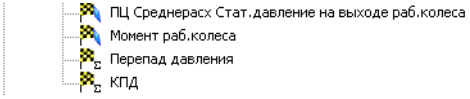
ИМЯ ЦЕЛИ	ВЫРАЖЕНИЕ	РАЗМЕРНОСТЬ
Перепад давления	{ПЦ СР Статическое давление на входе}-{ПЦ Среднерасх Статическое давление на выходе раб.колеса}	Давление и напряжение
КПД	{Перепад давления}*{Объемный расход на входе 1:Объемный расход:3.000e-001}/209.44/{Момент раб.колеса}	Безразмерный

Чтобы добавить в выражение значение объемного расхода на входе, выполните следующую последовательность действий:

1 На панели Цели-выражения нажмите **Добавить параметр** .

2 В списке **Добавить параметр** раскройте группу **Граничные условия**, в подгруппе **Объемный расход на входе 1** выберите **Объемный расход** и нажмите **Добавить** .





Задание настроек глобальной сетки

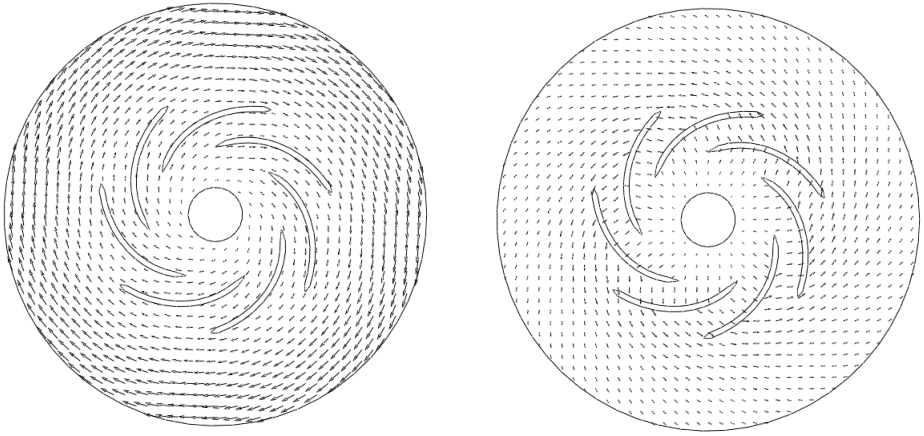
Задайте следующие настройки глобальной сетки:

Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	4
Минимальный зазор	0.04 m
Другие опции по умолчанию	

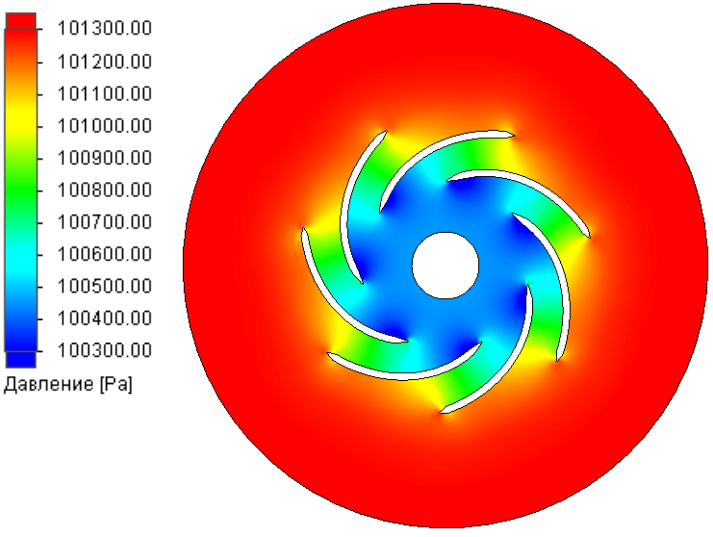
Сохраните модель и запустите расчет.

Результаты

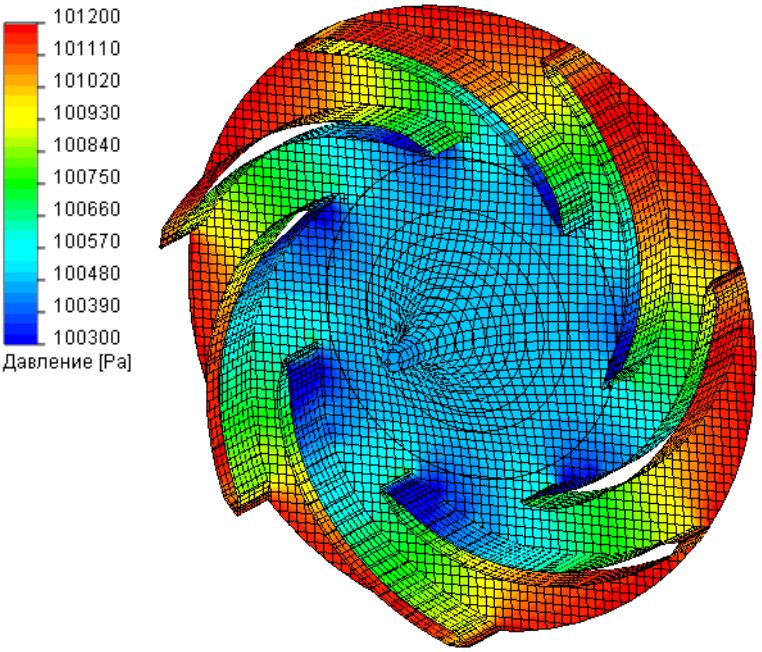
На рисунках ниже показаны вектора скорости и распределение статического давления в насосе. Чтобы отобразить вектора скорости во вращающейся системе координат, в диалоговом окне **Картина в сечении** на вкладке **Вектора** в качестве параметра выберите **Скорость во вращающейся системе координат.**



Вектора скорости потока в плоскости проходного сечения рабочего колеса во вращающейся (слева) неподвижной (справа) системах координат (плоскость сечения ASM_FRONT, смещение *Z = - 0.02 m*, расстояние между стрелками = 0.02 m, размер стрелок = 0.03 m).



Распределение статического давления в плоскости проходного сечения рабочего колеса.



Распределение давления по поверхности рабочего колеса.

КПД рассматриваемого рабочего колеса составляет примерно 0.75.

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение
КПД	[ ]	0,75704682	0,757049362	0,756981666	0,757112269

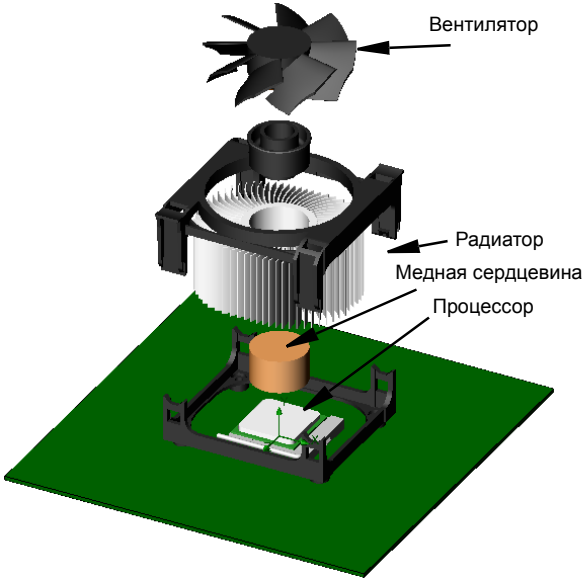
C6

Кулер процессора

Постановка задачи

В данной задаче моделируется работа кулера процессора. Он состоит из следующих компонентов: медной сердцевины, алюминиевого радиатора с 62 ребрами и вентилятора с 8 лопастями. Процессор установлен в специальное гнездо на печатной плате. Тепло, выделяемое процессором, отводится через медную сердцевину на радиатор, а затем снимается потоком воздуха, который образуется с помощью вентилятора.

Рассмотрим решение задачи с помощью FloEFD. В данном случае оптимальным является использование локальных областей вращения. Чтобы упростить постановку задачи, исключим из рассмотрения слой теплопроводной пасты между процессором и кулером. Также пренебрежем теплопроводностью печатной платы и гнезда, в которое установлен процессор.



Кулер процессора (вид с разнесенными частями).

Количественной характеристикой эффективности кулера является его интегральное тепловое сопротивление, которое определяется следующим образом: $\Psi_{CA} = (T_C - T_A)/P_D$, где T_C -

температура корпуса процессора, T_A - температура окружающего воздуха, P_D - TDP (thermal design power) - тепловая мощность, выделяемая процессором.

Открытие модели

Скопируйте папку **C6 - CPU Cooler** в свою рабочую директорию. Откройте сборку **CPU_COOLER.ASM**.

🕮 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку* ***COOLER.ASM****, расположенную в папке* **C6 - CPU Cooler\Ready To Run***, и запустить на расчет нужные проекты.*

Создание проекта FloEFD

Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как показано ниже:

Имя проекта	*CPU Cooler at 4400 RPM*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц измерения	*SI*
Тип задачи	*Внешняя;* *Исключить полости без условий течения;* *Исключить внутреннее пространство*
Физические модели	*Теплопроводность в твердых телах;* *Вращение:* *Тип: Локальная область(ти) вращения (Averaging)*
Текучая среда по умолчанию	*Газы / Air*
Материал по умолчанию	*Glasses and Minerals / Insulator*
Условия на стенках по умолчанию	*Гладкие стенки по умолчанию*
Начальные условия и внешние условия	*Термодинамические параметры:* *Температура* = 38°C*;* *Параметры материалов:* *Начальная температура твердого тела* = 38°C*;* *другие условия по умолчанию*

Настройка расчетной области

Задайте размеры расчетной области так, как показано ниже:

X max = 0.095 m	Y max = 0.1123 m	Z max = 0.095 m
X min = -0.095 m	Y min = 0.0005 m	Z min = -0.095 m

Задание области вращения

Элемент **Область вращения** применяется для расчета течения во вращающихся компонентах модели (вентиляторах, насосных колесах, различных смешивающих устройствах и т.д.), когда невозможно использование глобальной вращающейся системы координат, т.е. в следующих случаях:

- в модели, помимо вращающихся компонентов, присутствуют неподвижные тела,
- в модели находятся несколько компонентов, вращающихся относительно разных осей и/или вращающихся с разными скоростями,
- поверхность раздела твердых тел с текучей средой не является симметричной относительно оси вращения какого-либо компонента.

Каждый вращающийся компонент должен быть окружен осесимметричной областью вращения, система координат которой вращается совместно с этим компонентом.

В качестве области вращения задается дополнительный компонент модели, удовлетворяющий следующим требованиям:

- этот компонент должен быть замкнутым,
- он должен быть симметричен относительно оси вращения,
- границы этого компонента с областями текучей среды и областями твердого тела также должны быть осесимметричны.

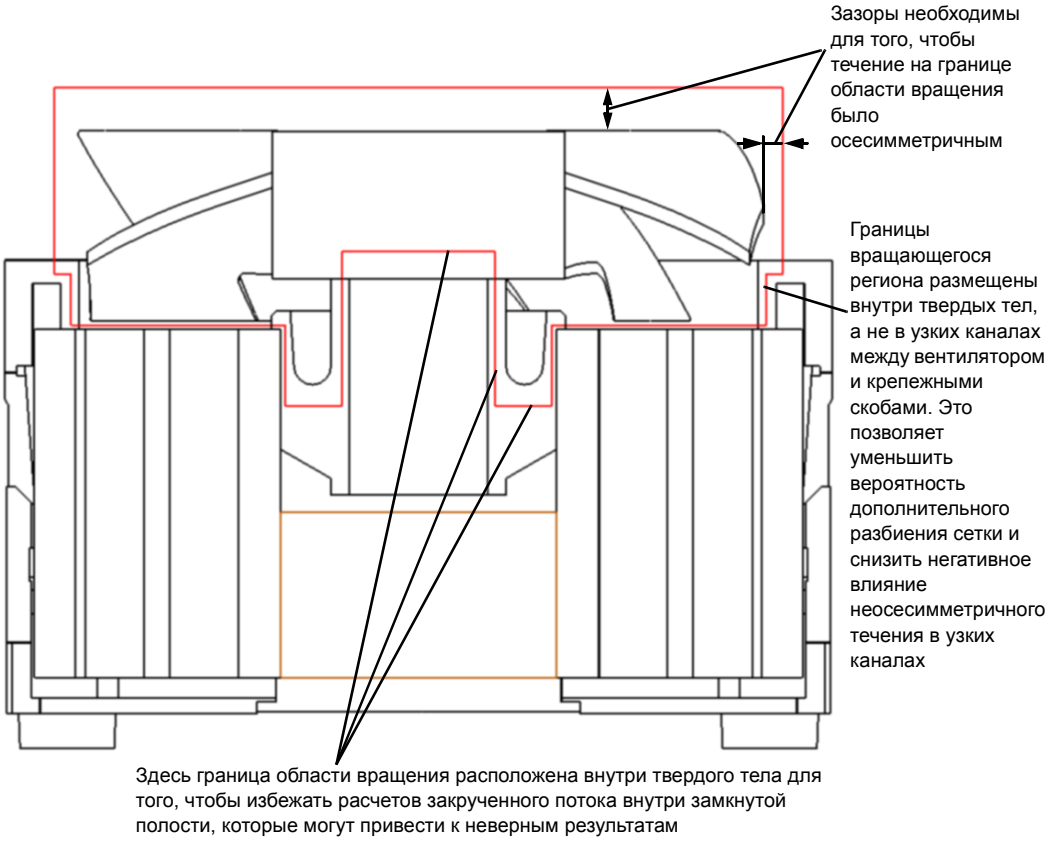
🕮 *Решения, полученные в области вращения и в неподвижных областях текучей среды, должны быть согласованы на границе этих областей. Поэтому на этих границах значения параметров течения автоматически переносятся из смежных неподвижных областей текучей среды как граничные условия. Границы области вращения разбиваются на кольца равной толщины, и перенесенные параметры течения усредняются по окружности каждого из колец.*

- компоненты, использующиеся для задания разных областей вращения, не должны пересекаться.

Задайте область вращения, как показано ниже:

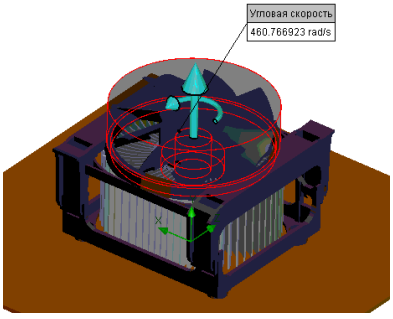
1. Кликните **Flow Analysis > Добавить > Область вращения**.
2. В дереве модели выберите область вращения (компонент **ROTATION_REGION**). Обратите внимание, что в поле **Отключить компоненты** уже поставлена галочка. Т.е. область вращения автоматически определяется как область текучей среды.

📖 *Компонент, предназначенный для задания **Области вращения**, должен быть телом вращения. Оси вращения - его собственная и ось вращающегося тела - должны совпадать. Обратите внимание, что этот компонент отключен в диалоговом окне **Управление компонентами**. Убедитесь, что его границы не совпадают с границами окружающих его тел, т.к. иначе эта область не будет разрешена сеткой. Тем не менее, эти компоненты могут пересекаться, но тогда они должны быть симметричны относительно оси вращения. Область вращения должна быть расположена так, чтобы между ее границей и внешними кромками лопастей вентилятора был некоторый зазор. Это необходимо для того, чтобы свести к минимуму влияние локальных несесимметричных возмущений, т.к. течение на границе области вращения должно быть симметрично относительно оси вращения. По этой же причине, там, где возможно, границы области вращения лучше расположить внутри других тел, а не в узких каналах. При создании формы области вращения необходимо учитывать предполагаемое направление течения на ее границе. Следует выбрать такую форму области вращения, чтобы направление течения было максимально перпендикулярно границе области вращения. На рисунке ниже показано, как в данном примере форма области вращения была приближена к реальной геометрии кулера процессора (красным обозначены границы области вращения).*



1 В группе **Параметр** задайте значение **Угловой скорости**, равное 4400 RPM. В случае, если направление по умолчанию противоположно требуемому, задайте значение -4400.

📖 *Когда Вы создаете область вращения, в графической области отображаются зеленые стрелки, обозначающие ось вращения и положительное направление скорости вращения. Если необходимо задать вращение в направлении, противоположном направлению стрелки, следует ввести отрицательное значение угловой скорости.*



2 Кликните **OK** .

Если Вы создаете область вращения и не задаете какие-либо стенки как неподвижные, то предполагается, что все стенки, находящиеся внутри области вращения, вращаются с заданной угловой скоростью. Чтобы определить отдельные стенки как неподвижные, на них необходимо задать граничное условие Статор. Задание такого граничного условия равнозначно заданию нулевой скорости стенок в неподвижной системе координат. Обратите внимание, что поверхность статора (или часть поверхности, расположенная внутри области вращения, в случае, когда эта поверхность пересекает границу области вращения) должна быть симметрична относительно оси вращения.

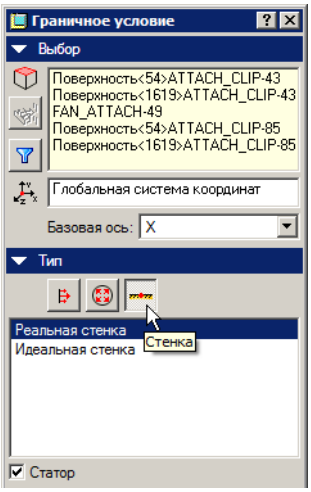
Задание неподвижных стенок

Условие Статор следует задать на определенных стенках крепления вентилятора и крепежных скоб. Чтобы было удобнее выбирать эти поверхности, скройте вентилятор (компонент **FAN**) и область вращения (компонент **ROTATING_REGION**).

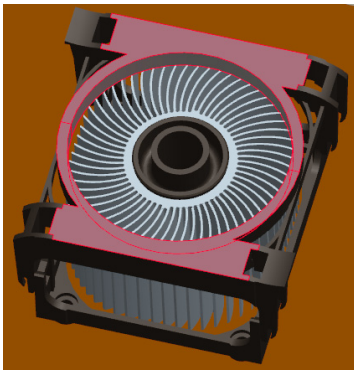
1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить граничное условие**.

2 В группе **Тип** выберите **Стенка** . Выбранный по умолчанию тип условия **Реальная стенка** изменять не требуется. Включите опцию **Статор**.

3 В дереве модели выберите крепление вентилятора (компонент **FAN_ATTACH**).



4 Удерживая нажатой клавишу CTRL, выберите две внутренние цилиндрические поверхности и две верхние поверхности крепежных скоб (компонент **ATTACH_CLIP**), как показано на рисунке.



5 Кликните **OK** .

Задание материалов

Задайте материалы, как показано ниже:

a) процессор (компонент **CPU**) и радиатор (компонент **HEAT_SINK**) выполнены из алюминия (Предопределенные/Metals/Aluminum);
b) сердцевина (компонент **COPPER_CORE**) выполнена из меди (Предопределенные/Metals/Copper);
c) другие части выполнены из изолятора (Предопределенные/Glasses and Minerals/Insulator).

Задание тепловых источников

На процессоре (компонент **CPU**) задайте объемный тепловой источник с мощностью тепловыделения 75 W.

Задание настроек глобальной сетки

1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

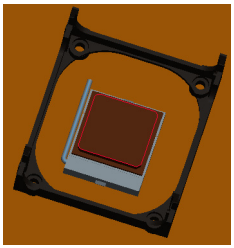
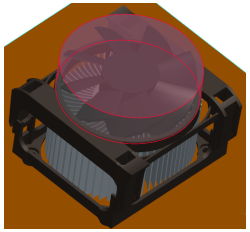
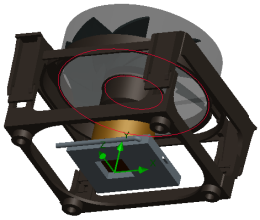
2 В группе **Тип** оставьте выбранный по умолчанию **Автоматический режим** и в группе **Настройки** задайте следующие настройки сетки:

Уровень начальной сетки	5
Минимальный зазор	0.005 m
Равномерная сетки	Включено
Другие опции по умолчанию	

3 Кликните **OK** .

Задание целей проекта

Задайте поверхностные цели по максимальной температуре корпуса процессора и по массовому расходу потока, входящего в область вращения и выходящего из нее. Чтобы выбрать нужные поверхности, скройте некоторые компоненты, если необходимо.

ТИП ЦЕЛИ	ПАРАМЕТР ЦЕЛИ	ПОВЕРХНОСТЬ
Поверхностная цель	Max Температура (Твердое тело)	Верхняя поверхность корпуса процессора. Чтобы задать эту цель, необходимо скрыть радиатор (компонент **HEAT_SINK**) и медную сердцевину (компонент **COPPER_CORE**) 
Поверхностная цель	Массовый расход	Верхняя и боковая поверхности области вращения (компонент **Rotation Region**). 
Поверхностная цель	Массовый расход	Нижняя поверхность области вращения (компонент **Rotation Region**). Чтобы задать эту цель, необходимо скрыть печатную плату (компонент **PCB**). 
Цель-выражение	({ПЦ Массовый расход 1}+{ПЦ Массовый расход 2})/{ПЦ Массовый расход 1}	Дисбаланс массового расхода между входом и выходом. Знак "+" поставлен потому, что знаки массовых расходов на входе и выходе противоположны. В качестве **Размерности** выберите **Безразмерный**.
Глобальная цель	Ср Температура (Текучая среда)	
Глобальная цель	Ср Скорость	

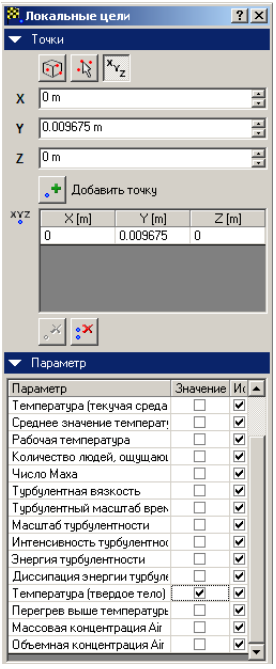
Для того, чтобы рассчитать тепловое сопротивление кулера, необходимо знать температуру в центре корпуса процессора. Чтобы получить точное значение этого параметра, отдельно зададим **Точечную цель**.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Точечные цели.**

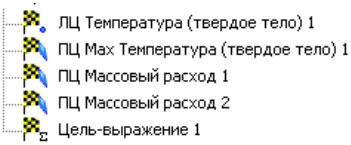
2 Кликните **Координаты точки** .

3 Задайте следующие координаты точки: **X** = 0 m, **Y** = 0.009675 m, **Z** = 0 m.

4 Кликните **Добавить точку** . В таблице **Параметр** поставьте галочку **Значение** напротив параметра **Температура (твердое тело)**.



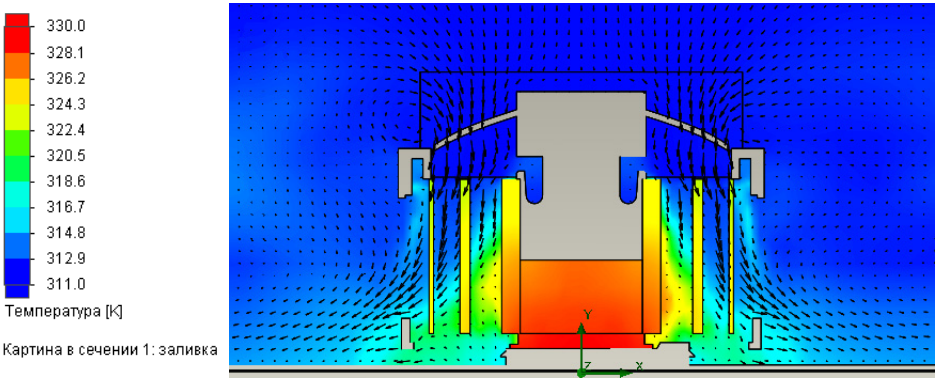
Кликните **OK**.



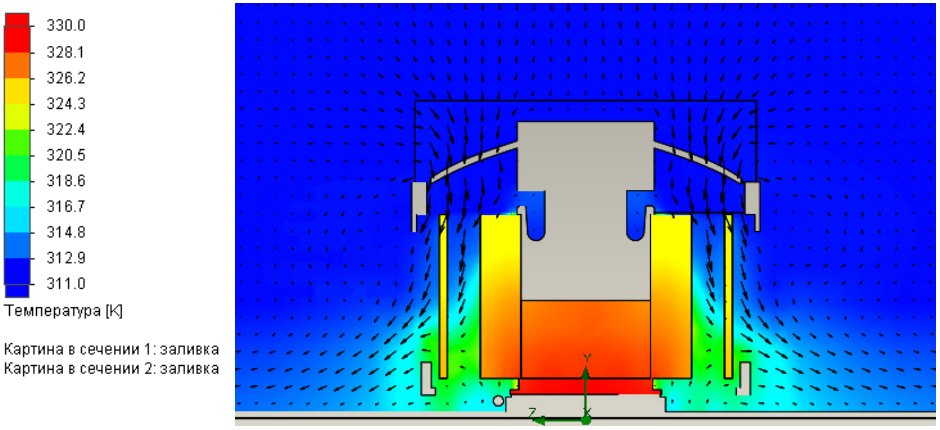
Сохраните модель и запустите расчет.

Результаты

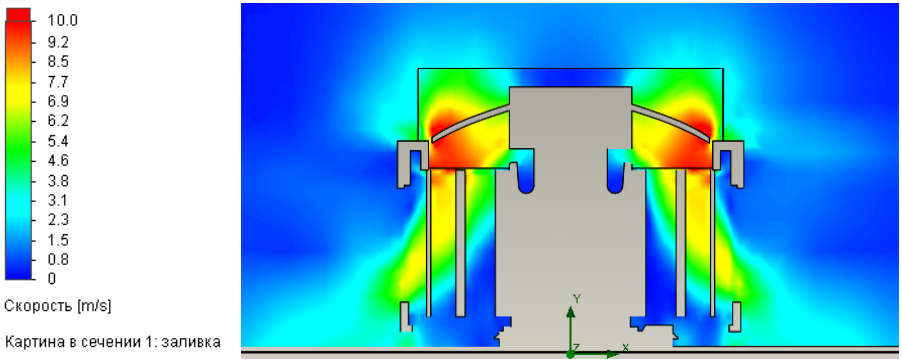
Для того, чтобы получить значение температуры в центре корпуса процессора, воспользуйтесь постпроцессорным элементом **Цель**. Теперь можно рассчитать тепловое сопротивление кулера процессора: $\Psi_{CA} = (T_C - T_A)/P_D = (330\text{-}311.15)/75 = 0.25$ °C/W. Другой важной характеристикой кулера является скорость потока над поверхностью печатной платы. Вектора скорости потока и распределение температуры показаны ниже (рассматриваются плоскости **ASM_FRONT** и **ASM_RIGHT**).



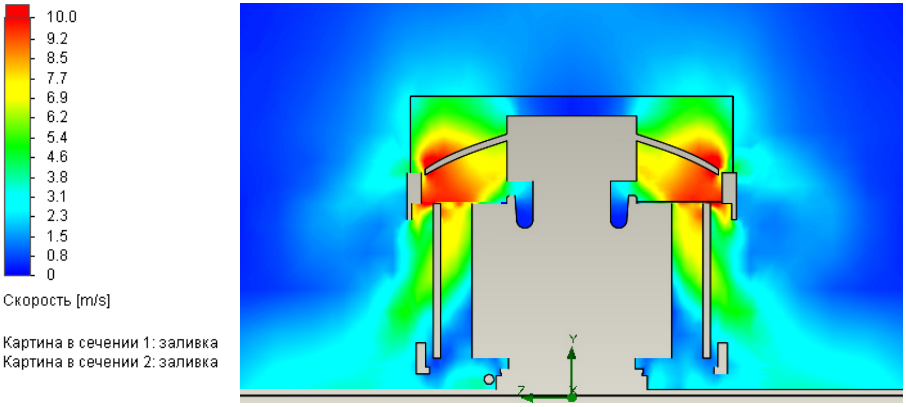
Температурное поле и вектра скосрости (плоскость ASM_FRONT, смещения нет, расстояние между векторами = 0.003 m, размер стрелок = 0.015 m).



Температурное поле и вектра скосрости (плоскость ASM_RIGHT, смещения нет, расстояние между векторами = 0.003 m, размер стрелок = 0.015 m).



Распределение скорости (плоскость ASM_FRONT, смещения нет).



Распределение скорости (плоскость ASM_RIGHT, смещения нет).

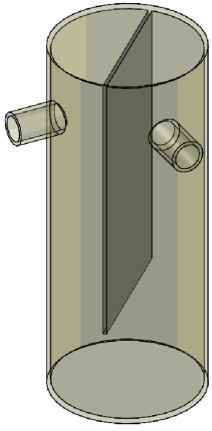
C7

Маслоуловитель автомобиля

Постановка задачи

В данном примере рассматривается работа маслоуловителя автомобиля, предназначенного для отделения частиц моторного масла, попавших в поток воздуха. Коленчатый вал при вращении погружается в картер двигателя и перемешивает масло, находящееся в нем. В результате частицы масла попадают в поток воздуха. Вместе с потоком воздуха частицы масла через систему вентиляции картера могут попасть во впускной коллектор двигателя. Маслоуловитель задерживает эти частицы, вследствие чего устраняется возможность их попадания в двигатель, и, соответственно, их сгорания и появления дыма в выхлопе.

Конструкция рассматриваемого маслоуловителя представлена на рисунке справа. Частицы масла вместе с потоком воздуха попадают в него через входной патрубок. Перегородка установлена таким образом, что большая их часть попадает на нее. Когда происходит соударение, частица масла прилипает к перегородке и стекает вниз. Однако некоторые частицы малого размера, в силу своей малой инерционности могут избежать соударения и выйти из маслоуловителя через выходной патрубок.



Цель данного моделирования - установить, насколько хорошо маслоуловитель задерживает частицы следующих размеров: 8, 13 и 18 μm. Доля частиц, выходящих из маслоуловитея с потоком воздуха, рассчитывается следующим образом: $P = m_{outlet} / m_{inlet}$, где m_{inlet}, m_{outlet} - массовые расходы частиц на входе и выходе соответственно. Значение m_{inlet} принимается равным 0.5% от массового расхода воздуха.

Предполагаем, что частицы, в силу своего малого размера и массы (~**10-13** kg), не оказывают влияния на поток воздуха. Поэтому воздействием скопления частиц масла внутри маслоуловителя на поток воздуха также пренебрегаем.

Открытие модели

Скопируйте папку **C7 - Oil Catch Can** в свою рабочую директорию. Откройте сборку **OIL_CATCH_CAN.**asm.

📖 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **OIL_CATCH_CAN.asm**, расположенную в папке **C7 - Oil Catch Can\Ready To Run**, и запустить проект на расчет.*

Создание проекта FloEFD

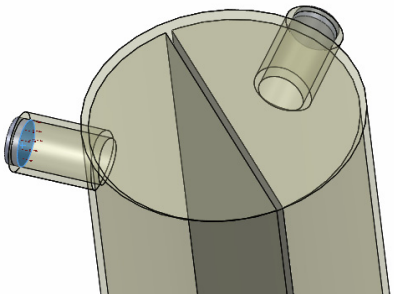
Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как показано ниже:

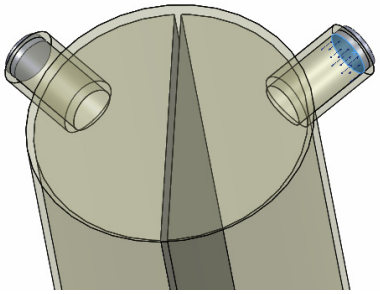
Имя проекта	*Oil particles*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц измерения	*SI*
Тип задачи	*Внутренняя*
Текучая среда по умолчанию	*Газы / Air*
Условия на стенках по умолчанию	*Адиабатическая стенка (шероховатость по умолчанию равна 0)*
Начальные условия	*Условия по умолчанию*

Задание граничных условий

Задайте граничные условия на входе и выходе, как показано в таблице ниже:

Тип	**Объемный расход на входе**
Имя	**Объемный расход воздуха на входе**
Поверхности	внутренняя поверхность крышки на входе (компонент **INLET_LID**)
Параметры: **Объемный расход** `100 l/min (0.00167 m^3/s)`	

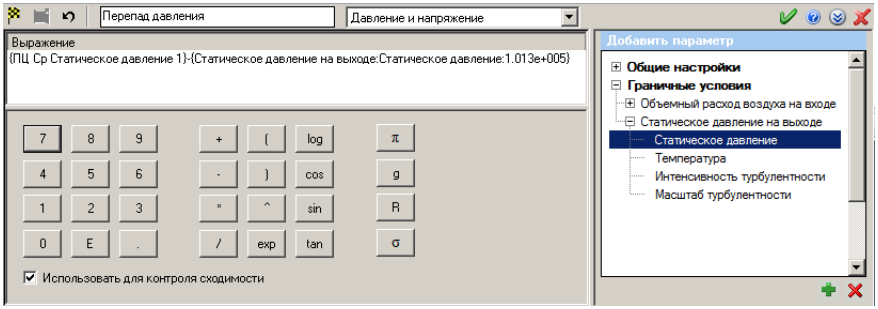


Тип	**Статическое давление**	
Имя	**Статическое давление на выходе**	
Поверхности	внутренняя поверхность крышки на выходе (компонент **OUTLET_LID**)	
Термодинамические параметры: Значения по умолчанию (101325 Pa и 293,2 K)		

Задание целей проекта

1. В **Дереве анализа** выберите граничное условие **Объемный расход воздуха на входе**.
2. Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхностные цели**.
3. В группе **Параметр** выберите **Ср Статическое давление**.
4. Кликните **OK** . Эта цель будет являться промежуточной для расчета перепада давления в маслоуловителе.
5. В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить цель-выражение**.
6. На панели в нижней части экрана нажмите кнопку **Добавить цель** .
7. Из списка **Добавить цель** выберите цель **ПЦ Ср Статическое давление 1** и кликните **Добавить** . Выбранная цель появится в поле **Выражение**.
8. На калькуляторе нажмите кнопку "-".
9. На панели в нижней части экрана нажмите кнопку **Добавить параметр** .
10. В списке **Добавить параметр** раскройте группу **Граничные условия**.
11. В группе **Граничные условия** раскройте подгруппу **Статическое давление на выходе** и кликните **Добавить** .
12. В качестве **Размерности** укажите **Давление и напряжение.**

13 В поле **Имя цели** введите **Перепад давления**.



14 Кликните **OK**.

15 Переименуйте созданную цель-выражение в **Перепад давления**.

16 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Цели** и из контекстного меню выберите **Добавить глобальные цели**.

17 В списке **Параметр** выберите **Момент (Y)** и кликните **OK** .

Задание настроек глобальной сетки

Задайте следующие настройки глобальной сетки:

Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	3 *(по умолчанию)*
Другие опции по умолчанию	

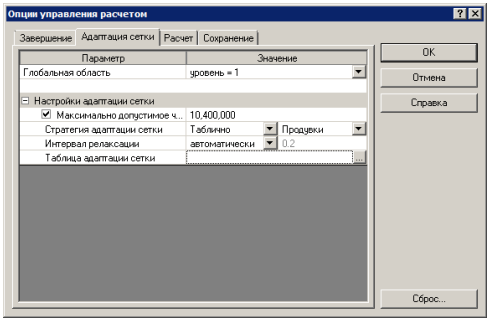
Адаптирование сетки в процессе расчета

Уровень начальной сетки был задан равным 3, но этого значения недостаточно для точного разрешения областей, в которых присутствуют высокие градиенты скорости и завихренность потока. Такое значение **Уровня начальной сетки** также может привести к неправильному определению траекторий частиц. Поэтому для того, чтобы улучшить качество решения в таких областях, следует произвести адаптирование сетки в процессе расчета.

1 Кликните **Flow Analysis > Опции управления расчетом**.

В Creo Parametric кликните ***Flow Analysis > Проект > Опции управления расчетом.***

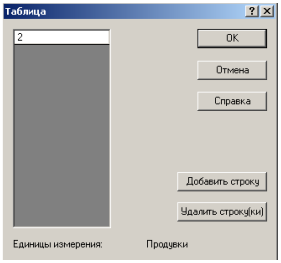
2 Перейдите на вкладку **Адаптация сетки**.



3 В группе **Глобальная область** выберите **уровень = 1**.

4 Раскройте группу **Настройки адаптации сетки** и убедитесь, что в качестве **Стратегии адаптации сетки** выбрано **Таблично**.

5 Перед тем, как отредактировать таблицу адаптаций сетки, убедитесь, что в качестве единиц измерения выбраны **Продувки**. Затем нажмите кнопку ... в поле **Таблица адаптаций сетки**.



6 В появившемся окне кликните **Добавить строку**. Появится пустая строка

7 Введите в эту строку значение 2. Это означает, что дробление сетки в процессе расчета произойдет, когда число продувок достигнет 2.

8 Кликните **OK**. Перейдите на вкладку **Завершение**.

9 Убедитесь, что в группе **Условия завершения** включено условие **Адаптации сетки**.

10 Выключите условие **Продувки**.

11 Кликните **OK**.

Сохраните модель и запустите расчет. В процессе расчета Вы можете видеть поля скоростей в плоскости **ASM_FRONT** или в другой плоскости, а также отслеживать, как дробления сетки улучшают окончательное решение задачи.

Задание материала "Моторное масло"

1 Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Инженерная база данных**.

2 В **Дереве базы данных** раскройте группу **Вещества > Жидкости > Заданы пользователем**.

3 На панели инструментов кликните **Новый элемент** . Появится незаполненная таблица **Свойства элемента**. Для того, чтобы задать значение какого-либо свойства, дважды кликните в соответствующую ячейку.

4 Задайте свойства материала так, как показано в таблице ниже:

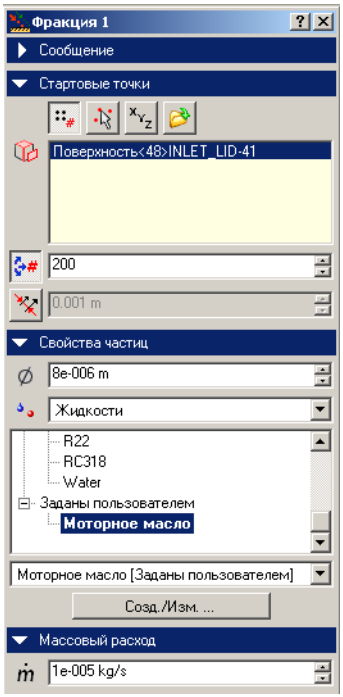
Имя	Моторное масло
Плотность	900 kg/m^3
Динамическая вязкость	0.01 Pa*s
Удельная теплоемкость	1900 J/(kg*K)
Коэффициент теплопроводности	0.2 W/(m*K)

Расчет движения частиц масла

1 В дереве анализа правой кнопкой мыши кликните по элементу **Расчеты движения частиц** и из контекстного меню выберите **Мастер проекта**.

2 Не меняя имени, кликните **Далее** .

3 Выберите граничное условие **Объемный расход воздуха на входе**, так, чтобы соответствующая поверхность появилась в группе **Стартовые точки**.



4 Задайте **Количество точек** равным 200.

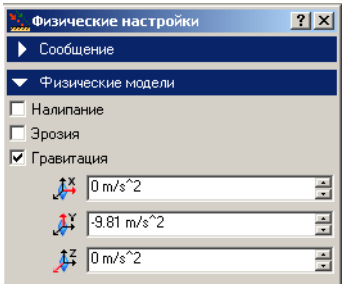
5 В группе **Свойства частиц** задайте **Диаметр** частиц равным `8e-06 m` и в качестве **Вещества** выберите созданное **Моторное масло** (**Вещества / Жидкости / Заданы пользователем**).

6 В поле **Массовый расход** введите значение `1e-05 kg/s`. Значение задается таким потому, что массовый расход частиц на входе был принят равным 0.5% от массового расхода воздуха.

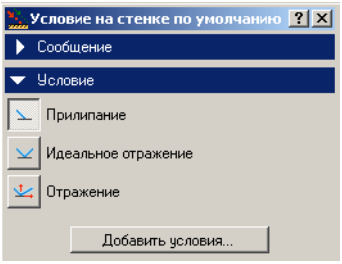
🕮 *Задаваемое **Количество точек** означает количество траекторий частиц, используемых для построения. Чем выше это значение, тем более точную информацию можно будет получить о возможных траекториях движения частиц. В результате можно получить более подробную картину распределения частиц в рассматриваемой области и, при необходимости, с большей точностью рассчитать их массовый расход.*

7 Кликните **Далее** .

8 В группе **Физические модели** выберите **Гравитация**. Кликните **Далее** .



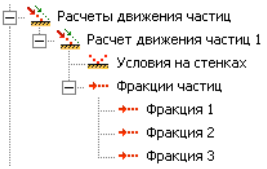
9 Убедитесь, что в диалоговом окне **Условие на стенке по умолчанию** выбрано **Прилипание**. Кликните **Далее** .



📖 *В **Расчете движения частиц** существует три типа условий, которые могут быть определены на стенке:* **Идеальное отражение, Прилипание** *и* **Отражение**. *Первые два типа означают, соответственно, полностью упругое и неупругое столкновения. В третьем случае необходимо задать коэффициенты восстановления, которые определяют соотношение тангенциальной скорости и скорости по нормали к стенке до и после столкновения.*

10 В группе **Представление по умолчанию** из списка **Показать траектории как** выберите **Линии**.

11 Кликните **OK** . В **Дереве анализа** появится новый элемент **Расчет движения частиц 1** с подэлементом **Фракция 1**.

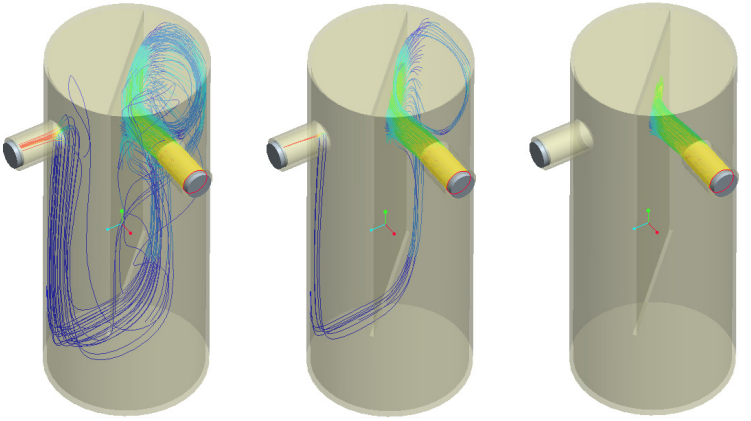


12 Кликните правой кнопкой мыши по элементу **Фракция 1** и из контекстного меню выберите **Клонировать**. Таким же образом создайте элементы **Фракция 2** и **Фракция 3**.Для **Фракции 2** и **Фракции 3** задайте значение **Диаметра** частиц равным `1.3e-05 m` и `1.8e-05 m` соответственно.

13 Кликните правой кнопкой мыши по элементу **Расчет движения частиц 1** и из контекстного меню выберите **Расчет**.

Результаты

Чтобы отобразить траектории движения частиц определенной фракции, правой кнопкой мыши кликните по соответствующему элементу **Фракция** и из контекстного меню выберите **Показать**. На рисунках ниже показаны траектории движения частиц, раскрашенные по параметру **Скорость**.



диаметр 8μm диаметр13μm диаметр18μm

С помощью постпроцессорного элемента **Поверхностные параметры** можно рассчитать, сколько частиц каждого размера выходит из маслоуловителя через выходной патрубок. Это значение можно оценить с помощью интегрального параметра **Число частиц** на поверхности выхода.

Зная эти значения, можно оценить долю частиц масла, задержанных маслоуловителем:

- для частиц диаметром 18μm - это 100%,
- для частиц диаметром 13μm - 97%,
- для частиц диаметром 8μm - около 90%.

D

Примеры для модуля HVAC

Примеры **модуля HVAC** демонстрируют использование дополнительных возможностей и элементов этого модуля для решения задач нагревания, вентиляции и кондиционирования воздуха. Эта функциональность доступна только для пользователей модуля HVAC.

D1 - Галогенный прожектор 150W (Halogen Floodlight 150W)

D2 - Больничная палата (Hospital Room)

D3 - Распространение загрязнений в уличном каньоне (Pollutant Dispersion in the Street Canyon)

Примеры для модуля HVAC:

D1

Галогенный прожектор 150W

Эта возможность доступна только пользователям модуля HVAC.

Постановка задачи

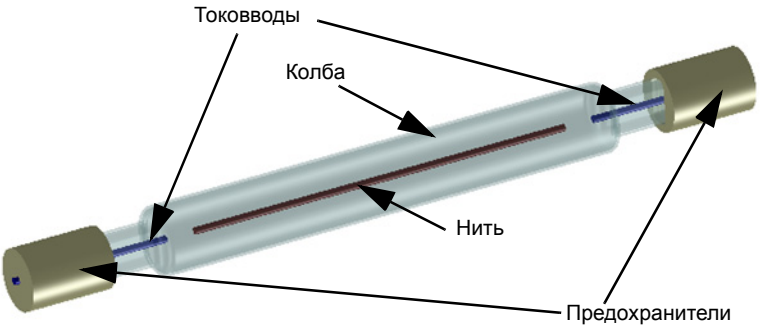
Этот пример демонстрирует возможности FloEFD по моделированию конвективного и радиационного теплообмена с учетом поглощения излучения в полупрозрачных телах, а также с учетом спектрального состава излучения. В примере описывается создание проекта, задание поглощающих свойств материалов полупрозрачных тел, задание условий излучения и расчетных целей.

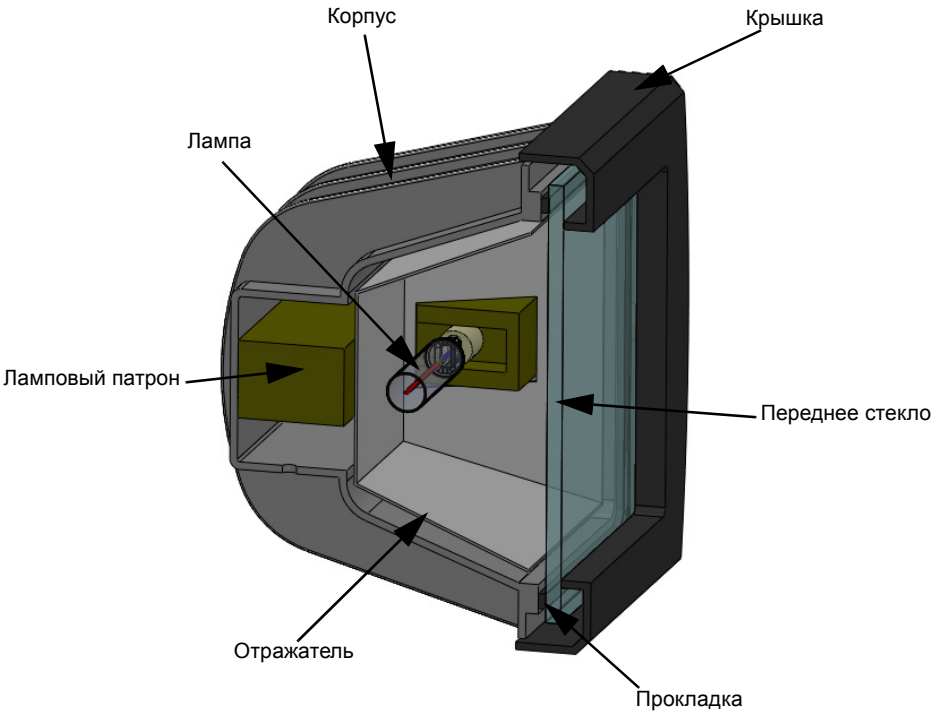
В задаче рассматривается галогенный прожектор в алюминиевом корпусе, который состоит из следующих компонентов: переднего кварцевого стекла, силиконовой прокладки, алюминиевого внутреннего отражателя, керамического лампового патрона и линейной галогенной лампы мощностью 150W.

Линейная галогенная лампа состоит из колбы, выполненной из кварцевого стекла, вольфрамовой нити, молибденовых токовводов и керамических предохранителей. Лампа заполнена аргоном под давлением 2 atm и при температуре 293.2 K.

Рассмотрим работу прожектора в помещении при следующих условиях: комнатная температура (~20 °C), принудительное охлаждение отсутствует.

Компоненты прожектора и галогенной лампы показаны на рисунках ниже.





Далее в таблице Вы можете видеть типичные значения максимально допустимых рабочих температур некоторых из этих компонентов. Цель данного моделирования - убедиться в том, что колба лампы и переднее стекло не перегреваются.

Компонент	**Максимально допустимая температура**
Токовводы	350 °C
Стекло колбы	900 °C

Открытие модели

Скопируйте папку **D1 - Halogen Floodlight** в свою рабочую директорию. Откройте сборку **Floodlight.asm**. Выберите базовую конфигурацию.

🕮 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проекта FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **Floodlight.asm**, расположенную в папке **D1 - Halogen Floodlight\Ready To Run**, и запустить проект на расчет.*

Создание проекта FloEFD

Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как показано ниже:

Имя проекта	*Floodlight*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц измерения	*SI*
Тип задачи	*Внешняя*
Физические модели	*Теплопроводность в твердых телах,* *Радиационный теплообмен:* *Модель излучения: Дискретные ординаты* *Излучение окружающей среды:* *Температура окружающей среды* `293.2 K`; *Поглощение в твердом теле;* *Спектр: Количество диапазонов* = `2`, *Ширина диапазона 1* `2500 nm`; *Гравитация: Y компонента* `-9.81 m/s^2`
Текучая среда по умолчанию	*Газы / Air (Выбранные по умолчанию)* *Газы / Argon (снимите галочку "Выбранные по умолчанию")*
Материал по умолчанию	*Metals / Aluminum*
Условия на стенках по умолчанию	*Радиационные свойства поверхностей по умолчанию: Предопределенные / Real Surfaces / Aluminum, commercial sheet* *Шероховатость по умолчанию равна 0*
Начальные условия	*Условия по умолчанию*

🕮 *В этом приборе используется только один полупрозрачный материал - кварцевое стекло. Его поглощающие свойства задаются в зависимости от длины волны с учетом резкого изменения этих свойств при длине волны 2500 nm.*

Ультрафиолетовое излучение вольфрамовой нити при 2900K незначительно. Таким образом, двухдиапазонный спектр с шириной диапазона в 2500 nm позволяет довольно точно моделировать поглощение излучения в стеклянных компонентах лампы.

Настройка величины расчетной области

Задайте величину расчетной области, как показано ниже:

X max = 0.15 m	Y max = 0.2 m	Z max = 0.15 m
X min = 0 m	Y min = -0.12 m	Z min = -0.15 m

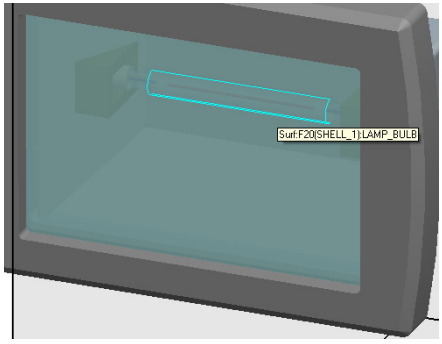
Задайте условие **Симметрия** для **X min**

Задание подобласти течения

Галогенные лампы наполняются инертным газом с добавлением небольшого количества галогена (йода или брома). Исходя из целей данного моделирования, предполагаем, что лампа наполнена только инертным газом. Газ в галогенной лампе находится под давлением, в несколько раз превышающим атмосферное. Для задания газа, заполняющего лампу, и его давления необходимо воспользоваться элементом **Подобласть течения**.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Подобласть течения**.

2 Выберите внутреннюю цилиндрическую поверхность лампы (компонент **LAMP.ASM\LAMP_BULB**). Подобласть течения, которую вы собираетесь создать, сразу же отображается в графической области в виде тела, окрашенного в голубой цвет.



3 Убедитесь, что в группе **Текучая среда** из списка **Тип текучей среды** выбрано **Газы/Реальные газы/Пар.** В списке текучих сред снимите галочку **Air (Газы)**, чтобы выбранным остался только **Argon**.

4 В группе **Термодинамические параметры** задайте значение **Давления** P, равное `2 atm`.

5 Кликните **OK**.

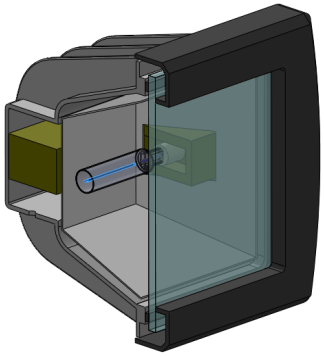
Задание тепловых условий и условий излучения

В FloEFD есть несколько способов задания теплового источника. Площадь поверхности цилиндрической прямолинейной нити может существенно отличаться от действительной площади поверхности спирали. Если Вы создаете тепловой источник и задаете его мощность, эта разница должна учитываться. Чтобы избежать различий между действительным и заданным радиационным теплообменом, Вы можете:

a) создать тепловой источник и задать его температуру,
b) затем создать радиационный источник и задать его мощность.

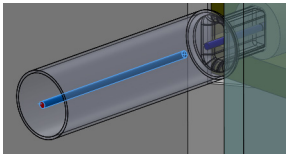
Для того, чтобы это сделать, создаем **Объемный тепловой источник** и задаем его температуру, равную 2900K. Конвективный тепловой поток определяется как **Поверхностная цель**, а мощность **Радиационного источника** определяется как разность между 150 Watt и величиной конвективного теплового потока. И наконец, из расчета должно быть исключено излучение нити как горячего тела, поэтому поверхность нити следует задать со свойствами, соответствующими абсолютно белому телу.

Задайте объемный поверхностный источник, как показано в таблице ниже:

Тип	**Объемный тепловой источник**	
Имя	**2900 K**	
Компоненты	**Нить (LAMP.ASM\LAMP_WIRE)**	
Параметр: **Температура** `2900 K`		

📖 *Действительную температуру нити можно оценить, исходя из ее цветовой температуры. Типичные значения цветовой температуры нити указываются производителем ламп. Для температуры нити около 3000 K цветовая температура вольфрама на 2-3 % превышает эквивалентную ей действительную температуру.*

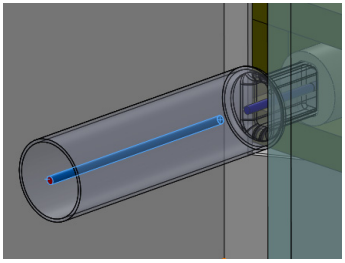
Задайте цели, необходимые для расчета мощности конвективного теплообмена:

ТИП ЦЕЛИ	ПАРАМЕТР ЦЕЛИ	ПОВЕРХНОСТЬ
Поверхностная цель	Тепловая мощность	Поверхности нити (компонент **LAMP.ASM\LAMP_WIRE**), расположенные внутри расчетной области. Выберите нить (компонент **LAMP.ASM\LAMP_WIRE**) в дереве модели. 

Задание радиационного источника

Чтобы задать радиационный источник, выполните следующие действия:

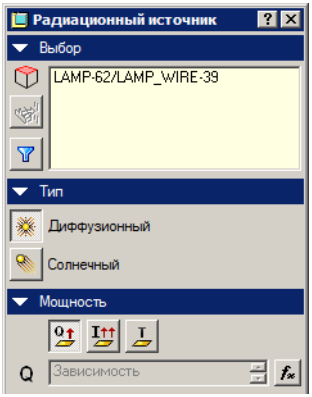
1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Радиационный источник**.



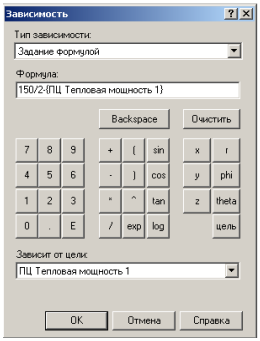
2 В дереве модели выберите нить (компонент **LAMP.ASM\LAMP_WIRE**). Все поверхности нити выбраны как **Поверхности для задания радиационного источника** .

3 В группе **Тип** выберите **Диффузионный** .

4 В группе **Мощность** выберите **Мощность** и затем кликните **Зависимость** .



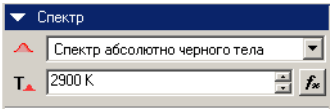
5 В списке **Тип зависимости** выберите **Задание формулой**. В поле **Формула** введите формулу для полной тепловой мощности, излучаемой источником. Для того, чтобы добавить цель в формулу, выберите цель в списке **Зависит от цели** и кликните **цель** на панели ввода. Получившееся выражение должно быть следующим:
`150/2-{ПЦ Тепловая мощность 1}`



🕮 *Объемный тепловой источник используется для задания тепла, выделяемого нитью и передающегося за счет конвекции. Чтобы задать остальную тепловую мощность, передающуюся излучением, необходимо вычесть рассчитанную величину конвективного теплового потока объемного источника из полной тепловой мощности.*

6 Кликните **OK**, чтобы вернуться в диалоговое окно **Радиационный источник**.

7 В группе **Спектр** выберите **Спектр абсолютно черного тела** и для **Температуры абсолютно черного тела** задайте значение `2900 K`.



8 Кликните **OK**.

Новый элемент **Диффузионный Радиационный источник 1** появляется в **Дереве анализа**.

Задание поверхностей радиационного теплообмена

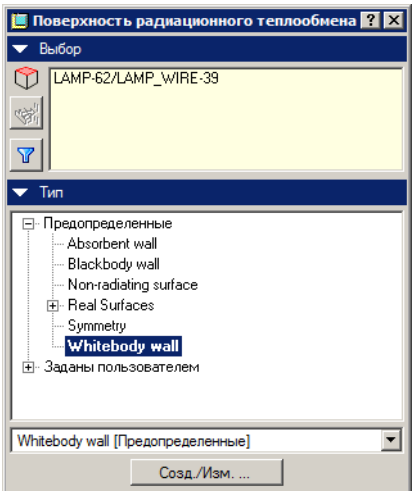
Чтобы задать поверхности радиационного теплообмена, выполните следующие действия:

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхность радиационного теплообмена**.

✎ *В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > Поверхность радиационного теплообмена**.*

2 В группе **Тип** для поверхностей радиационного теплообмена раскройте список **Предопределенные** и выберите **Whitebody wall**.

3 В дереве анализа FloEFD выберите элемент **Диффузионный Радиационный источник 1**.



4 Кликните **OK** ✔. Переименуйте новый элемент **Поверхность радиационного теплообмена 1** в `Поверхность радиационного теплообмена - Нить`. Кликните в любом месте графической области, чтобы очистить выделение.

5 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхность радиационного теплообмена**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > Поверхность радиационного теплообмена**.*

6 В группе **Тип** нажмите кнопку **Созд./Изм. ...**(Создать/Изменить).

7 В **Инженерной базе данных** раскройте группу **Поверхности радиационного теплообмена > Заданы пользователем**, создайте новый элемент и измените его **Имя** на `Алюминий шлифованный`.

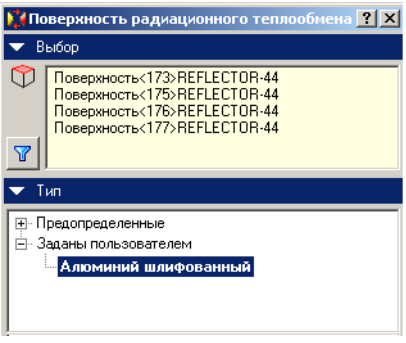
8 Задайте параметры поверхности так, как показано ниже:

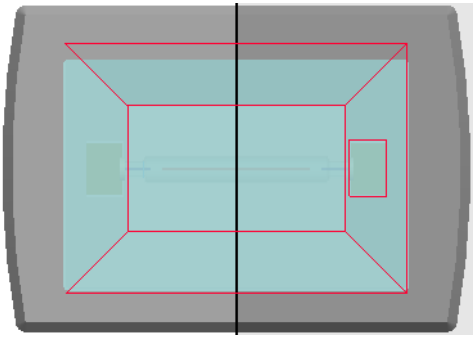
Свойство	Значение
Имя	Алюминий шлифованный
Комментарии	
Тип поверхности радиационного теплообмена	Стенка
Отражение	Диффузное и зеркальное
Коэффициент зеркальности	0.8
Коэффициент диффузного отражения	0.2
Степень черноты	Задание для теплового и солнечного излучения
Степень черноты	0.1
Коэффициент поглощения солнечного излучения	0.1

9 Сохраните созданную поверхность радиационного теплообмена и выйдите из **Инженерной базы данных**.

10 В группе **Тип** для поверхностей радиационного теплообмена раскройте список **Заданы пользователем** и выберите `Алюминий шлифованный`.

11 Выберите внутренние поверхности отражателя (компонент **REFLECTOR**), расположенные (по крайней мере, частично) внутри рачетной области.





12 Кликните **OK** ✔. Измените имя новой поверхности радиационного теплообмена на `Поверхность радиационного теплообмена - Отражатель`.

Задание материалов

Для непрозрачных компонентов задайте следующие **Материалы**:

Нить (компонент **LAMP.ASM\LAMP_WIRE)**	**Предопределенные\Metals\Tungsten**
Токоввод (компонент **LAMP.ASM\LAMP_PINCH**, первый в дереве**)**	**Предопределенные\Molybdenum**
Предохранитель (компонент **LAMP.ASM\LAMP_BASE**, первый в дереве**)** **Патрон (**компонент **HOLDER)**	**Предопределенные\Ceramics\Alumina (96%)**
Прокладка (компонент **SEAL)**	**Предопределенные\Glasses and Minerals\Glass Lid Seal**

Задание прозрачности тел и материалов

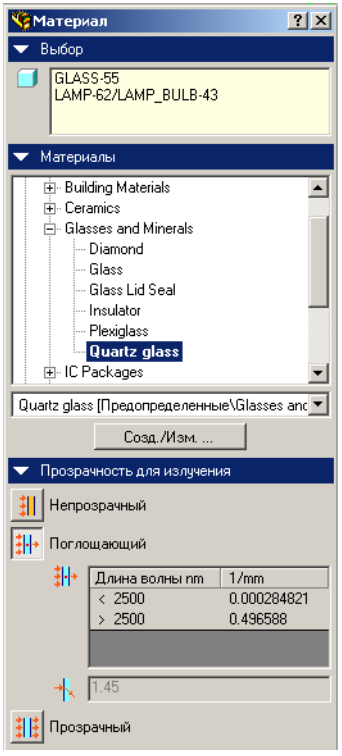
Для колбы и переднего стекла задайте материал **Quartz glass** и определите эти компоненты как полупрозрачные для излучения.

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по элементу **Граничные условия** и из контекстного меню выберите **Добавить материал**.

2 В дереве модели выберите стекло и колбу (компоненты **GLASS** и **LAMP.ASM\LAMP_BULB)**.

3 В группе **Материалы** раскройте список **Предопределенные** и выберите **Quartz Glass** в группе **Glasses and Minerals**.

4 В группе **Прозрачность для излучения** выберите **Поглощающий** .

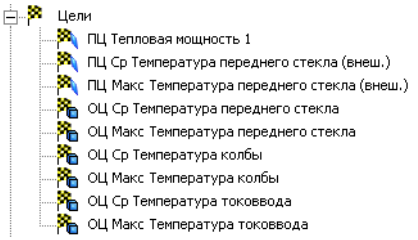


🕮 *Поглощающее тело является полупрозрачным. Это означает, что оно поглощает тепловое излучение внутри своего объема. Эта опция доступна, только если в инженерной базе данных для материала задан коэффициент поглощения, а в **Мастере проекта** или **Общих настройках***

включена опция ***Поглощение в твердом теле****. Значения* ***Коэффициента поглощения*** *и* ***Показателя преломления*** *заданы в инженерной базе данных, а здесь приведены для справки.*

5 Кликните **OK**. Теперь FloEFD будет трактовать этот материал и все тела, для которых он задан, как полупрозраные для теплового излучения.

Задание целей



На внешней поверхности стекла (компонент **GLASS)** задайте поверхностные цели по максимальной и средней температуре.Кроме того, задайте объемные цели для стекла, колбы и токоввода (компоненты **GLASS**, **LAMP.ASM\LAMP_BULB** и **LAMP.ASM\LAMP_PINCH**, первый в дереве) по максимальной и средней температуре (следует выбрать **Температура (Твердое тело)** в качестве параметра цели). Вы можете переименовать их так, как показано на рисунке, для того, чтобы было проще отслеживать их в процессе расчета.

Задание настроек глобальной сетки

Задайте следующие настройки глобальной сетки:

Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	4
Другие опции по умолчанию	

Настройка локальной сетки

Для лучшего разрешения полупрозрачных тел и тонкой нити целесообразно настроить расчетную сетку. Наиболее подходящий путь для этого - задание **Локальной сетки**, которая позволит получить более точное решение в этих специфических областях и избежать чрезмерной густоты сетки в других областях.

1 В дереве модели выберите нить и колбу галогенной лампы (компоненты **LAMP.ASM\LAMP_WIRE, LAMP.ASM\LAMP_PINCH, LAMP.ASM\LAMP_BULB**).

2 Кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка** и из контекстного меню выберите **Добавить локальную сетку**.

3 В группе **Дробление ячеек** с помощью слайдера установите **Уровень дробления ячеек в твердом теле** равным 6.

4 В группе **Каналы** задайте **Характерное число ячеек поперек канала** равным 7, а **Максимальный уровень дробления каналов** равным 1.

5 В группе **Дополнительные параметры дробления** установите **Уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели** равным 1.

6 Кликните **OK**, чтобы сохранить настройки локальной сетки.

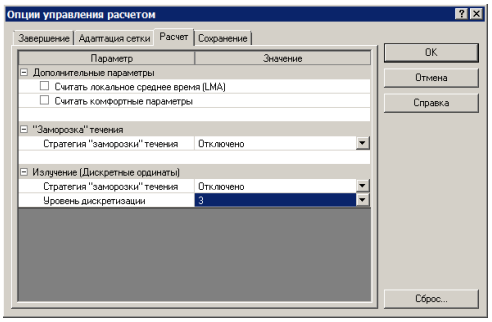
Настройка опций управления расчетом

1 Кликните **Flow Analysis > Опции управления расчетом**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Проект > Опции управления расчетом.***

2 Перейдите на вкладку **Расчет**.

3 Убедитесь, что в группе **Излучение (Дискретные ординаты)** для **Уровня дискретизации** выбрано 3. Это значение соответствует заданным условиям и в случае компактных источников излучения позволяет получить приемлемую точность решения.



Уровень дискретизации управляет разбиением всей расчетной области на равные телесные углы или направления. Чем выше уровень дискретизации, тем выше точность, но для расчета требуется больше процессорного времени и ресурсов памяти.

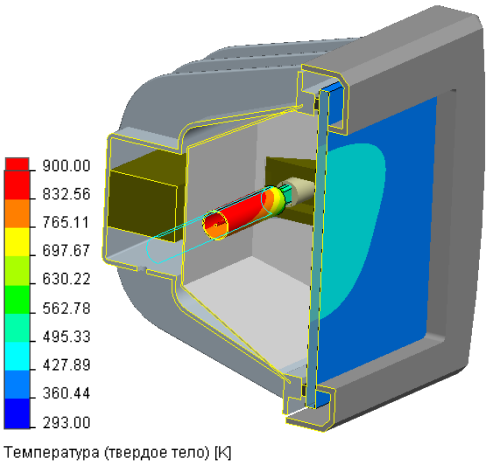
4 Кликните **OK**.

Сохраните модель и запустите расчет.

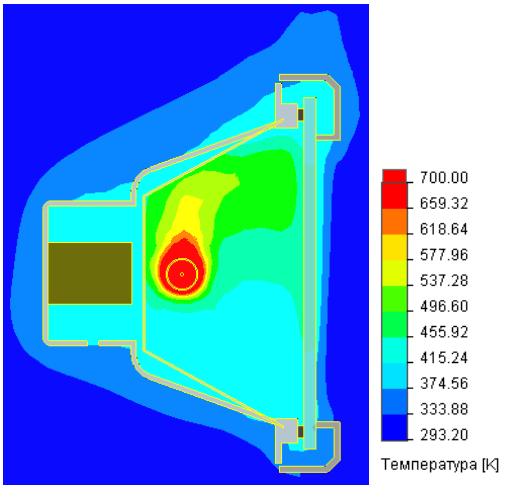
Результаты

В соответствии с полученными результатами можно сказать, что переднее стекло и колба лампы работают при допустимых температурах.

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение
ПЦ Ср Температура переднего стекла (внеш.)	[K]	414,4394745	413,3632947	411,6856544	414,4394745
ПЦ Макс Температура переднего стекла (внеш.)	[K]	466,3195499	464,5295859	461,7595886	466,3195499
ОЦ Ср Температура колбы	[K]	710,7656618	710,02238	708,8575382	710,7762164
ОЦ Макс Температура колбы	[K]	927,9743251	927,3833648	926,4955847	927,9743251
ОЦ Ср Температура токоввода	[K]	456,1719025	455,5481749	454,58188	456,1918908
ОЦ Макс Температура токоввода	[K]	481,5773112	480,9905985	480,0521668	481,6813377
ОЦ Ср Температура переднего стекла	[K]	415,8596904	414,7707877	413,0714827	415,8596904
ОЦ Макс Температура переднего стекла	[K]	467,6627215	465,8250295	463,0208628	467,6627215
ПЦ Тепловая мощность 1	[W]	8,564844916	8,567709638	8,564689549	8,571888672



Распределение температуры по поверхности стекла в диапазоне от 293 до 900 K.



Распределение температуры в плоскости симметрии в диапазоне от 293 до 700 K.

D2

Больничная палата

Некоторые элементы данного примера доступны только пользователям модуля HVAC.

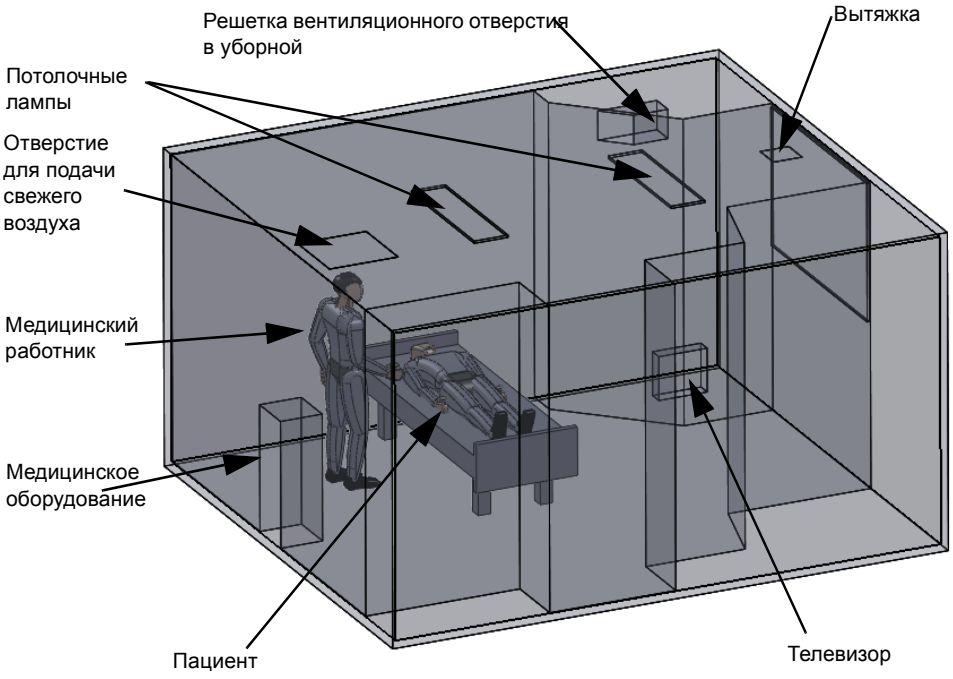
Постановка задачи

Данный пример демонстрирует, как с помощью FloEFD можно оценить эффективность работы системы вентиляции помещения. В FloEFD предусмотрена возможность расчета комфортных параметров, с помощью которых можно определить качество воздуха и комфортность микроклимата в помещении. В примере показано, как создать проект, т.е. задать тепловые источники, граничные условия и расчетные цели, а также как получить значения комфортных параметров.

В данной задаче рассматривается больничная палата, в которой находятся медицинский работник и пациент (он лежит на кровати). Лампы, медицинское оборудование и телевизор, которые находятся в помещении, являются тепловыми источниками. Пациент и медицинский работник также выделяют тепло. Источником загрязнения воздуха является дыхание больного пациента. В рассматриваемом помещении предусмотрена система вентиляции, которая включает в себя потолочный диффузор, вытяжки в потолке и в стене уборной.

Необходимо определить, насколько эффективно система вентиляции удаляет загрязняющие вещества из воздуха. Также необходимо выяснить, комфортно ли людям находиться в этом помещении при заданных условиях.

Модель больничной палаты представлена на рисунке ниже.



Чтобы определить, насколько эффективно вентиляционная система удаляет загрязняющие веществ из воздуха, необходимо знать следующие параметры: Эффективность удаления загрязнений (CRE) и Локальный показатель качества воздуха (LAQI).

Чтобы оценить, комфортно ли находиться людям в помещении при заданных условиях, нужно рассчитать следующие параметры: Показатель воздухораспределения (ADPI), Индекс комфортности по Фангеру (PMV) и Прогнозируемый процент недовольных качеством среды (PPD).

Конфигурация модели

Скопируйте папку **D2 - Hospital Room** в свою рабочую директорию. Откройте сборку **hospital_room.asm**.

📖 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **hospital_room.asm**, расположенную в папке **D2 - Hospital Room\Ready To Run**, и запустить на расчет нужные проекты.*

Создание проекта

Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как изложено ниже:

Имя проекта	*Hospital room*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц измерения	*SI, единицы измерения для параметра Температура: °C (Celsius)*
Тип задачи	*Внутренняя* *Исключить полости без условий течения*
Физические модели	*Гравитация: Y компонента* `-9.81 m/s^2`
Текучая среда по умолчанию	*Газы / Air* *Газы / Выдыхаемый воздух (задан пользователем)* *Кликните Новый и в Инженерной базе данных создайте новый элемент с именем* `Выдыхаемый воздух`*. Для этого скопируйте предопределенный элемент Air, доступный из группы Вещества\Газы\Предопределенные, в группу Вещества\Газы\Заданы пользователем*
Условия на стенках по умолчанию	*По умолчанию*
Начальные условия	*Термодинамические параметры:* *Температура* `19.5°C` *Концентрации:* *Массовая концентрация Air* - `1` *Массовая концентрация выдыхаемого воздуха* - `0`

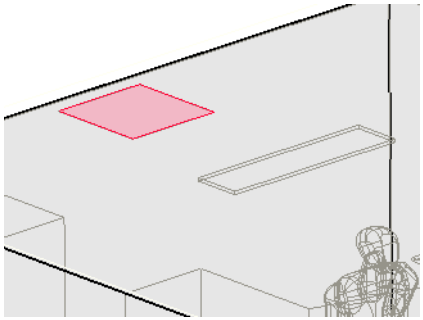
После создания проекта появится сообщение, предупреждающее о том, что не удалось определить проточную область. Вам будет предложено создать заглушки с помощью инструмента **Создание заглушек**. Нажмите **Нет**, чтобы пропустить этот шаг. Обнаруженная проблема обусловлена наличием твердотельного компонента **FLUIDVOLUMEPART**. Чтобы трактовать этот компонент как область текучей среды, отключите его к диалоговом окне **Flow Analysis > Управление компонентами**.

Необходимо выполнить перестроение проекта. Для этого кликните **Flow Analysis > Проект > Перестроение**.

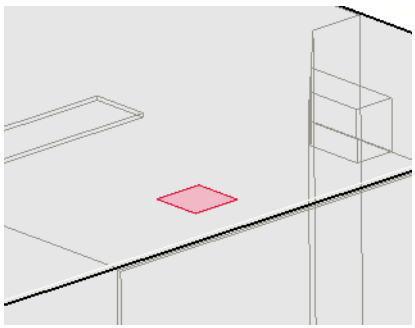
Граничные условия

Задайте граничные условия для потока на входе и выходе, как показано в таблице ниже:

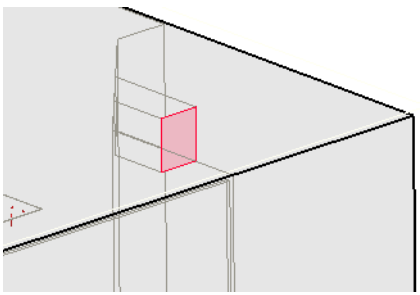
Тип	**Объемный расход на входе**
Имя	**Объемный расход на входе 1**
Поверхности	внутренняя поверхность отверстия для подачи свежего воздуха, которая находится в комнате (компонент **ROOM**) над столом с медицинским оборудованием
Подача свежего воздуха Параметры: **Объемный расход** `4.8 m^3/min`	

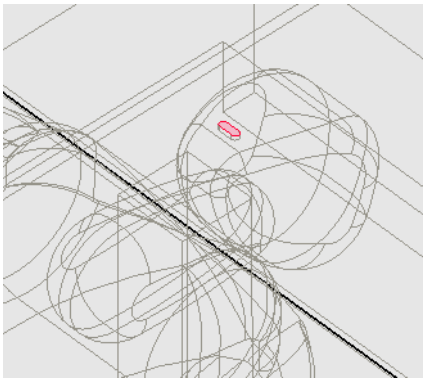


Тип	**Объемный расход на выходе**
Имя	**Объемный расход на выходе 1**
Поверхности	внутренняя поверхность вытяжки, которая расположена у окна помещения (компонент **ROOM**)
Вытяжка воздуха Параметры: **Объемный расход** `2.6 m^3/min`	



Тип	**Давление окружающей среды**
Имя	**Давление окружающей среды 1**
Поверхности	внутренняя поверхность вентиляционного отверстия в комнате (компонент **ROOM**)
Вытяжка воздуха через вентиляционное отверстие в уборной **Термодинамические параметры**: Значения по умолчанию (101325 Pa и 19.5°C)	



Тип	**Объемный расход на входе**	
Имя	**Объемный расход на входе 2**	
Поверхности	поверхность рта пациента (компонент **PATIENT**)	
Дыхание пациента Параметры: **Объемный расход** `12 l/min` **Концентрации веществ**: **Массовая концентрация** *воздуха (***Air)** - 0 **Массовая концентрация выдыхаемого воздуха** - 1		

Задание тепловых источников

В больничной палате присутствуют следующие тепловые источники: потолочные лампы, телевизор и медицинское оборудование. Необходимо учитывать, что пациент и медицинский работник также являются источниками тепла. Количество тела, выделяемого человеком, зависит от вида его деятельности. Лежащий пациент выделяет меньше тепла, чем медицинский работник, чья работа связана с физической активностью и концентрацией внимания.

Т.к. в данной задаче не рассматривается теплопроводность в твердых телах, мощность поверхностных тепловых источников считается постоянной.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхностный тепловой источник**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > Поверхностный тепловой источник**.*

2 В дереве модели выберите пациента (компонент **PATIENT.ASM**). Этот компонент появится в поле **Поверхности для задания поверхностного теплового источника** .

3 В качестве **Параметра** задайте **Тепловую мощность** `81 W`.

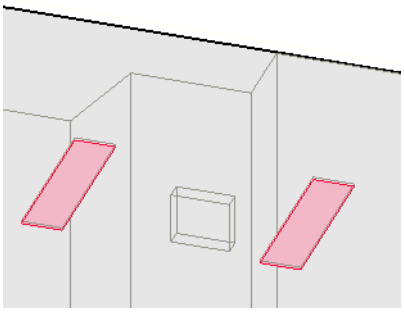
4 Кликните **OK** .

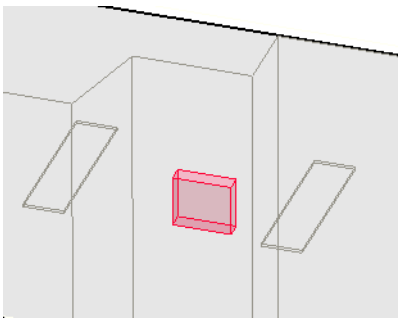
Переименуйте созданный тепловой источник в `Пациент`.

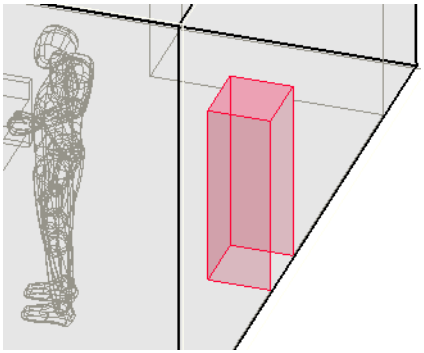
Таким же образом задайте поверхностный тепловой источник мощностью `144 W` на всех поверхностях медицинского работника (компонент **CAREGIVER.ASM**).

Переименуйте созданный тепловой источник в `Мед.работник`.

Другие источники тепла представлены не отдельными компонентами, а с помощью различных вытягиваний и вырезов в комнате (компонент **Room**). Задайте тепловые источники, как показано в таблице ниже:

Тип	**Поверхностный тепловой источник**	
Имя	**Потолочные лампы**	
Поверхности	обе внутренние поверхности элементов, обозначающих лампы в комнате (компонент **ROOM**)	
Параметры: **Тепловая мощность** `120 W`		

Тип	**Поверхностный тепловой источник**	
Имя	**Телевизор**	
Поверхности	все внутренние поверхности элемента, обозначающего телевизор в комнате (компонент **ROOM**)	
Параметры: **Тепловая мощность** `50 W`		

Тип	**Поверхностный тепловой источник**	
Имя	**Медицинское оборудование**	
Поверхности	все внутренние поверхности элементов, обозначающих медицинское оборудование в комнате (компонент **ROOM**)	
Параметры: **Тепловая мощность** `50 W`		

Задание опций управления расчетом

По умолчанию, расчет комфортных параметров в FloEFD отключен, т.к. это позволяет затрачивать меньше процессорного времени и ресурсов памяти. Помимо комфортных параметров, с помощью FloEFD можно рассчитать Локальное среднее время (LMA) и Локальный индекс смены воздуха (LACI):

- LMA - это среднее время, за которое поток проходит от отверстия входа до какой-либо расчетной точки с учетом и конвекции, и диффузии.
- LACI (Локальный индекс смены воздуха) - это отношение величины, обратной кратности воздухообмена V/Q, (V - объем помещения, Q - объемный расход текучей среды, поступающей в это помещение), ко времени τ (среднее время, за которое поток проходит от отверстия входа до расчетной точки) с учетом как конвекции, так и диффузии.

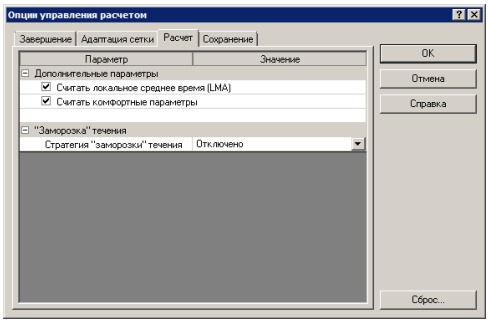
Расчет комфортных параметров, а также LMA и LACI может быть включен в диалоговом окне **Опции управления расчетом**.

1 Кликните **Flow Analysis > Опции управления расчетом**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis** > **Проект** > **Опции управления расчетом**.*

2 Перейдите на вкладку **Расчет**.

3 Включите опции **Считать локальное среднее время (LMA)** и **Считать комфортные параметры**.

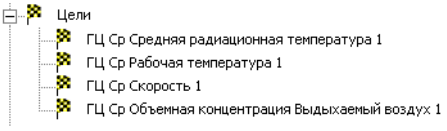


🕮 *Включение опции* **Считать локальное среднее время (LMA)** **Считать локальное среднее время (LMA)** *позволяет рассчитать LMA, Безразмерное LMA и LACI.*

4 Кликните **OK**.

Задание целей

Задайте следующие глобальные цели: **Ср Средняя радиационная температура**, **Ср Рабочая температура**, **Ср скорость** и **Ср Объемная концентрация Выдыхаемый воздух**.



🕮 **Среднюю радиационную температуру** *и* **Рабочую температуру** *Вы можете использовать в качестве цели только после того, как включите расчет комфортных параметров в диалоговом окне* **Опции управления расчетом**.

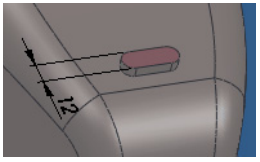
Изменение настроек глобальной сетки

1 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**.

2 Задайте следующие настройки глобальной сетки:

Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	4 *(по умолчанию)*
Другие опции по умолчанию	

🕮 *FloEFD определил* **Минимальный зазор** *равным ширине поверхности, обозначающей рот пациента (0.012 m).*



3 Кликните **OK**, чтобы сохранить настройки глобальной сетки и выйти из этого диалогового окна.

Настройка локальной сетки

Для подробного разрешения сложной геометрии компонентов **CAREGIVER** и **PATIENT**, а также точного учета тепла, выделяемого с их поверхностей, следует задать **Локальную сетку.**

1. Кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка** и из контекстного меню выберите **Добавить локальную сетку**.
2. В дереве модели выберите компоненты **CAREGIVER.ASM** и **PATIENT.ASM**.
3. В группе **Дробление ячеек** с помощью слайдера установите **Уровень дробления ячеек в текучей среде** равным 2.
4. В группе **Дополнительные параметры дробления** установите **Уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели** равным 4.
5. Кликните **OK**, чтобы сохранить настройки локальной сетки.

Запустите расчет. В процессе расчета Вы можете заметить, что цель **Ср Объемная концентрация Выдыхаемый воздух** сходится медленнее остальных. Ждать, пока решение полностью сойдется, необязательно. Можно остановить расчет раньше, например, когда будет достигнута сходимость других целей. Это позволит сократить процессорное время.

Результаты

Просмотр комфортных параметров

Расчет комфортных параметров позволяет определить интенсивность работы вентиляции в помещении. Таким образом, можно оценить качество воздуха в этом помещении. Также можно выяснить, комфортна ли температура воздуха для людей, живущих или работающих при данных условиях. Просмотреть полученные значения комфортных параметров позволяют инструменты обработки результатов.

Оценить, насколько эффективно система вентиляции удаляет загрязненный воздух, можно с помощью следующих двух параметров:

- **Эффективность удаления загрязнений (CRE)**. Этот параметр означает эффективность работы системы вентиляции по удалению загрязненного воздуха из всего рассматриваемого пространства. Для идеальной системы CRE = 1. Значения выше или ниже 1 означают соответственно высокую или низкую эффективность работы системы вентиляции.
- **Локальный показатель качества воздуха (LAQI)**. Этот параметр означает эффективность работы системы вентиляции по удалению загрязненного воздуха из определенной точки пространства.

Следующие параметры позволяют определить, насколько комфортной является температура для людей, находящихся в этом вентилируемом помещении:

- **Средняя радиационная температура (MRT)** - однородная температура воображаемого черного тела, отдающего в окружающую среду столько же теплоты за счет радиационного излучения, сколько некий условный пользователь.
- **Рабочая температура** - однородная температура воображаемого черного тела, отдающего в окружающую среду столько же теплоты за счет радиационного излучения и конвекции, сколько некий условный пользователь.
- **Оценочная температура** - это разность между температурой в точке рассматриваемой зоны и температурой окружающей среды. *"Оценочная"* означает, что температура в точке определяется на основе ощущений человека (ощущения тепла или холода в какой-либо части тела), связанных с подвижностью и температурой воздуха, при условии, что влажность и радиационное излучение постоянны.
- **Показатель воздухораспределения (ADPI)** - это процент точек в помещении, в которых скорость воздуха меньше 0.35 m/s, а оценочная температура находится в пределах от -1.7 °C до 1.1 °C.

  🕮*Обратите внимание, что в качестве объемных параметров оценочная температура или ADPI рассчитываются в заданном объеме. Во всех других случаях рассматривается вся расчетная область.*

- **Индекс комфортности по Фангеру (PMV)** - это показатель оценки микроклимата большой группой людей по 7-балльной шкале, основанной на тепловом балансе тела человека. Тепловой баланс достигается тогда, когда тепло, производимое человеком, становится равным тепловым потерям в окружающую среду.

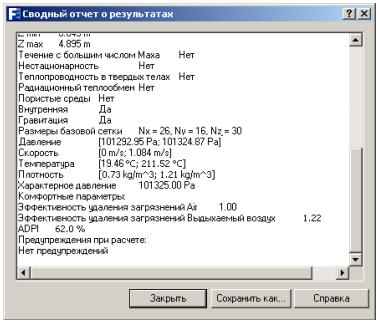
холодно	прохладно	довольно прохладно	нейтральная оценка	довольно тепло	тепло	жарко
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

- **Прогнозируемый процент недовольных качеством среды (PPD)** - показатель теплового дискомфорта или неудовлетворенности людей, который выражается в процентном отношении людей, которым при данных условиях слишком холодно или слишком жарко.

Получение значения CRE

Рассчитанное значение Эффективности удаления загрязнений (CRE) Вы можете увидеть в сводном отчете о результатах.

В дереве анализа кликните правой кнопкой мыши по иконке **Результаты** и из контекстного меню выберите **Сводный отчет**.



Значение **CRE Выдыхаемый воздух** находится внизу страницы **Сводный отчет о результатах** в разделе **Комфортные параметры**. Значение **CRE Выдыхаемый воздух** выше 1, это означает, что система вентиляции довольно эффективно удаляет загрязненный воздух.

Объемные параметры

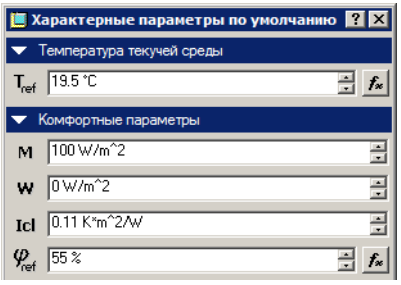
С помощью постпроцессорного инструмента **Объемные параметры** можно получить значения параметров теплового комфорта. Тот объем, в котором будут рассчитываться эти значения, представляет собой компонент **FLUIDVOLUMEPART** (т.е. вся область текучей среды внутри расчетной области).

Такие комфортные параметры, как PMV и PPD, зависят от тепловой мощности человека. Это значение, в свою очередь, зависит от его активности, состояния здоровья, теплоизоляционных свойств одежды, а также влажности воздуха. Поэтому необходимо учитывать значения следующих характерных параметров: уровня метаболизма, внешней работы, теплового сопротивления одежды и относительной влажности.

1 Кликните **Flow Analysis > Результаты > Характерные параметры по умолчанию**.

✎ *В Creo Parametric кликните* ***Flow Analysis > Результаты > Результаты > Характерные параметры по умолчанию***.

2 Задайте значение **Уровня метаболизма** равным M `100 W/m^2`. Значения других параметров изменять не требуется.



🕮 *Тепловое сопротивление одежды, равное 0.11 K·m²/W, соответствует примерно такому комплекту одежды: тонкое нижнее белье, хлопковая рубашка с длинными*

рукавами, брюки, шерстяные носки и ботинки. При задании этого значения нужно учитывать теплоотдачу со всей поверхности тела человека, включая открытые участки: голову и руки.

🕮 *Относительная влажность 55% соответствует воздуху в помещении. Если в* **Общих настройках** *включена опция* **Влажность**, *то в качестве характерного параметра используется рассчитанное значение относительной влажности.*

3 Кликните **OK**.

Чтобы увидеть значения комфортных параметров, необходимо воспользоваться опцией **Объемные параметры**.

1 В дереве анализа FloEFD правой кнопкой мыши кликните по иконке **Объемные параметры** и из контекстного меню выберите **Добавить**.

2 В дереве модели выберите компонент **FLUIDVOLUMEPART**.

3 В группе **Параметры** нажмите кнопку **Другие параметры**. Появится диалоговое окно **Настроить список параметров**.

4 Раскройте группу **Комфортные параметры** и выберите следующие параметры:

- **Средняя радиационная температура**,
- **Рабочая температура**,
- **PMV**,
- **PPD**,
- **Оценочная температура**
- **Локальный показатель качества воздуха Air**,
- **Локальный показатель качества воздуха Выдыхаемый воздух**.

5 Кликните **OK**, чтобы закрыть диалоговое окно **Настроить список параметров**.

6 Убедитесь, что указанные параметры выбраны в качестве **Параметров расчета** в списке **Параметры** диалогового окна **Объемные параметры**. Также выберите параметр **ADPI**.

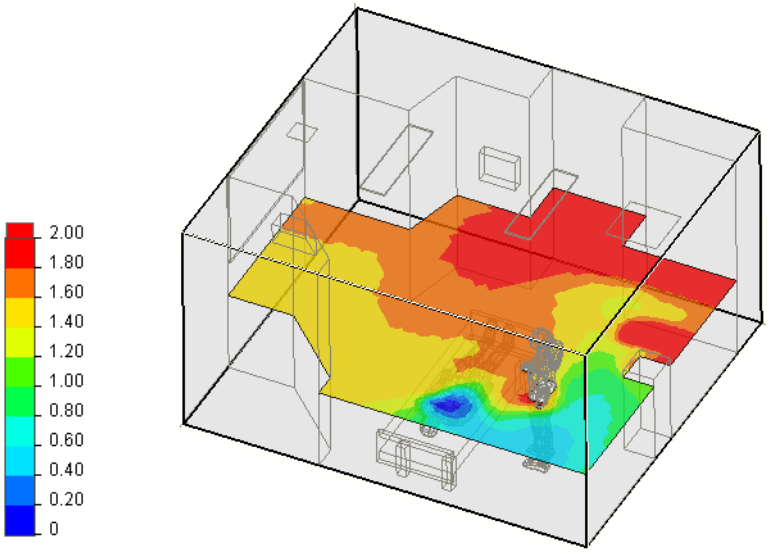
7 Нажмите кнопку **Экспорт в Excel**. Появится таблица Excel со значениями выбранных параметров.

Параметр	Среднее	Среднерасходный	Объем [m^3]
Средняя радиационная температура [°C]	24,0880572	24,0841671	41,858273
Рабочая температура [°C]	23,5721111	23,5684728	41,858273
PMV [ ]	0,731470357	0,730771361	41,858273
PPD [%]	17,4027619	17,3802028	41,858273
Оценочная температура [K]	0,726633855	0,72332388	41,858273

Параметр	Значение
ADPI [%]	62,0554295

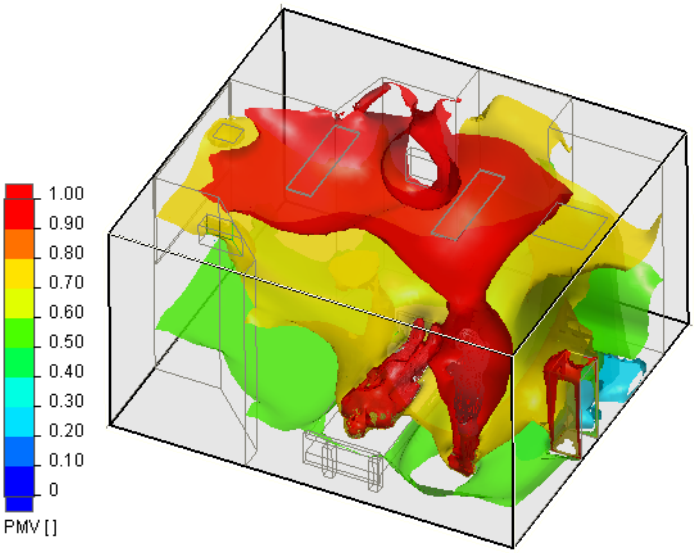
Картины в сечении и изоповерхности

Выясним, насколько высоким является содержание в воздухе загрязняющих веществ, т.е. определим качество воздуха. Для этого необходимо создать картину в сечении на расстоянии 1 м от пола (это чуть выше уровня головы пациента), в качестве параметра для отображения следует выбрать **Локальный показатель качества воздуха Выдыхаемый воздух**. В той части комнаты, где это значение выше, меньше концентрация загрязнений, т.е. оттуда загрязняющие вещества удаляются лучше.



Локальный показатель качества воздуха Выдыхаемый воздух [ ]

Изоповерхности, построенные по параметру **PMV** со значениями 0, 0.25, 0.5, 0.75 и 1 позволяют оценить уровень теплового комфорта в данном помещении по шкале от 0 (нормально) до +1 (довольно тепло).



D3

Распространение загрязнений в уличном каньоне

Некоторые элементы данного примера доступны только пользователям модуля HVAC.

Постановка задачи

Данный пример демонстрирует, как с помощью FloEFD можно прогнозировать загрязнение воздуха в городе. Получить картину распространения загрязнений можно при помощи элемента **Расчет распространения примеси**.

В данном примере рассматривается уличный каньон, т.е. участок города, в котором здания расположены вдоль транспортной магистрали (см. **[1]**). Улица расположена в направлении с востока на запад. Ширина улицы составляет 50 м. С северной стороны находится 31-этажное здание высотой 100 м, с южной стороны - 10-11-этажное здание высотой 30 м.

Проезжающие по магистрали автомобили, загрязняют воздух выхлопными газами. В их состав входит множество опасных веществ, в том числе, оксиды азота (NOx). Выделяемый автомобилями оксид азота (NO) реагирует с кислородом, превращаясь в диоксид азота (NO_2). Это вещество негативно воздействует на здоровье людей, т.к. вызывает раздражение дыхательных путей, а в больших концентрациях - отек легких. В данной задаче в качестве загрязняющих веществ будем рассматривать именно оксиды азота (NOx), их массовый выброс примем равным $8.6 \cdot 10^{-5}$ кг/с.

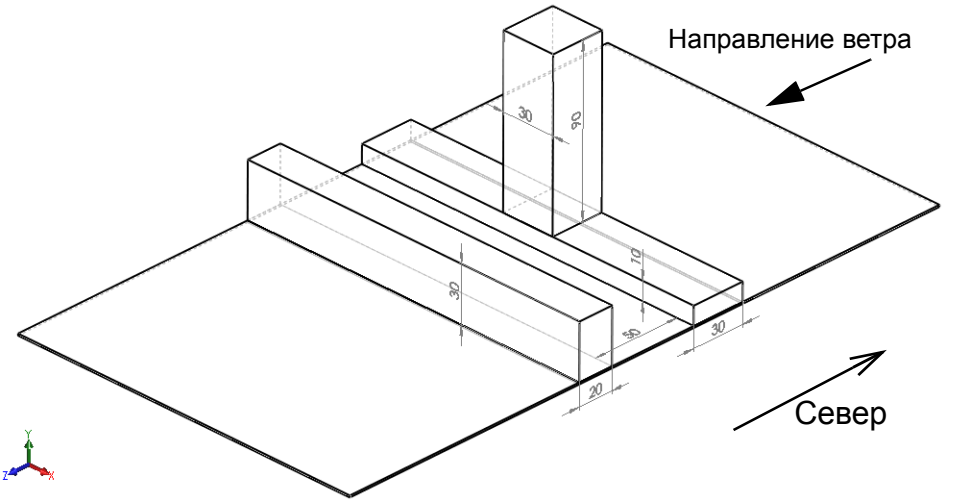
Интенсивность загрязнения воздуха зависит не только от количества транспорта, но и от метеорологических условий.

В практике инженерных расчетов для описания вертикального профиля скорости воздуха в приземном слое атмосферного пограничного слоя (до высоты около 200 м над уровнем земли) используется степенная функция вида:

$$V(h) = V_r(h / h_r)^p$$

где $V(h)$ - скорость ветра на высоте h, а V_r - скорость ветра на характерной высоте h_r. Показатель степени p определяется опытным путем и в зависимости от устойчивости атмосферы принимает значения от 0.1 до 0.6. Чем выше это значение, тем выше вертикальный градиент скорости ветра.

Модель уличного каньона представлена на рисунке ниже.



Конфигурация модели

Скопируйте папку **D3 - Street Canyon** в свою рабочую директорию. Откройте сборку **tower_building.asm**.

📖 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **tower_building.asm**, расположенную в папке **D3 - Street Canyon\Ready To Run**, и запустить проект на расчет.*

Создание проекта

Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как изложено ниже:

Имя проекта	*Street Canyon*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц измерения	*SI*
Тип задачи	*Внешняя*
Физические модели	*Нестационарность*
Текучая среда по умолчанию	*Газы / Air*
Условия на стенках по умолчанию	*Условия по умолчанию*
Начальные условия	*Параметры скорости:* *Скорость в направлении Z* = `2.6*(y/10)^0.25 m/s` *Параметры турбулентности:* *Параметры: Энергия турбулентности и диссипация* *Энергия турбулентности* = `0.596 J/kg` *Диссипация энергии турбулентности* = `0.423^3/(0.39*y) W/kg` *Другие условия по умолчанию*

Изменение размеров расчетной области

Задайте размеры расчетной области, как показано ниже:

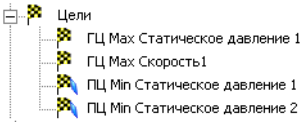
X max = 65 m	Y max = 150 m	Z max = 195 m
X min = 0 m	Y min = -0.005 m	Z min = -164 m

Задайте условие **Симметрии** для **X max** и **X min** .

Задание целей

Задайте следующие глобальные цели: **Max Статическое давление** и **Max Скорость**.

Кроме того, на подветренных сторонах зданий задайте поверхностные цели **Min Статическое давление**.



Задание настроек глобальной сетки

Задайте следующие настройки глобальной сетки:

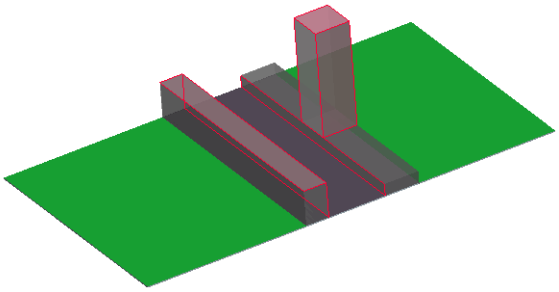
Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	5
Другие опции по умолчанию	

Настройка локальной сетки

Необходимо более подробно разрешить элементы модели, представляющие собой здания, а также области вокруг них. Для этого следует задать локальную сетку.

1 Кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка** и из контекстного меню выберите **Добавить локальную сетку**.

2 В графической области выберите крыши и обращенные друг к другу фасады обоих зданий, а также боковой фасад высотного здания.



3 В группе **Дробление ячеек** с помощью слайдера установите **Уровень дробления ячеек в текучей среде** равным 3.

4 В группе **Каналы** задайте **Характерное число ячеек поперек канала** равным 20 и с помощью слайдера установите **Максимальный уровень дробления каналов** равным 2.

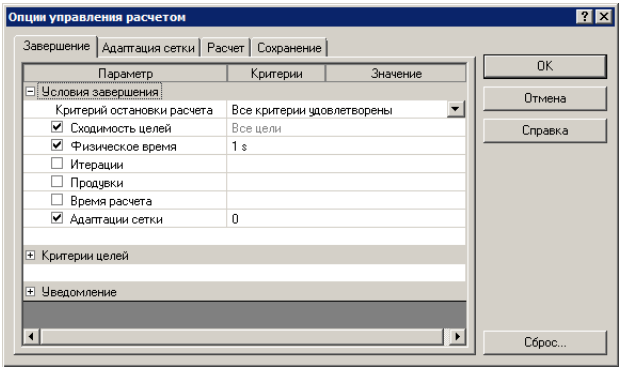
5 Кликните **OK**, чтобы сохранить настройки локальной сетки.

Задание опций управления расчетом

1 Кликните **Flow Analysis > Опции управления расчетом**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Проект > Опции управления расчетом.***

2 На вкладке **Завершение** диалогового окна **Опции управления расчетом** раскройте группу **Условия завершения** и в качестве **Критерия для остановки расчета** выберите **Все критерии удовлетворены.** Также включите **Сходимость целей**.



3 Кликните **OK**.

4 Сохраните модель и запустите расчет.

Задание расчета распространения примеси

*Опция **Расчет распространения примеси** позволяет исследовать течение какой-либо примеси в основном потоке. При этом предполагается, что наличие примеси не оказывает существенного влияния на поток. Однако такое допущение возможно только в случае, если массовая концентрация примеси мала.*

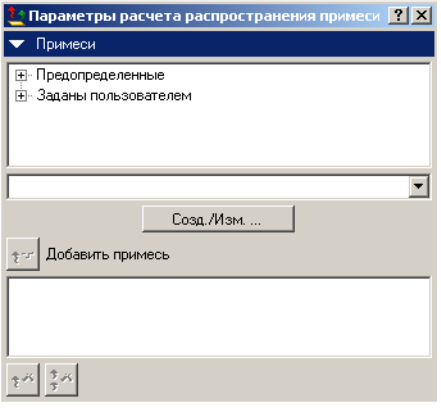
Выполните следующую последовательность действий, чтобы задать примесь:

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Расчет распространения примеси**.

2 В **Инженерной базе данных** в группе **Примеси, Заданы пользователем** создайте новый элемент с **Именем** NOx.

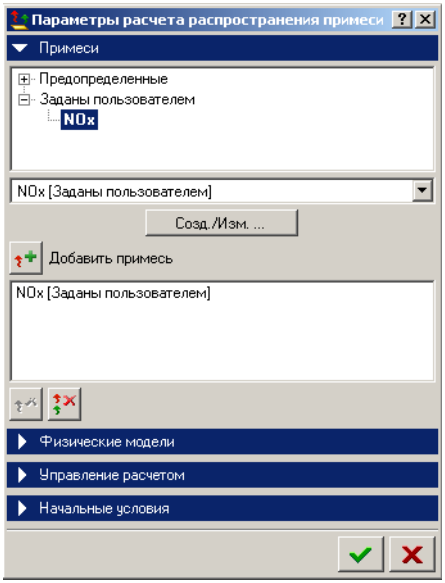
3 Задайте для него следующие значения параметров:

Свойство	Значение
Имя	NOx
Комментарии	
Молекулярный вес	0.02896 kg/mol
Диффузия определяется через	Коэффициент диффузии
Коэффициент диффузии	26000 cm^2/s
Давление насыщения	☐



4 Сохраните созданную примесь и выйдите из **Инженерной базы данных**.

5 В группе **Примеси** раскройте группу **Заданы пользователем**, выберите NOx и нажмите кнопку **Добавить примесь** .

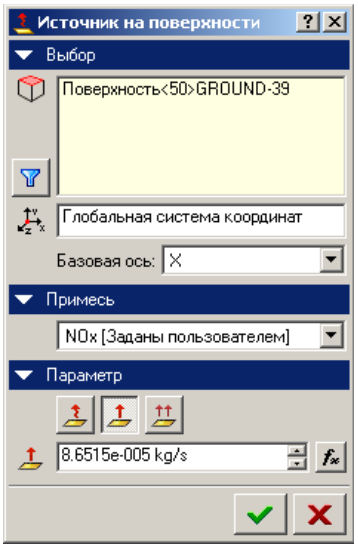


6 В списке ниже появится элемент NOx [Заданы пользователем].

7 Кликните **OK** . В **Дереве анализа** появится новый элемент **Расчет распространения примеси 1**.

Теперь необходимо задать источник примеси. Для этого выполните следующие действия:

1 В дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши по элементу **Расчет распространения примеси 1** и из контекстного меню выберите **Добавить источник на поверхности**. Появится диалоговое окно **Источник на поверхности**.



2 В графической области выберите поверхность автомагистрали. Выделенная поверхность появится в поле **Поверхности для задания источника** .

3 Убедитесь, что в группе **Примесь** выбран NOx.

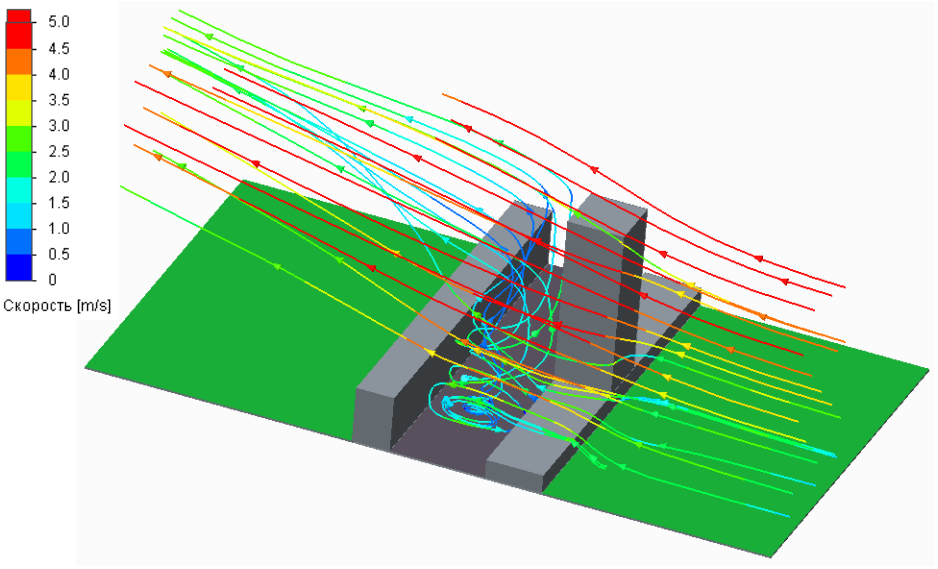
4 В группе **Параметр** выберите **Массовый расход** и задайте его значение равным 8.6515e-5 kg/s.

5 Кликните **OK** . В **Дереве анализа** появится новый элемент **ИП Массовый расход NOx 1**.

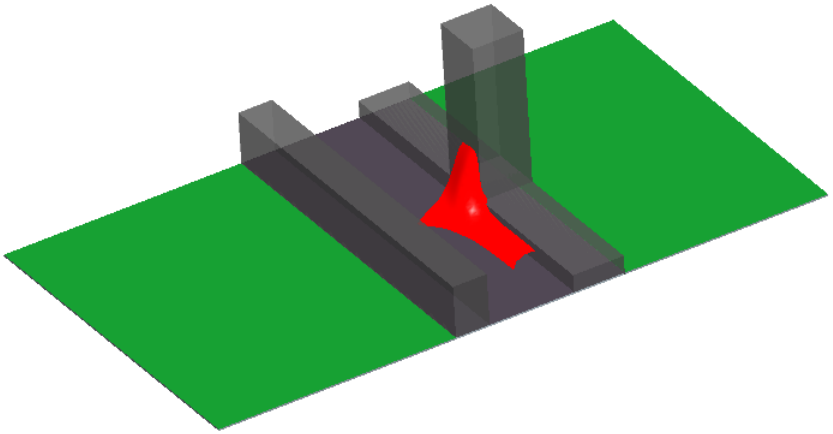
Чтобы запустить расчет распространения примеси, в дереве анализа FloEFD кликните правой кнопкой мыши по элементу **Расчет распространения примеси 1** и из контекстного меню выберите **Расчет**.

Результаты

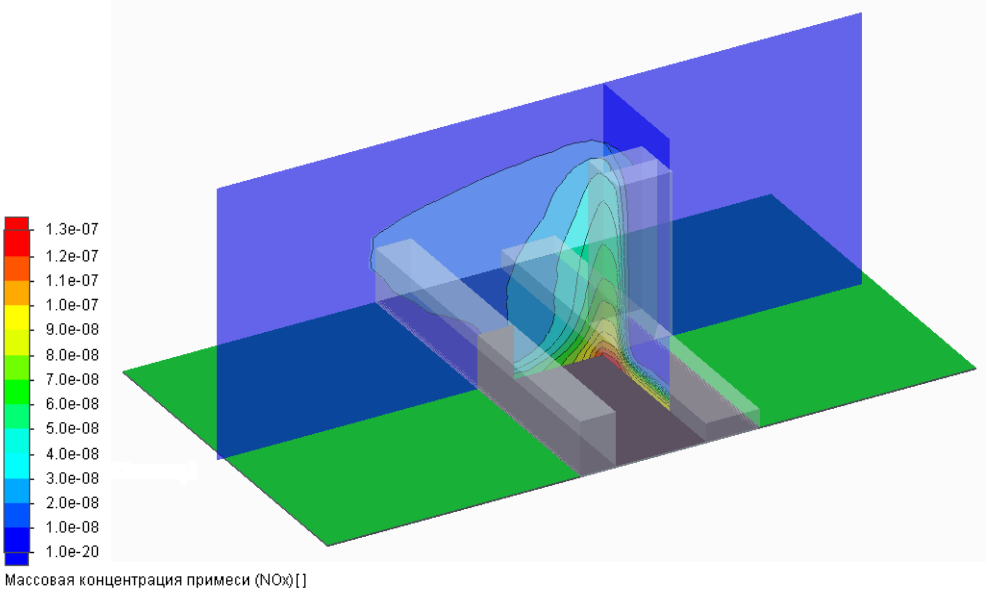
Чтобы отобразить циркуляцию воздуха, необходимо воспользоваться элементом **Траектории потока.**



Выявить области с высоким загрязнением воздуха позволяют изоповерхности, построенные по параметру **Массовая концентрация примеси (NOx)** (значение задайте равным 0.064).



Также построим распределение **Массовой концентрации примеси (NOx)** в плоскости симметрии и на подветренной стороне высотного здания.



1 Qin Y., Kot S.C. *Validation computer modeling of vehicular exhaust dispersion near a tower block*. Journal of Building and Environment, vol. 25, No2, 1990, pp 125-131.

E

Примеры для модулей Electronics Cooling и LED

Примеры **модулей Electronics Cooling** и **LED** демонстрируют использование дополнительных возможностей и элементов этих модулей, позволяющих моделировать различные электронные компоненты. Эта функциональность доступна только для пользователей модулей Electronics Cooling или LED.

E1 - Электронные компоненты (Electronic components)

E2 - Светодиодное освещение (LED lighting)

Примеры для модулей Electronics Cooling и LED:

E1

Электронные компоненты

Некоторые возможности, использованные в данном примере, доступны только пользователям модуля Electronics Cooling.

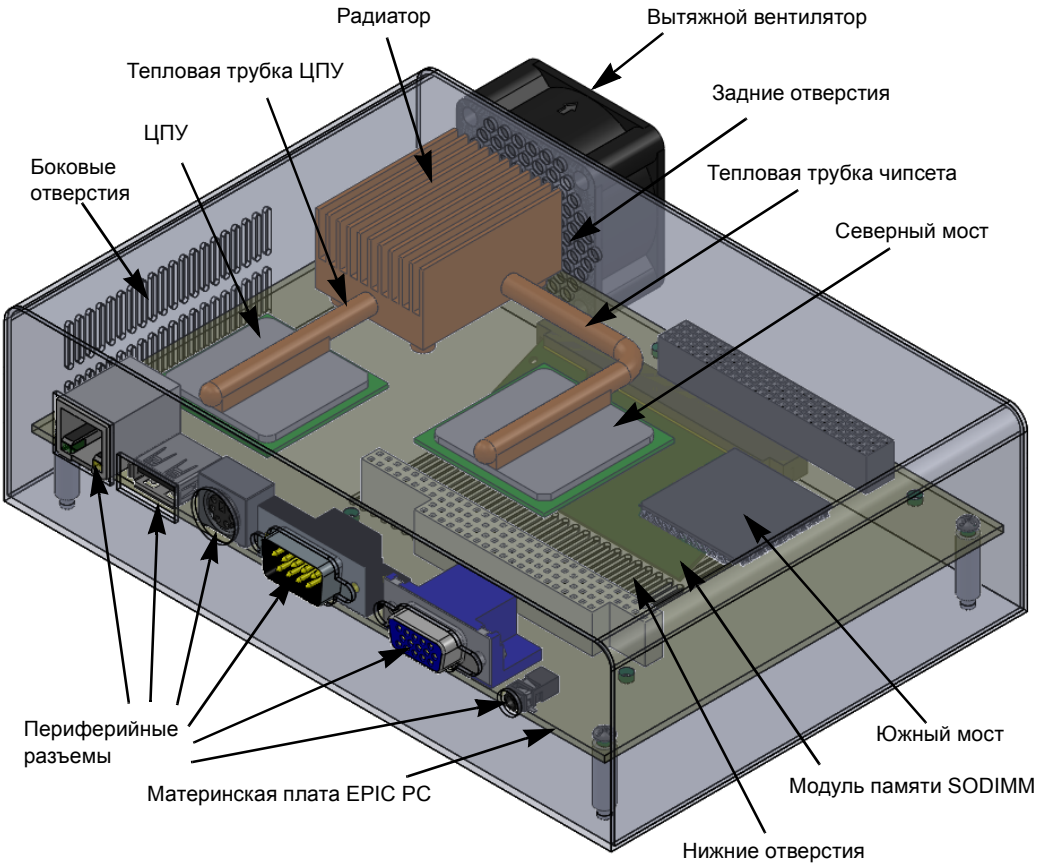
Постановка задачи

Этот пример демонстрирует возможности FloEFD по моделированию охлаждения электронных компонентов в системном блоке компьютера с помощью различных элементов, реализованных в модуле **Electronics**. Системный блок состоит из корпуса, в котором, помимо других компонентов, находятся ЦПУ, чипсет (северный мост и южный мост), радиатор с двумя тепловыми трубками, слоты PCI и ISA для платы расширения PC104, слот SODIMM с установленной памятью и периферийные разъемы.

Воздух при комнатной температуре поступает в корпус через отверстия, расположенные на нижней и боковых панелях, и выходит через отверстия, расположенные на задней панели, где установлен вытяжной вентилятор. Результирующий поток внутри корпуса отводит тепло, выделяемое электронными компонентами (ЦПУ, северным мостом, южным мостом и чипами DDR RAM). Тепловые трубки также переносят тепло, производимое ЦПУ и северным мостом, к радиатору, который выводит его наружу. В рассматриваемой модели радиатор расположен рядом с вытяжным вентилятором.

Цель данного моделирования - убедиться в том, что при данных условиях электронные компоненты работают при умеренных температурах. Ниже в таблице Вы можете видеть типичные значения максимальных рабочих температур рассматриваемых электронных компонентов.

Электронный компонент	Максимальная рабочая температура
ЦПУ	85 °C
Северный мост	80 °C
Южный мост	100 °C
Чип DDR RAM	85 °C

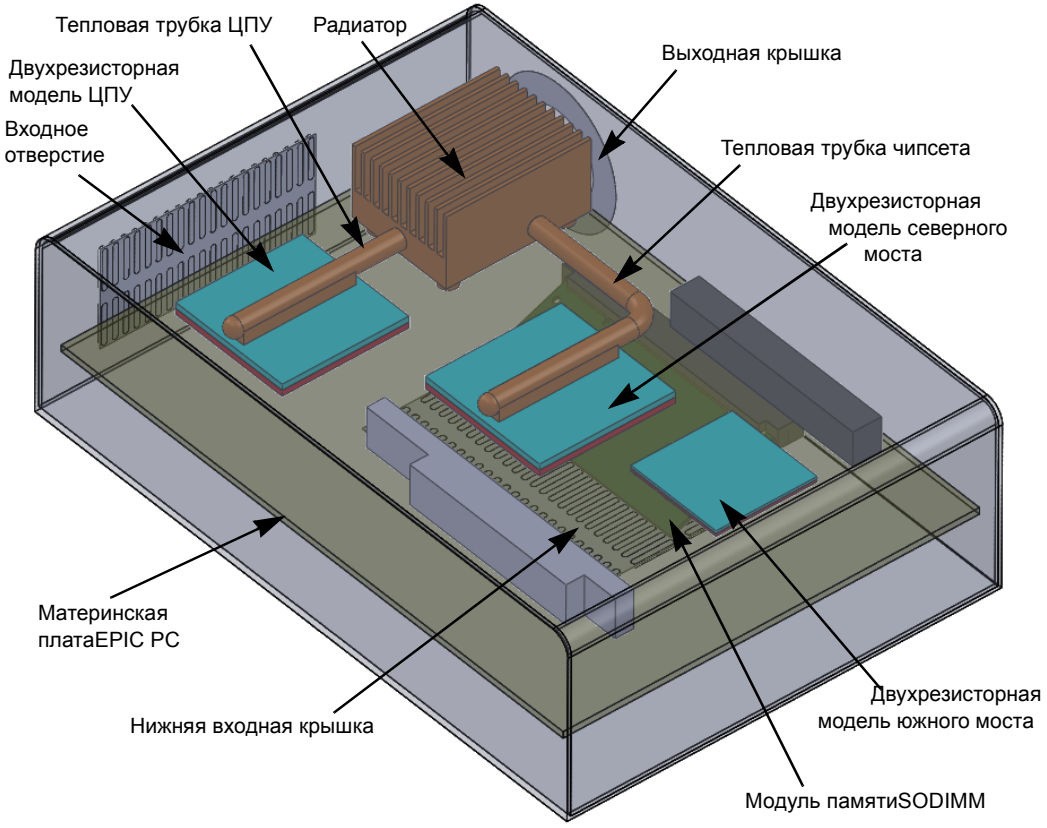


Открытие модели

Скопируйте папку **E1 - Electronic Components** в свою рабочую директорию. Откройте сборку **epic_pc.asm**. Выберите базовый экземпляр. Это исходная геометрия в соответствии с постановкой задачи. После изучения этой модели перейдите в экземпляр **SIMULATION_MODEL**.

Чтобы показать скрытые упрощенные компоненты, кликните **Вид > Видимость > Показать все скрытые**.

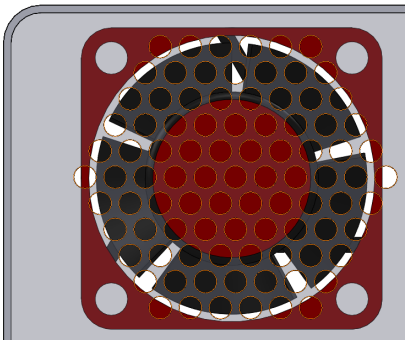
📖*Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **epic_pc.asm**, расположенную в папке **E1 - Electronic Components\Ready To Run**, и запустить проект на расчет.*



Упрощенная модель

Чтобы упростить задачу для этого примера и, следовательно, сэкономить ресурсы Вашего компьютера, пренебрежем некоторыми специфическими компонентами и элементами, которые не оказывают существенного воздействия на течение и теплообмен. Это отверстия в слотах PCI и ISA, болты и периферийные разъемы. Геометрия модели вытяжного вентилятора также исключается из рассмотрения и заменяется соответствующим граничным условием. В упрощенной постановке рассматриваются: ЦПУ, северный мост, южный мост и чипы DDR RAM, которые представляются с помощью упрощенных тепловых двухрезисторных моделей, каждая из которых состоит из двух параллелепипедов.

Чтобы задать граничные условия для потока на входе и выходе, закрываем отверстия крышками, располагая их на внутренней стороне каждой панели. Таким образом, пренебрегаем некоторыми явлениями, которые происходят на входе и выходе потока через отверстия корпуса. Однако, задавая значение коэффициента потерь давления, учитываем гидравлическое сопротивление, обусловленное определенной формой и расположением вентиляционных отверстий.



В экземпляре **SIMULATION_MODEL** видно, что отверстия на задней панели деактивированы. Это сделано для того, чтобы корректно задать граничное условие вытяжного вентилятора. Если Вы рассматриваете исходную геометрию модели, Вы увидите, что вытяжной вентилятор расположен близко к отверстиям на задней панели, и через некоторые из них нет потока воздуха. В действительности поток воздуха выходит из корпуса через кольцевой массив вентиляционных отверстий (см. картинку), таким образом, в экземпляр **SIMULATION_MODEL** помещаем крышку близко только к этим вентиляционным отверстиям без учета остальных вентиляционных отверстий на задней панели. Т.к. разрешение каждого вентиляционного отверстия может быть довольно трудоемким, а эти отверстия в любом случае не принимают участия в моделировании потока, деактивируем их. Вместо них задаем граничное условие Выходной внешний вентилятор на внутренней поверхности кольцеобразной крышки. Кроме того, на этой же крышке задаем условие Перфорированная пластина для того, чтобы определить потери давления, возникающие за счет сопротивления при течении через решетку с вентиляционными отверстиями.

Создание проекта FloEFD

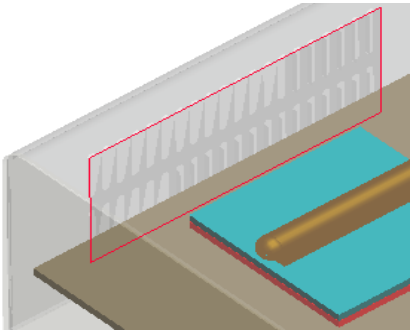
Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как изложено ниже:

Имя проекта	*Electronic components*
Конфигурация	*SIMULATION_MODEL*
Система единиц измерения	*SI, единицы измерения для параметра Температура: °C(Celsius)*
Тип задачи	*Внутренняя, Исключить полости без условий течения*
Физические модели	*Теплопроводность в твердых телах, Гравитация: Y компонента* `-9.81 m/s^2`
Текучая среда по умолчанию	*Газы / Air*
Материал по умолчанию	*Alloys / Steel (Mild)*
Условия на стенках по умолчанию	*Тепловое условие на внешней стенке по умолчанию: Коэффициент теплоотдачи* `5.5 W/m^2/K`
Начальные условия	*Условия по умолчанию*

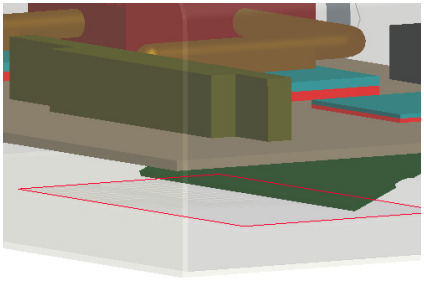
Задание граничных условий

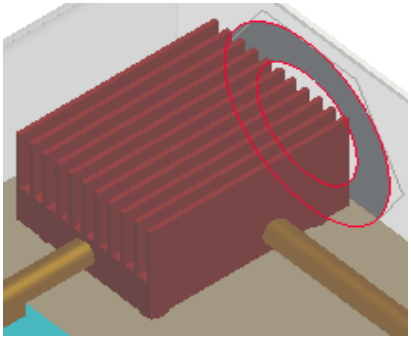
Задайте граничные условия для потока на входе и выходе, как показано в таблице ниже:

Тип	**Давление окружающей среды**
Имя	**Давление окружающей среды 1**
Поверхности	внутренняя поверхность крышки на входе (компонент **INLET_LID**)
Термодинамические параметры: Значения по умолчанию (101325Pa и 20.05°C)	



Тип	**Давление окружающей среды**
Имя	**Давление окружающей среды 2**
Поверхности	внутренняя поверхность крышки на входе (компонент **INLET_LID_2**)
Термодинамические параметры: Значения по умолчанию (101325Pa и 20.05°C)	



Тип	**Выходной внешний вентилятор**	
Имя	**Выходной внешний вентилятор 1**	
Поверхности	внутренняя поверхность крышки на выходе (компонент **OUTLET_LID**)	
Модель: **Предопределенные\Axial\Papst\Papst 412** **Термодинамические параметры**: Значения по умолчанию (101325 Pa)		

Задание перфорированных пластин

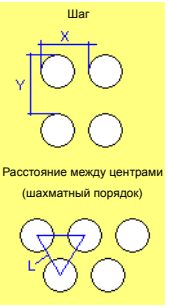
Элемент **Перфорированная пластина** используется для моделирования входных и выходных потоков через тонкие плоские стенки со множеством отверстий и позволяет избежать создания отдельной крышки на каждом отверстии. **Перфорированная пластина** применяется совместно с граничным условием для поверхности крышки, которая закрывает множество отверстий и устанавливает дополнительное сопротивление. Этот элемент может применяться, например, при моделировании потока, втекающего или вытекающего из модели через ряд небольших отверстий. Если будет разрешаться поток внутри каждого отверстия, может потребоваться дополнительная адаптация сетки. В этом примере **Перфорированные пластины** используются для учета сопротивления при течении через входные и выходные отверстия в корпусе компьютера.

1 Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Инженерная база данных**.

2 В **Инженерной базе данных** в группе **Перфорированные пластины, Заданы пользователем**, создайте два элемента со следующими параметрами:

Свойство	Значение
Имя	Прямоугольное отверстие
Комментарии	
Форма отверстия	Прямоугольное
Высота	0.01 m
Ширина	0.0015 m
Тип задания пористости	Шаг
Шаг по X	0.003 m
Шаг по Y	0.015 m

Свойство	Значение
Имя	Круглое отверстие
Комментарии	
Форма отверстия	Круглое
Диаметр	0.003 m
Тип задания пористости	Расстояние между центрами (шахматный порядок)
Расстояние между центрами	0.004 m



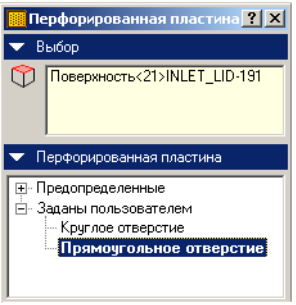
*Вы можете задать **Форму отверстия** как **Прямоугольное**, **Круглое**, **Правильный многоугольник** или **Сложная форма**. Чтобы определить расположение отверстий (для отверстий не **Сложной формы**), для свойства **Тип задания пористости** можно выбрать **Шаг** или **Расстояние между центрами (шахматный порядок)** (для отверстий, форма которых не является **Прямоугольной**). В зависимости от выбранного значения Вы можете задать размер отдельного отверстия и/или расстояние между двумя соседними отверстиями в двух взаимно перпендикулярных направлениях (**Шаг по X** и **Шаг по Y**) или **Расстояние между центрами**. Заданные значения используются для расчета **Коэффициента живого сечения**, который показывает отношение общей площади отверстий к общей площади перфорированной пластины. Автоматически вычисленное значение **Коэффициента живого сечения** появляется в нижней части таблицы. Вы также можете выбрать **Коэффициент живого сечения** в качестве **Типа задания пористости** и непосредственно задать его значение.*

3 Сохраните изменения и выйдите из **Инженерной базы данных**.

4 В **Дереве анализа** выберите граничное условие **Давление окружающей среды 1**.

5 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Перфорированная пластина**.

6 В диалоговом окне **Перфорированная пластина** выберите созданный элемент **Прямоугольное отверстие**.



7 Кликните **OK** . Новый элемент **Перфорированная пластина 1**, который соответствует боковым отверстиям корпуса, появляется в **Дереве анализа**.

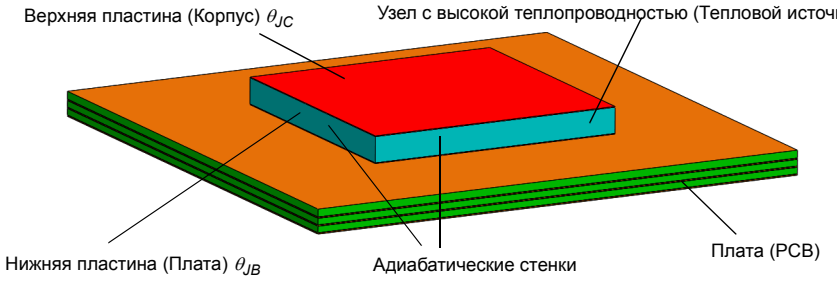
8 Для нижних отверстий выберите граничное условие **Давление окружающей среды 2** и повторите шаги 5-7.

9 Для отверстий на задней панели выберите условие **Выходной внешний вентилятор 1** и повторите шаги 5-7, выбирая элемент **Круглое отверстие** в группе **Заданы пользователем**.

🕮 *Элемент **Перфорированная пластина** используется в FloEFD для определения дополнительных параметров для уже заданных условий **Давление окружающей среды** или **Вентилятор**. Сам по себе этот элемент ничего не меняет в геометрии модели. Поэтому, когда Вы удаляете граничное условие или вентилятор из своего проекта, соответствующая **Перфорированная пластина** (если задана) становится бесполезной.*

Задание 2R моделей

Двухрезисторная модель широко применяется для оценки температурного режима чипов и других небольших электронных модулей. Такой электронный модуль заменяется компактной моделью, которая представляет собой плоскую пластину, установленную на печатную плату (см. рис. ниже). Предполагается, что каждый модуль состоит из трех узлов: Теплового источника, Платы и Корпуса. Эти узлы соединяются посредством двух тепловых сопротивлений, заданных пользователем - тепловым сопротивлением между источником и платой θ_{JB} (между источником и платой, на которой он установлен) и тепловым сопротивлением между источником и корпусом θ_{JC} (между источником и верхней поверхностью модуля). Тепловое сопротивление задается в единицах системы СИ - K/W. Теплопроводность модуля рассчитывается исходя из заданных тепловых сопротивлений.



Представление 2R модели в FloEFD

В **Инженерной базе данных** предусмотрено огромное множество 2R моделей. Каждый элемент соответствует определенному типу модуля.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > 2R модель**.

✎ *В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > 2R модель**.*

2 Выберите верхнюю поверхность элемента ЦПУ **CPU_CHIP** в качестве **Верхней поверхности** .

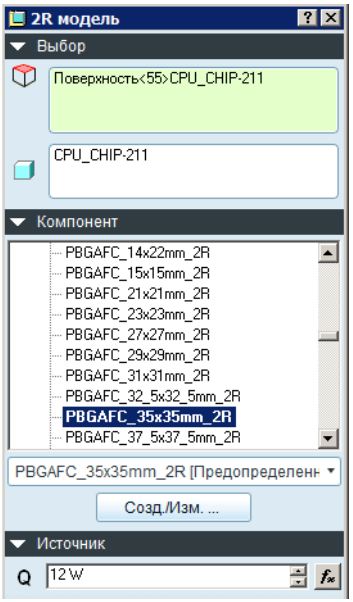
3 В группе **Компонент** выберите элемент **PBGAFC_35x35mm_2R**.

4 В группе **Источник** введите значение **Мощности тепловыделения** Q, равное `12 W`.

5 Кликните **OK** . Новый элемент **2R модель 1**, соответствующий ЦПУ, появляется в **Дереве анализа**.

6 Переименуйте созданный элемент в **ЦПУ**. Это имя будет использоваться при выборе этого элемента для задания **Целей**.

7 Таким же образом задайте элементы **Чипсет – Сев.мост** и **Чипсет – Юж.мост** со следующими параметрами:



Имя	**Чипсет – Сев.мост**
Верхняя поверхность	Верхняя поверхность элемента **NORTHBRIDGE_CHIP** (соответствующее тело будет выбрано автоматически)
Компонент	**PBGAFC_37_5x37_5mm_2R**
Мощность тепловыделения	`4.3 W`

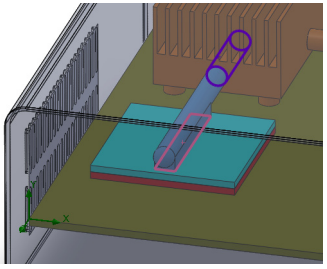
Имя	**Чипсет – Юж.мост**
Верхняя поверхность	Верхняя поверхность элемента **SOUTHBRIDGE_CHIP** (соответствующее тело будет выбрано автоматически)
Компонент	**LQFP_256_28x28mm_2R**
Мощность тепловыделения	`2.5 W`

8 Для каждого из четырех рассматриваемых чипов DDR RAM таким же образом задайте элемент **Чип RAM N** (где **N** - номер чипа), выбрав соответствующие компоненты в качестве Корпуса и Теплового источника в сборке **SODIMM**:

Имя	**Чип RAM N**
Верхняя поверхность	Верхняя поверхность элемента**RAM_CHIP_N** (соответствующее тело будет выбрано автоматически)
Компонент	**TSOP_C_10_16x22_22_2R**
Мощность тепловыделения	`1 W`

Задание тепловых трубок

Элемент **Теловая трубка** используется для моделирования теплопередачи от более горячей поверхности к более холодной через тепловую трубку (рассматривается как твердое тело, выполненное из материала высокой теплопроводности).

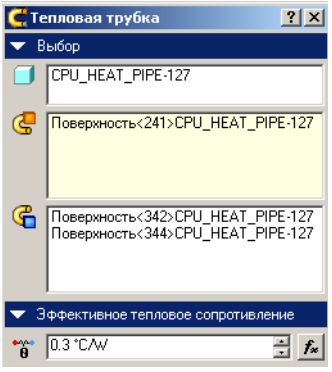


1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Тепловая трубка**.

2 Выберите тепловую трубку ЦПУ (компонент **CPU_HEAT_PIPE**) в качестве **Компонента для задания тепловых трубок**.

3 Выберите поверхность тепловой трубки ЦПУ (компонент **CPU_HEAT_PIPE**), соприкасающуюся с верхней поверхностью ЦПУ в качестве **Поверхности теплопоглощения**.

4 Выберите поверхность тепловой трубки ЦПУ (компонент **CPU_HEAT_PIPE**), соприкасающуюся с внутренней поверхностью радиатора в качестве **Поверхности теплоотвода**.



5 В группе **Эффективное тепловое сопротивление** задайте значение `0.3 °C/W`. Это значение соответствует фактической эффективности тепловой трубки.

6 Кликните **OK**. Новый элемент **Тепловая трубка 1**, который соответствует тепловой трубке ЦПУ, появляется в **Дереве анализа**.

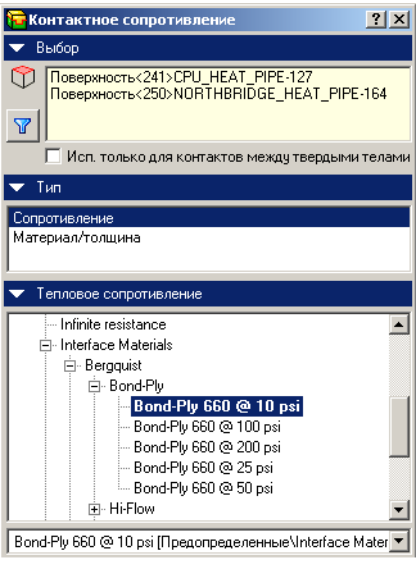
7 Таким же образом задайте другие тепловые трубки, используя тепловую трубку северного моста (компонент **NORTHBRIDGE_HEAT_PIPE**), с таким же значение **Эффективного теплового сопротивления**.

Задание контактных сопротивлений

Элемент **Контактное сопротивление** используется для задания теплового контактного сопротивления на поверхности тела, соприкасающегося с потоком или другим телом. Оно может быть задано значением конкретного теплового сопротивления или толщиной и тепловыми свойствами контактного слоя материала. С учетом теплового контактного сопротивления можно оценить, например, такое явление, как перепад температуры на поверхности контакта. Здесь данный элемент используется для задания теплопроводящего материала, соединяющего тепловые трубки с ЦПУ и северным мостом, и для задания теплового контактного сопротивления между поверхностями тепловых трубок и окружающего воздуха.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Контактное сопротивление**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > Тепловая трубка**.*



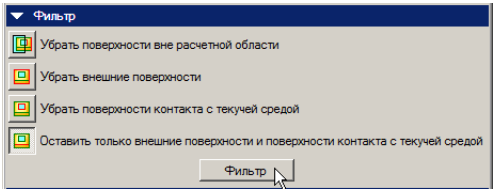
2 Выберите поверхности тепловых трубок ЦПУ и северного моста (компоненты **CPU_HEAT_PIPE** и **NORTHBRIDGE_HEAT_PIPE**), контактирующих с верхними поверхностями ЦПУ и северного моста соответственно. Эти поверхности был выбраны ранее в качестве **Поверхностей теплопоглощения** при задании тепловых трубок.

3 В группе **Тепловое сопротивление** выберите **Bond-Ply 660 @ 10 psi** (**Предопределенные\Interface Materials\Bergquist\Bond-Ply\Bond-Ply 660 @ 10 psi**).

4 Кликните **OK** . Новый элемент **Контактное сопротивление 1** появляется в **Дереве анализа**.

5 Повторите шаг 1, затем, удерживая нажатой клавишу **Ctrl**, дважды кликните по элементам тепловых трубок ЦПУ и северного моста (компоненты **CPU_HEAT_PIPE** и **NORTHBRIDGE_HEAT_PIPE**) в дереве модели. Все поверхности обоих компонентов появятся в списке **Поверхности для задания контактного сопротивления** .

6 В группе **Выбор** выделите каждый компонент, находящийся в списке, и кликните **Представить компонент в виде списка поверхностей** . Это позволит представить в виде списка все поверхности, принадлежащие обоим компонентам.



Затем кликните **Фильтр** . Выберите **Оставить только внешние поверхности и поверхности контакта с текучей средой** и нажмите кнопку **Фильтр**.

*Удобнее выделять все поверхности компонента, выбирая этот компонент в дереве модели. Однако на поиск и удаление лишних поверхностей вручную (если удалять одну за другой) может потребоваться огромное количество времени, особенно если таких поверхностей много. Удалить лишние поверхности определенного типа из списка выбранных позволяет **Фильтр**.*

7 В группе **Тепловое сопротивление** раскройте список **Предопределенные** и выберите **Infinite resistance**. Здесь **Infinite resistance (бесконечное сопротивление)** используется для отражения качественного различия между интенсивностью теплопередачи внутри и снаружи рассматриваемых тепловых трубок.

8 Кликните **OK** .

Задание печатной платы

Элемент **Печатная плата** используется для моделирования печатных плат, которые рассматриваются как тонкие твердые тела с анизотропной теплопроводностью, которая рассчитывается исходя из заданной структуры чередования слоев проводника и диэлектрика. Вы можете задать такой материал в **Инженерной базе данных**, указав свойства материалов проводника и диэлектрика и структуру слоев. Этот элемент используется для задания материала платы SODIMM, которая состоит из шести слоев проводника (Copper) и пяти слоев диэлектрика (FR4)

1 Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Инженерная база данных**.

2 В **Инженерной базе данных** в группе **Печатные платы > Заданы пользователем** создайте новый элемент со следующими параметрами:

Свойство	Значение
Имя	Печатная плата 4s2p
Комментарии	
Тип	Задание слоя
Плотность материала диэлектрика	1200 kg/m^3
Удельная теплоемкость диэлектрика	880 J/(kg*K)
Коэффициент теплопроводности диэлектрика	0.3 W/(m*K)
Плотность материала проводника	8960 kg/m^3
Удельная теплоемкость проводника	385 J/(kg*K)
Коэффициент теплопроводности проводника	401 W/(m*K)
Общая толщина печатной платы	0.001 m
Токопроводящие слои	(Таблица)

📖 *Когда Вы зададите параметры, в нижней части таблицы можно будет увидеть рассчитанные свойства эквивалентного материала, используемого в моделировании.*

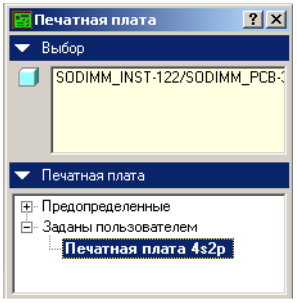
3 В таблице **Токопроводящие слои** кликните кнопку ..., чтобы перейти на вкладку **Таблицы и графики**. Введите следующие значения для задания структуры токопроводящих слоев:

Толщина слоя	Процент покрытия
3.3e-005 m	20 %
6.6e-005 m	80 %
3.3e-005 m	20 %
3.3e-005 m	20 %
6.6e-005 m	80 %
3.3e-005 m	20 %

📖 *Когда Вы зададите структуру слоев, справа можно будет увидеть графическое представление этой структуры.*

4 Сохраните изменения и выйдите из **Инженерной базы данных**.

5 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Печатная плата**.



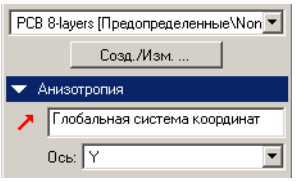
✎ *В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > Печатная плата**.*

6 В графической области выберите материнскую плату (компонент **SODIMM_PCB**).

7 В группе **Печатная плата** выберите созданный элемент **Печатная плата 4s2p**.

8 Кликните **OK** .

Задание материалов



Для материнской платы (компонент **EPIC_PCB**) задается неизотропный материал (**Предопределенные\Non-isotropic\PCB 8-layers**) с типом проводимости Осесимметричная/Двунаправленная. В этом типе проводимости тепловые свойства материала одинаковы в двух направлениях и отличаются в третьем направлении, заданном осью или направлением.
Для того, чтобы задать ось для платы (компонент **EPIC_PCB**) в группе **Анизотропия** измените **Ось** на **Y**.

Для других компонентов задайте следующие **Материалы**:

Предопределенные\Metals\Copper	Радиатор (компонент **HEATSINK**)
Предопределенные\IC Packages\Typical Connector	Слот PCI (компонент **PC104_PCI_CONNECTOR**), Слот ISA (компонент **PC104_ISA_CONNECTOR**), Слот SODIMM (компонент **SODIMM_CONNECTOR**)

Чтобы исключить крышки на входе и выходе (компоненты **INLET_LID**, **INLET_LID_2** и **OUTLET_LID**) из исследования теплопроводности, задайте их как изоляцию (**Предопределенные\Glasses and Minerals\Insulator**).

Задание целей проекта

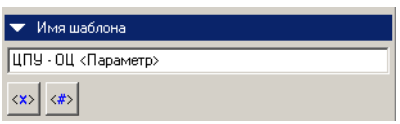
1 В **Дереве анализа** выберите 2R модель **ЦПУ**.

2 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Объемные цели**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis** > **Добавить** > **Цели** > **Объемные цели**.*

3 В списке **Параметр** Выберите **Max** и **Ср значения параметра Температура (Твердое тело)**.

4 Измените **Имя шаблона** на: `ЦПУ - ОЦ <Параметр>`.



5 Кликните **OK** .

6 Повторите такие же шаги отдельно для каждого теплового источника: элементов **Чипсет – Сев.мост**, **Чипсет – Юж.мост**, **Чип RAM 1**, **2**, **3**, **4** (выберите все

четыре чипа RAM сразу) и радиатора (компонент **HEATSINK**). Измените **Имя шаблона** подобным образом.

7 По окончании в **Дереве анализа** выберите все заданные граничные условия (**Давление окружающей среды 1**, **Давление окружающей среды 2** и **Выходной внешний вентилятор 1**), удерживая нажатой клавишу **Ctrl**.

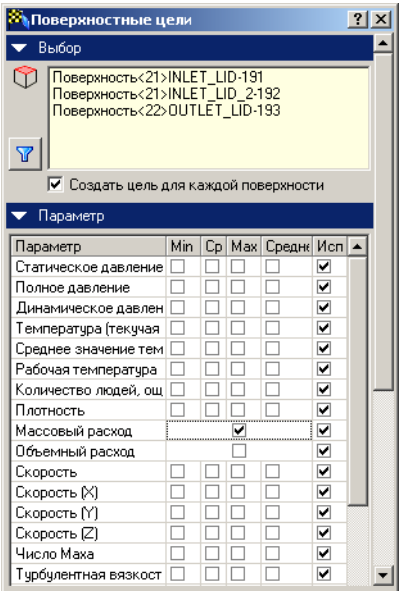
8 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхностные цели**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis** > **Добавить** > **Цели** > **Поверхностные цели**.*

9 Выберите опцию **Создать цель для каждой поверхности** для создания отдельной цели для каждой из выбранных поверхностей.

10 В списке **Параметр** выберите параметр **Массовый расход**.

11 Кликните **OK** .



Задание настроек глобальной сетки

1 Кликните **Flow Analysis** > **Проект** > **Перестроение**.

2 В дереве анализа FloEFD дважды кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка > Глобальная сетка**

3 Сначала задайте следующие настройки глобальной сетки:

Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	3
Другие опции по умолчанию	

4 В группе **Тип** выберите **Ручной режим** .

5 В группе **Базовая сетка** нажмите кнопку **Контрольные плоскости**. В нижней части экрана появится панель **Контрольные плоскости**.

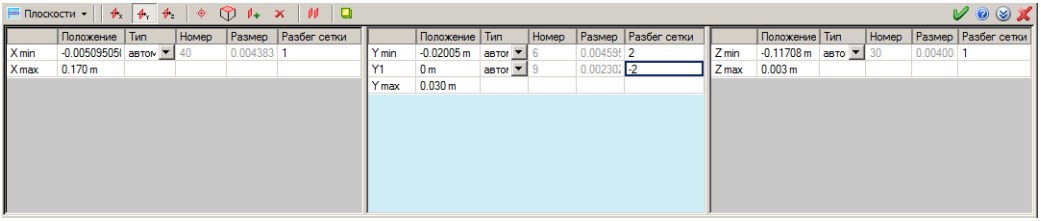
6 Переключитесь в режим **Плоскости** .

7 На панели инструментов нажмите кнопку **Координата Y** , а затем нажмите кнопку **Добавить** .

8 Новая плоскость **Y1** будет размещена в центре контрольного интервала [**Y min**;**Y max**]. Выберите плоскость **Y1** и в ячейке **Положение** введите значение `0 m`.

9 Кликните в ячейке **Разбег сетки** для плоскости **Y min** и введите значение `2`.

10 Таким же образом задайте **Разбег сетки** `-2` для плоскости **Y1**.



11 Кликните **OK**, чтобы закрыть панель **Контрольные плоскости**.

12 В группе **Базовая сетка** задайте **Число ячеек по X, Y и Z** равным `40`, `15`, `30` соответственно.

13 В группе **Дополнительные параметры дробления** установите **Уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели** в положение 1. Остальные настройки оставьте заданными по умолчанию.

14 Кликните **OK** для сохранения настроек глобальной сетки.

Задание настроек локальной сетки

Для получения более точного решения в интересующих областях целесообразно задать **Локальную сетку**

1 В **Дереве анализа** выберите компонент **HEATSINK**.

2 Кликните правой кнопкой мыши по элементу **Сетка** и из контекстного меню выберите **Добавить локальную сетку**.

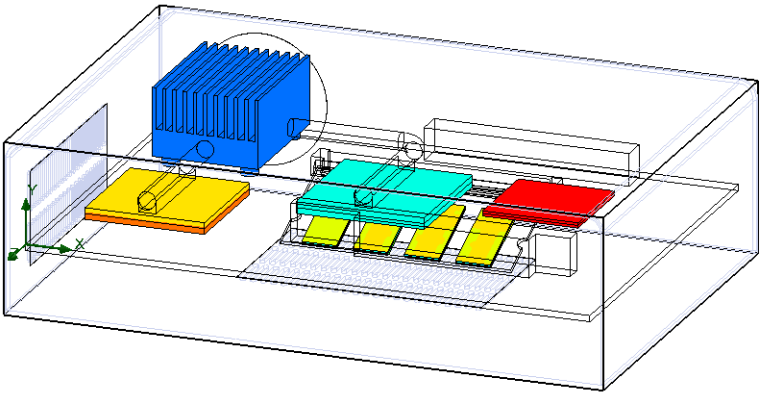
3 В группе **Каналы** задайте **Характерное число ячеек поперек канала** равным `4` и установите **Максимальный уровень дробления каналов** равным `2`.

Сохраните модель и запустите расчет.

Результаты

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Прогресс сходимости [%]
ПЦ Массовый расход Inlet Lid	[kg/s]	0,000874331	0,000872428	0,000866164	0,000876732	100
ПЦ Массовый расход Outlet Lid	[kg/s]	-0,002117667	-0,00211709	-0,002117667	-0,002116389	100
ПЦ Массовый расход Inlet Lid 2	[kg/s]	0,001243313	0,001244659	0,001240256	0,001250352	100
ЦПУ - ОЦ Ср Температура (твердое тело)	[°C]	78,11027219	78,09781048	78,05672621	78,11706281	100
ЦПУ - ОЦ Max Температура (твердое тело)	[°C]	79,11610781	79,10387809	79,06256935	79,12328617	100
Чипсет – Сев.мост – ОЦ Ср Температура (твердое тело)	[°C]	55,42071381	55,40562741	55,3841179	55,42256088	100
Чипсет – Сев.мост – ОЦ Max Температура (твердое тело)	[°C]	55,70526618	55,69034608	55,66890553	55,70711814	100
Чипсет – Юж.мост – ОЦ Ср Температура (твердое тело)	[°C]	86,46932621	86,47201044	86,36744543	86,60810332	100
Чипсет – Юж.мост – ОЦ Max Температура (твердое тело)	[°C]	88,2380636	88,2376433	88,14342397	88,36032906	100
Чипы RAM – ОЦ Ср Температура (твердое тело)	[°C]	63,75306739	63,70852983	63,65611637	63,75792045	100
Чипы RAM – ОЦ Max Температура (твердое тело)	[°C]	67,48810778	67,44384108	67,38708974	67,4944499	100
Heatsink – ОЦ Ср Температура (твердое тело)	[°C]	46,61653256	46,60195552	46,58783758	46,61751183	100
Heatsink – ОЦ Max Температура (твердое тело)	[°C]	47,01342172	46,99872618	46,98476739	47,01442693	100

В соответствии с полученными результатами можно сказать, что электронные компоненты работают при умеренных температурах, и нет необходимости вводить какие-либо дополнительные изменения конструкции для того, чтобы улучшить эффективность теплообмена внутри рассматриваемого корпуса.



E2

Светодиодное освещение

Некоторые возможности, использованные в данном примере, доступны только пользователям модуля LED.

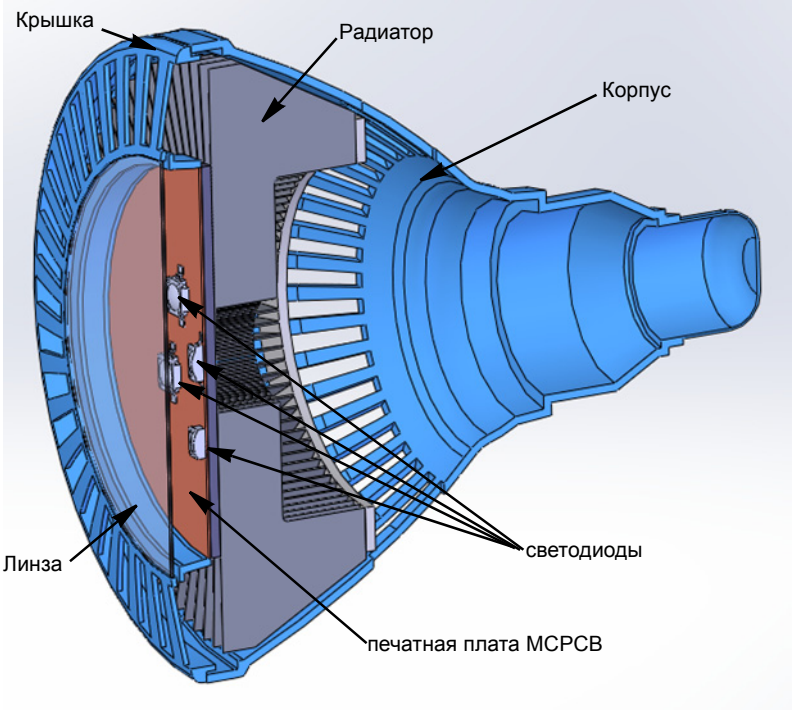
Постановка задачи

Светодиоды получили широкое распространение благодаря небольшим размерам, экономичному энергопотреблению и сниженным эксплуатационным расходам. Однако светодиоды чувствительны к высоким температурам: нагрев светодиода приводит к падению светового потока и изменению цвета свечения. Поэтому одной из важных задач при проектировании светодиодных систем является обеспечение эффективного теплоотвода из области p-n - перехода светодиода в окружающее пространство. Наиболее распространенным способом отведения тепла является его передача сначала на печатную плату, которая служит основанием светодиода, а затем на корпус устройства.

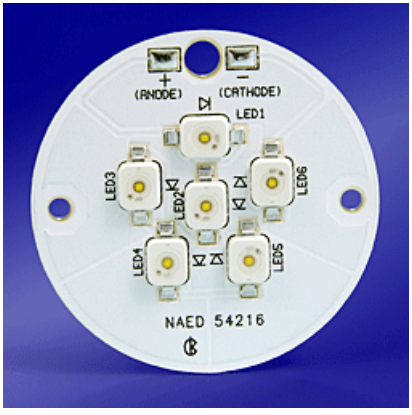
Данный пример демонстрирует возможности FloEFD по решению задачи отведения тепла от светодиода. Обеспечение эффективного теплоотвода позволяет предотвратить нагрев компонент до критических температур, увеличить надежность изделия и, следовательно, его долговечность.

Математическая модель модуля LED делает возможным моделирование тепловых процессов, происходящих в различных светодиодах. Также она позволяет определить полный световой поток, излучаемый светодиодом при рабочих температурах (“hot lumens”). Такие возможности доступны благодаря наличию библиотеки моделей светодиодов. Входящие в нее элементы имеют определенные характеристики, полученные в результате измерений тепловых и радиометрических/фотометрических величин, проведенных с помощью Mentor® T3Ster+TeraLED. Кроме того, в FloEFD в моделях светодиодов предусмотрено поглощение излучения в полупрозрачных телах, например, передних и задних фарах автомобилей.

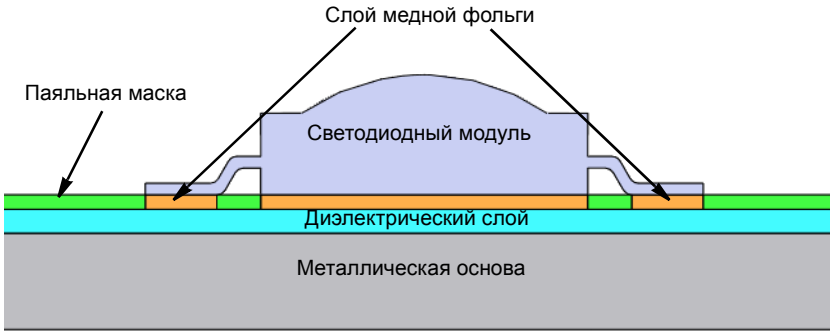
В данном примере рассматривается светодиодная лампа, состоящая из следующих компонентов: модуль с шестью светодиодами, установленный на алюминиевый радиатор, корпус (включая крышку), выполненный из ABS-пластика, а также линза, изготовленная из кварцевого стекла. См. рис. ниже.



Светодиодный модуль состоит из шести светодиодов Osram Golden Dragon, расположенных на низкопрофильной печатной плате с металлическим основанием (MCPCB). Светодиоды размещены близко друг к другу.



Конструкция такой печатной платы предусматривает наличие металлической основы (чаще всего выполненной из алюминия или медного сплава) и слоя теплопроводящего диэлектрика. За счет этого печатные платы с металлическим основанием более эффективно отводят тепло от компонентов по сравнению с традиционными печатными платами. В данном примере рассматривается однослойная печатная плата MCPCB, состоящая из алюминиевого основания, диэлектрического слоя T-preg, медной фольги и защитной паяльной маски. Чтобы упростить модель, пренебрежем слоем медной фольги и предположим, что светодиодный модуль напрямую взаимодействует с диэлектрическим слоем.



Рассмотрим работу лампы в помещении при следующих условиях: комнатная температура (~20 °C), принудительное охлаждение отсутствует.

Цель данного моделирования - убедиться в том, что при данных условиях радиатор и корпус эффективно отводят тепло от светодиодов, и компоненты светодиодной лампы не перегреваются.

Открытие модели

Скопируйте папку **E2 - LED Lighting** в свою рабочую директорию. Откройте сборку **LED_LIGHTING.asm**. Выберите базовую конфигурацию.

🕮 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проекта FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **LED_LIGHTING.asm**, расположенную в папке **E2 - LED Lighting\Ready To Run**, и запустить проект на расчет.*

Создание проекта FloEFD

Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как показано ниже:

Имя проекта	*LED analysis*
Конфигурация	*Использовать текущую*
Система единиц измерения	*SI*
Тип задачи	*Внешняя*
Физические модели	*Теплопроводность в твердых телах,* *Радиационный теплообмен:* *Модель излучения: Дискретные ординаты* *Излучение окружающей среды:* *Температура окружающей среды* `293.2 K`**;** *Поглощение в твердом теле;* *Гравитация: Y компонента* `-9.81 m/s^2`
Текучая среда по умолчанию	*Газы / Air*
Материал по умолчанию	*Alloys / Aluminium 5052*
Условия на стенках по умолчанию	*Радиационные свойства поверхностей по умолчанию: Предопределенные / Real Surfaces / Aluminum, polished* *Шероховатость по умолчанию равна 0*
Начальные условия	*Условия по умолчанию*

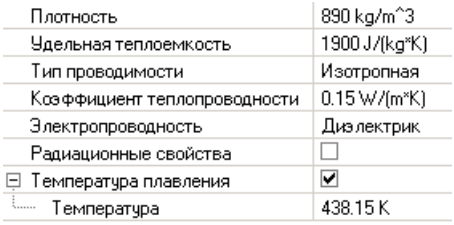
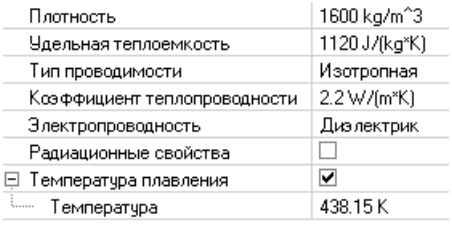
Настройка величины расчетной области

Задайте величину расчетной области, как показано ниже:

X max = 0.4 m	Y max = 0.5 m	Z max = 0.4 m
X min = -0.4 m	Y min = -0.3 m	Z min = -0.4m

Задание материалов

Для непрозрачных компонентов задайте следующие **Материалы**:

Крышка (компонент **Cover)** **Корпус (**компонент **Housing)**	**Заданы пользователем\ABS Polymer** 
Диэлектрический слой печатной платы (компонент **MCPCB T-preg)** (верхний слой печатной платы с металлическим основанием)	**Заданы пользователем\T-preg** 
Радиатор	**Предопределенные\Alloys\Aluminum 6061**

Задание прозрачности тел и материалов

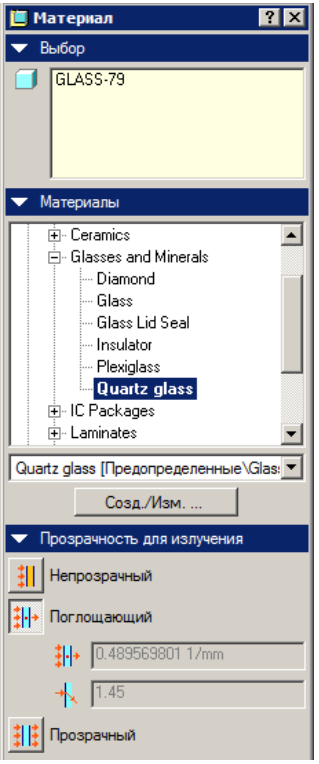
Для линзы задайте материал **Quartz glass** и определите этот компонент как полупрозрачный для излучения.

1 Кликните правой кнопкой мыши по элементу **Материалы** и из контекстного меню выберите **Добавить материал**.

2 В дереве модели выберите линзу (компонент **GLASS**).

3 В группе **Материалы** раскройте список **Предопределенные** и выберите **Quartz Glass** в группе **Glasses and Minerals**.

4 В группе **Прозрачность для излучения** выберите **Поглощающий** .



📖 *Поглощающее тело является полупрозрачным. Это означает, что оно поглощает тепловое излучение внутри своего объема. Эта опция доступна, только если в инженерной базе данных для материала задан коэффициент поглощения, а в **Мастере проекта** или **Общих настройках** включена опция **Поглощение в твердом теле**.*

*Значения **Коэффициента поглощения** и **Показателя преломления** заданы в инженерной базе данных, а здесь приведены для справки.*

5 Кликните **OK** . Теперь FloEFD будет трактовать этот материал и все тела, для которых он задан, как полупрозрачные для теплового излучения.

Задание поверхностей радиационного теплообмена

Чтобы задать поверхности радиационного теплообмена, выполните следующие действия:

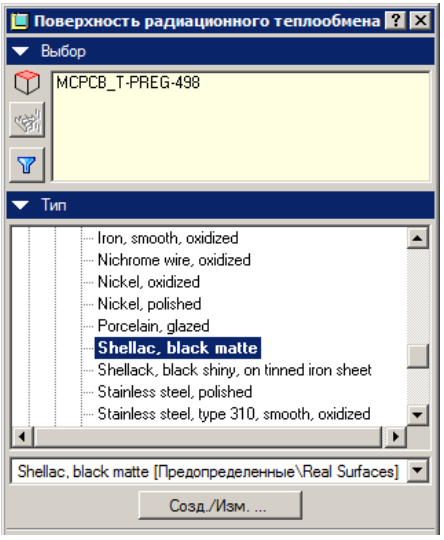
1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхность радиационного теплообмена**.

✎ *В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > Поверхность радиационного теплообмена**.*

2 В графической области выберите внешнюю поверхность диэлектрического слоя печатной платы (компонент **MCPCB T-preg**).

1 В группе **Тип** для поверхностей радиационного теплообмена раскройте список **Предопределенные\Real Surfaces** и выберите **Shellac, black matter**.

2 Кликните **OK** .
Переименуйте новый элемент **Поверхность радиационного теплообмена 1** в `Поверхность радиационного теплообмена -FR4`.



Кликните в любом месте графической области, чтобы очистить выделение.

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхность радиационного теплообмена**.

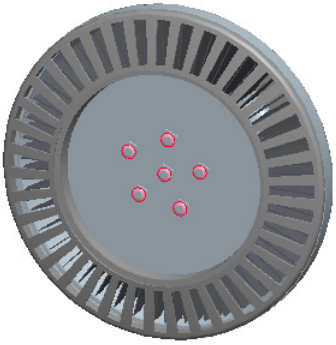
*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Добавить > Условия > Поверхность радиационного теплообмена**.*

2 В группе **Выбор** укажите верхние поверхности светодиодов.

3 В группе **Тип** нажмите кнопку **Созд./Изм. ...**(Создать/Изменить).

4 В **Инженерной базе данных** раскройте группу **Поверхности радиационного теплообмена** > **Заданы пользователем**, создайте новый элемент и измените его **Имя** на `avc-led`.

5 Задайте параметры поверхности так, как показано ниже:



Тип поверхности радиационного теплообмена	Стенка
Отражение	Диффузное
⊟ Степень черноты	Задание для теплового и солнечного излучения
Степень черноты	0.7
Коэффициент поглощения солнечного излучения	0.7

6 Сохраните созданную поверхность радиационного теплообмена и выйдите из **Инженерной базы данных**.

7 В группе **Тип** для поверхностей радиационного теплообмена раскройте список **Заданы пользователем** и выберите `avc-led`.

8 Кликните **OK** .
Измените имя новой поверхности радиационного теплообмена на `Поверхность радиационного теплообмена - Светодиод`.

Задание светодиодов

Для моделирования светодиода в FloEFD реализовано две модели: обычная, которая основывается на использовании 2R модели, и расширенная модель на основе тепловой характеристики светодиода. Эффективность преобразования электрической энергии в световую энергию определяется условиями функционирования светодиода: температурой p-n - перехода T_J и прямым током, проходящим через светодиод I_F. Мощность, рассеиваемая в активной области светодиода, (P_H) определяется как разность между полной электрической энергией $V_F \cdot I_F$, подаваемой на светодиод, и полной энергией оптического излучения (Φ_e - полный поток излучения):

$$P_H = V_F \cdot I_F - \Phi_e$$

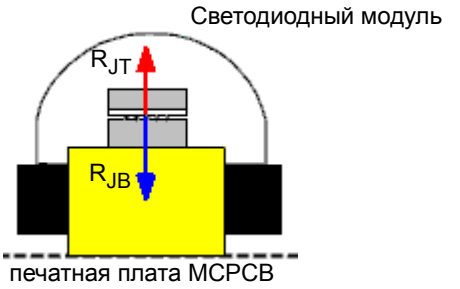
Температура p-n - перехода определяется исходя из этой мощности и теплового сопротивления R_{th}:

$$T_J = P_H \cdot R_{th} + T_{amb}$$

Полное тепловое сопротивление между p-n - переходом в кристалле и окружающей средой определяется следующим образом:

$$\frac{1}{R_{th}} = \frac{1}{R_{JB}} + \frac{1}{R_{JT}}$$

здесь R_{JB} - **Сопротивление p-n - перехода к нижней поверхности**, т.е. полное тепловое сопротивление между p-n - переходом и поверхностью радиатора; R_{JT} - **Сопротивление p-n - перехода к верхней поверхности**, т.е. полное тепловое сопротивление между p-n - переходом и верхней поверхностью светодиода ($R_{JT} >> R_{JB}$), по умолчанию оно принимается равным $50 \cdot R_{JB}$.



Простая модель основывается на использовании 2R модели и точного значения рассеиваемой тепловой мощности P_H. Это модель позволяет определить только температуру p-n - перехода T_J.

В расширенной модели используются определенное значение прямого тока I_F, а также тепловые характеристики светодиода и его светоотдача, измеренные с помощью T3Ster+TeraLED. Это модель позволяет определить температуру p-n - перехода и излучаемый тепловой поток (Φ_V, "hot lumens"). Она основана на следующих предположениях:

- прямое напряжение V_{F0} при заданном постоянном прямом токе I_F линейно зависит от температуры p-n - перехода:

$$V_F = V_{F0} - S_{VF} \cdot (T_J - T_0) \quad \textbf{(2.1)}$$

- мощность оптического излучения Φ_e и световой поток ("hot lumens") Φ_V также при заданном постоянном прямом токе линейно зависят от температуры p-n - перехода:

$$\Phi_e = \Phi_{e0} - S_{\Phi e} \cdot (T_J - T_0) \quad \textbf{(2.2)}$$

$$\Phi_V = \Phi_{V0} - S_{\Phi V} \cdot (T_J - T_0) \quad \textbf{(2.3)}$$

здесь:

S_{VF} - температурная чувствительность прямого напряжения V_F при постоянном прямом токе I_F;

$S_{\Phi e}$ - температурная чувствительность потока излучения Φ_e при постоянном прямом токе I_F;

$S_{\Phi V}$ - температурная чувствительность светового потока Φ_V при постоянном прямом токе I_F;

T_0 - характерная температура.

Получение данных из T3Ster TeraLED

Для выполнения измерений характеристик светодиодов рекомендуется пользоваться методами, описанными в следующих стандартах JEDEC: JESD51-51, JESD51-52 и JESD 51-14. Документ JESD51-14 регламентирует метод испытаний по определению теплового сопротивления между кристаллом и корпусом полупроводниковых приборов (например, светодиодов). Стандарты JESD51-51 и JESD51-52 содержат основные рекомендации по тепловым испытаниям светодиодов. Если Вы выполняете измерение характеристик светодиодов с помощью оборудования компании Mentor Graphics - нестационарного теплового испытательного оборудования T3Ster в совокупности с измерительным оборудованием T3Ster TeraLED, а также используете программные средства контроля TeraLED Measurement Control версии v2.0 (или выше) - то Вы можете быть уверены в том, что полученные измерения будут удовлетворять вышеперечисленным стандартам. (В стандарте JESD51-51 описана процедура тепловых испытаний мощных светодиодов; в стандарте JESD51-52 содержатся рекомендации по измерению светоотдачи светодиодов, а также их тепловых характеристик.)

В FloEFD требуется задание следующих характеристик светодиода: модель RC ladder (подробная модель на основе тепловой характеристики светодиода, для ее получения применяется ступенчатая аппроксимация кумулятивной структурной функции), электрические и оптические характеристики светодиода при заданном постоянном токе и характерном значении температуры p-n - перехода (номинальное значение прямого напряжения и температурная чувствительность по напряжению, световой поток и температурная чувствительность по световому потоку, поток излучения и температурная чувствительность по потоку излучения).

Инструмент T3Ster Master позволяет получить динамическую тепловую компактную модель (DCTM - или RC - модель) светодиодного модуля. Остальные данные могут быть получены из инструмента TeraLED View. Если Вы снимаете характеристики одиночного светодиода, то из множества нестационарных измерений необходимо получить значение сопротивления RthJC (согласно описанию в стандарте JESD51-14). Нестационарные измерения (как тепловых, так и радиометрических/фотометрических величин), которые используются в этой процедуре, должны также удовлетворять стандартам JESD51-51 и 51-52. Для определения значения RthJC воспользуйтесь командой **Determine Rth-JC** (Определить Rth-JC) в T3Ster Master. После того, как значение RthJC будет получено, модель RC ladder можно экспортировать в файл ***.xCTM**. Затем этот файл можно импортировать в FloEFD. Для этого нажмите кнопку **Импорт из T3Ster TeraLED** в Инженерной базе данных. Путем импортирования могут быть заданы только данные модели RC ladder. Для получения электрических и оптических характеристик светодиода необходимо воспользоваться инструментом TeraLED View. Если Вы не намерены проводить нестационарное исследование в FloEFD, то достаточно задать только одно значение сопротивления и соответствующее ему значение теплоемкости.

Для того, чтобы получить характеристики диода, перейдите в TeraLED View и откройте вольт-амперную характеристику диода (Diode Characteristics chart). Выберите чувствительность по напряжению (SVF) для того значения прямого тока (I_{force}), которое соответствует условиям функционирования светодиода, рассматриваемого в FloEFD. Следует иметь в виду, что в FloEFD необходимо вводить положительное значение чувствительности по напряжению в единицах измерения системы СИ. При выполнении измерений характеристик светодиода с помощью инструмента TeraLED Measurement Control Tool (версии 2.0 или выше) необходимо убедиться в том, что выбранное характерное значение температуры p-n - перехода имеется среди предварительно заданных значений. Чтобы получить значения характерной температуры, напряжения ($U_{forward}$), потока излучения (P_{opt}), светового потока (Ф), чувствительности по потоку излучения ($S_{\varphi e}$) и чувствительности по световому потоку ($S_{\varphi v}$), перейдите в **Optical Test Report** (Протокол испытаний по определению оптических характеристик) (требуется версия 2.0 или выше) и выберите эти данные из таблицы, соответствующей данному значению характерной температуры. Переведите величины в систему СИ, а также измените значения Чувствительности по потоку излучения и Чувствительности по световому потоку на положительные. Пример представлен в таблице ниже:

TeraLED View	FloEFD
$U_{forward}$ [V]	**Напряжение [V]**
3.11	3.11
SVF [mV/°C]	**Чувствительность по напряжению [V/K]**
-1.34	0.00134
P_{opt} [mW]	**Поток излучения [W]**
313.3	0.3133
$S_{\varphi e}$ [mW/°C]	**Чувствительность по потоку излучения [W/K]**
-0.68	0.00068
Ф [lm]	**Световой поток [lm]**
93	93
$S_{\varphi v}$ [mlm/°C]	**Чувствительность по световому потоку [lm/K]**
-227.6	0.2276

Задание предопределенных светодиодных компонентов

В инженерной базе данных содержится множество предопределенных светодиодных компонентов с тепловыми и оптическими характеристиками, измеренными с помощью T3Ster+TeraLED. Каждый элемент соответствует определенному типу модуля. Модели предопределенных светодиодных компонентов находятся в папке **E2 - LED Lighting\Pre-Defined LEDs**.

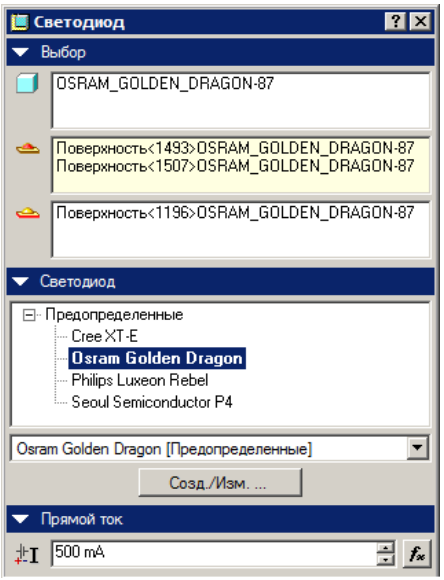
1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Светодиод**.

2 В группе **Выбор** укажите центральный светодиод (компонент **OSRAM_GOLDEN_DRAGON**) в качестве **Компонента для задания светодиода** . В качестве **Верхних поверхностей** выберите поверхность линзы этого компонента, а в качестве **Нижних поверхностей** задайте его нижнюю поверхность.

3 В группе **Светодиод** выберите элемент **Osram Golden Dragon**.

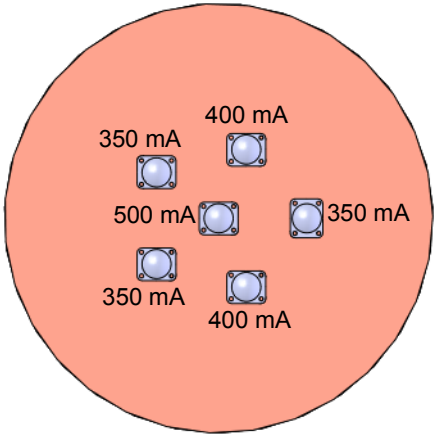
4 В поле **Прямой ток** введите значение **Силы тока** , равной `500 mA`.

5 Кликните **OK** . В **Дереве анализа** появится новый элемент **Светодиод 1**.



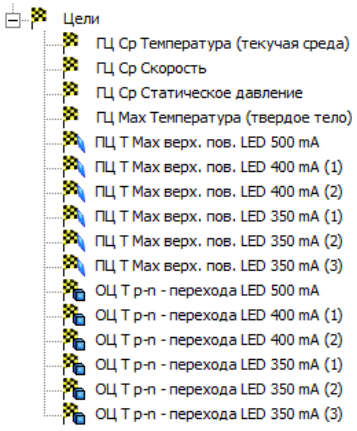
6 Переименуйте созданный элемент в `Osram Dragon LED 500 mA`. Это имя будет использоваться для выбора этого элемента при задании **Целей**.

7 Таким же образом задайте другие пять элементов светодиодов. Укажите для них следующие значения силы тока (см. рис. ниже):



Задание целей

На верхних поверхностях светодиодов (поверхностях радиационного теплообмена) задайте поверхностные цели по максимальной температуре. Кроме того, задайте для светодиодов объемные цели по средней температуре (в качестве параметра цели следует выбрать **Температура (Твердое тело)**). Также необходимо задать глобальные цели. В качестве параметров целей следует выбрать средние значения параметров потока: скорость, температуру и статическое давление. Кроме того, необходимо задать глобальную цель по максимальной температуре твердого тела. Вы можете переименовать созданные цели так, как показано на рисунке, для того, чтобы было проще отслеживать их в процессе расчета.



Задание настроек глобальной сетки

Задайте следующие настройки глобальной сетки:

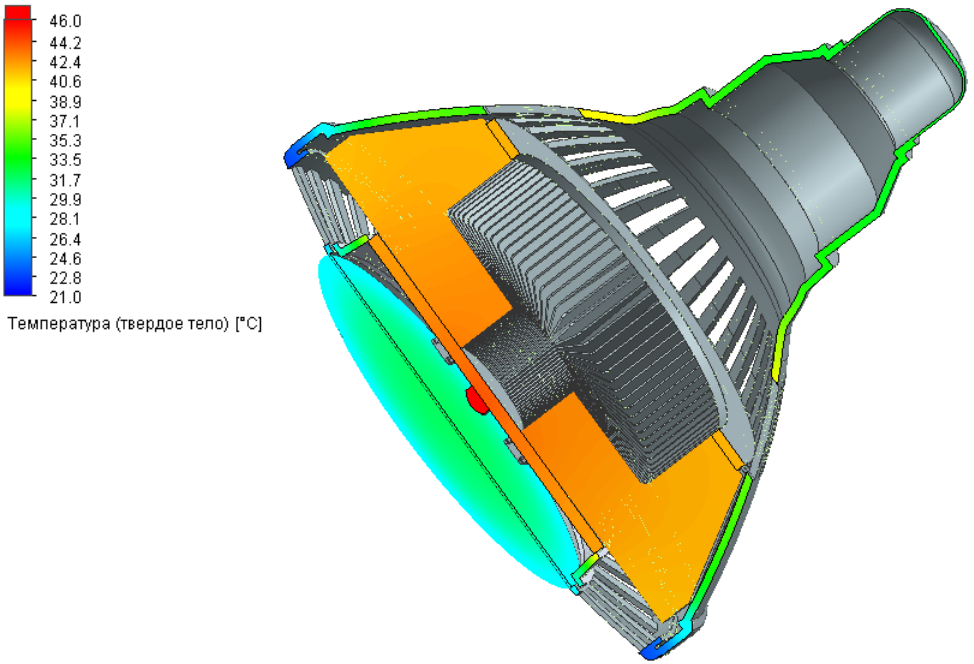
Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	`3` *(по умолчанию)*
Минимальный зазор	`0.005 m`
Другие опции по умолчанию	

Сохраните модель и запустите расчет.

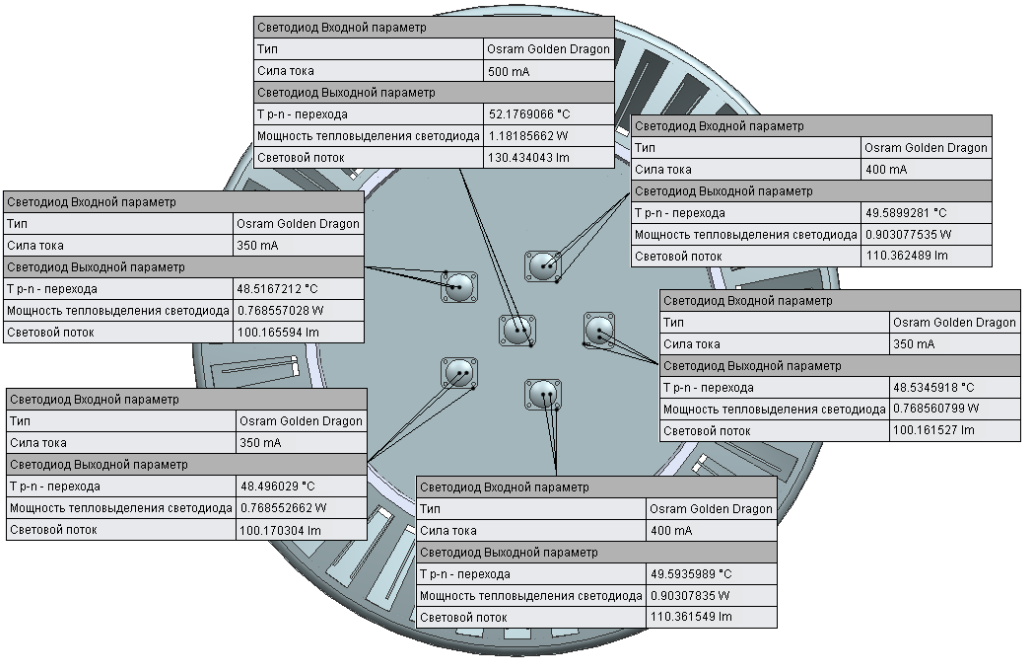
Результаты

В соответствии с полученными результатами можно сказать, что светодиоды работают при умеренных температурах. Поэтому нет необходимости вводить какие-либо дополнительные конструктивные элементы с целью повышения эффективности теплообмена внутри рассматриваемого корпуса.

Имя цели	Значение °C
ПЦ T Max верх. пов. LED 500 mA	45,2
ПЦ T Max верх. пов. LED 400 mA (1)	43,5
ПЦ T Max верх. пов. LED 400 mA (2)	44,0
ПЦ T Max верх. пов. LED 350 mA (1)	43,1
ПЦ T Max верх. пов. LED 350 mA (2)	43,6
ПЦ T Max верх. пов. LED 350 mA (3)	42,9
ОЦ T p-n - перехода LED 500 mA	52,3
ОЦ T p-n - перехода LED 400 mA (1)	49,7
ОЦ T p-n - перехода LED 400 mA (2)	49,7
ОЦ T p-n - перехода LED 350 mA (1)	48,6
ОЦ T p-n - перехода LED 350 mA (2)	48,6
ОЦ T p-n - перехода LED 350 mA (3)	48,6



Для того, чтобы просмотреть основные характеристики светодиодов, можно воспользоваться выносками.



F

Примеры для модуля Advanced

Примеры **модуля Advanced** демонстрируют использование дополнительных возможностей и элементов этого модуля для решения определенных инженерных задач, таких как горение газообразных смесей. Эта функциональность доступна только для пользователей модуля Advanced.

F1 - Горение в трубе (Combustion in a Tube)

Примеры для модуля Advanced:

F1

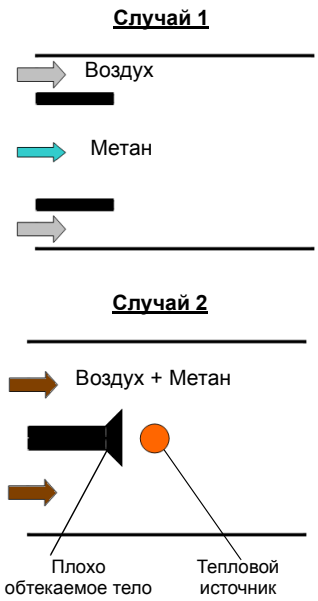
Горение в трубе

Эта возможность доступна только для пользователей модуля Advanced.

Постановка задачи

Этот пример демонстрирует возможности FloEFD по моделированию горения газообразной смеси. Описывается, как создать проект, т.е. задать состав горючего и окислителя, граничные условия и расчетные цели.

В качестве примера воспроизведем горение смеси метан-воздух в цилиндрической трубе. Рассматриваются два случая для демонстрации различных подходов к моделированию горения в FloEFD. В первом случае метан (горючее) и воздух (окислитель) поступают в трубу независимо друг от друга, и предполагается, что возгорание возникает в тот момент, когда метан смешивается с воздухом. Во втором случае метан и воздух предварительно перемешаны, и в областях с температурой смеси, превышающей заданную температуру воспламенения, происходит горение с задержкой воспламенения. В отличие от первого случая, здесь в центре трубы находится плохо обтекаемое тело, которое препятствует срыву и проскоку пламени. Для нагрева смеси выше температуры воспламенения используется локальный нестационарный тепловой источник, который располагается позади плохо обтекаемого тела.



Оба случая схематично показаны на изображениях справа.

Рассматриваемая труба имеет длину 750 mm и диаметр 50 mm. Массовые расходы метана и воздуха на входе составляют $5.5 \cdot 10^{-5}$ kg/s и $9.45 \cdot 10^{-4}$ kg/s, что позволяет считать состав смеси стехиометрическим. Температура на входе составляет 293 K, а давление на выходе составляет 1 atm.

Целью данного моделирования является оценка теплового эффекта от горения в трубе.

Случай 1: Горение без предварительного перемешивания веществ

Открытие модели

Скопируйте папку **F1 - Combustion in Tube** в свою рабочую директорию. Откройте сборку **Tube.asm**. Выберите базовый экземпляр.

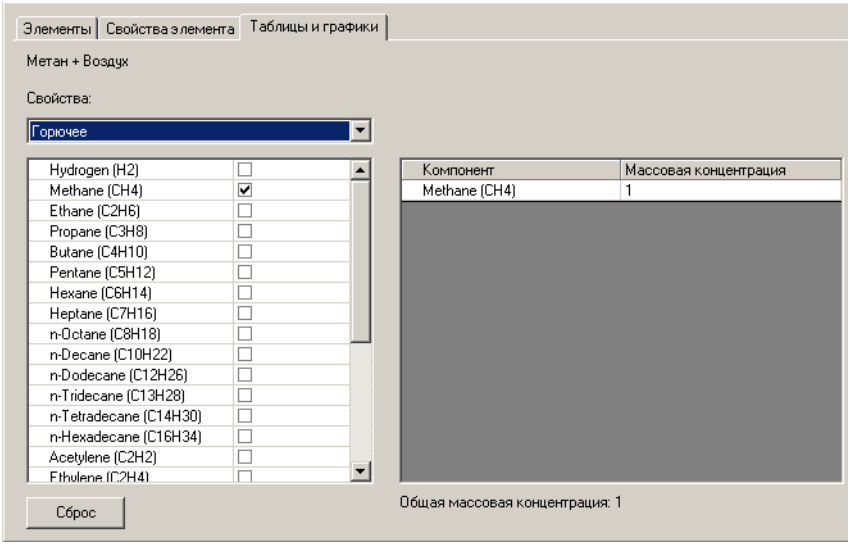
🕮 *Вы можете пропустить создание проекта и запустить на расчет готовый проект FloEFD, созданный в соответствии с этим примером. Для этого Вам необходимо открыть сборку **Tube.asm**, расположенную в папке **F1 - Combustion in Tube\Ready To Run**, и запустить на расчет нужные проекты.*

Задание горючей смеси в инженерной базе данных

Перед тем, как запустить **Мастер проекта**, задайте состав горючего и окислителя в **Горючей смеси**, используемой в этом проекте.

1. Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Инженерная база данных**.
2. В **Инженерной базе данных**, в группе **Вещества, Горючие смеси, Заданы пользователем**, создайте новый элемент и замените его **Имя** на `Метан+Воздух`.
3. Перейдите на вкладку **Таблицы и графики** и из раскрывающегося списка **Свойства** выберите **Горючее**. В списке доступных горючих веществ выберите **Methane (CH4)**.

4 В таблице справа в столбце **Массовая концентрация** для вещества **Methane (CH4)** поставьте `1`.



5 Из раскрывающегося списка **Свойства** выберите **Окислитель**. В списке доступных окислителей выберите **Air** и таким же образом измените его **Массовую концентрацию** на `1`.

🕮***Общая массовая концентрация*** *является суммой массовых концентраций веществ отдельно для Горючего и Окислителя. Вы должны проверить, что это значение равно 1 как для Горючего, так и для Окислителя.*

6 Вернитесь на вкладку **Свойства элемента**.

7 Измените остальные параметры смеси так, как показано ниже:

Минимальное значение давления	100000 Pa
Максимальное значение давления	110000 Pa
Минимальное значение температуры	290 K
Максимальное значение температуры	2500 K
Горение с конечной скоростью образования равновесных продуктов сгорания	☐

🕮*FloEFD вычисляет термодинамические и теплофизические свойства горючей смеси в заданном интервале давлений и температур и сохраняет их в виде таблицы.*

8 Сохраните созданную горючую смесь и выйдите из **Инженерной базы данных**.

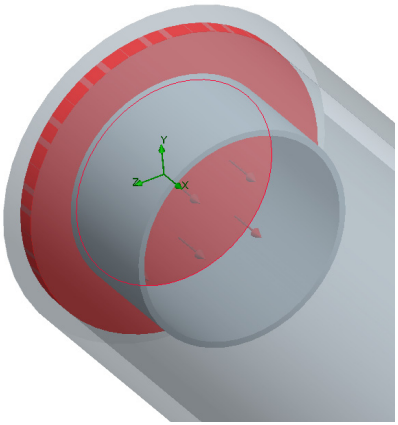
Создание проекта FloEFD

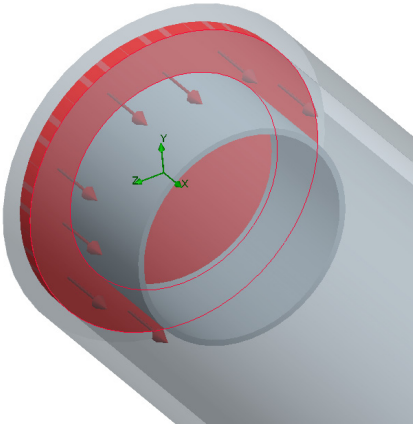
Используя **Мастер проекта**, создайте новый проект, как изложено ниже:

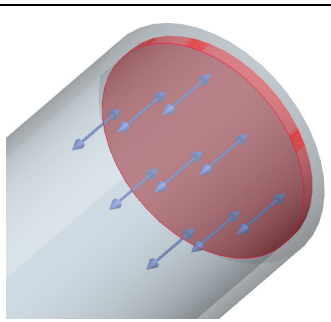
Имя проекта	*Case 1 - Non-Premixed Combustion*
Система единиц измерения	*SI*
Тип задачи	*Внутренняя, Исключить полости без условий течения*
Физические модели	*Нестационарность (со значениями по умолчанию)*
Текучая среда по умолчанию	*Горючие смеси / Метан + Воздух*
Условия на стенках по умолчанию	*Адиабатическая стенка (шероховатость по умолчанию равна 0)*
Начальные условия	*Условия по умолчанию*

Задание граничных условий

Задайте граничные условия для потока на входе и выходе, как показано в таблице ниже:

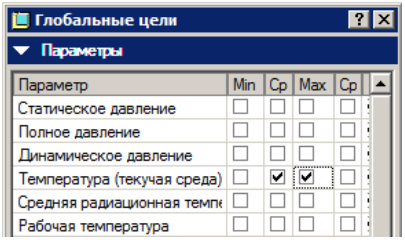
Тип	**Массовый расход на входе**	
Имя	**Methane Массовый расход на входе**	
Поверхности	внутренняя кругообразная поверхность крышки на входе (компонент **INLET_LID1**)	
Массовый расход `5.5e-005 kg/s` **Термодинамические параметры**: Значения по умолчанию (101325 Pa и 293.2 K) **Концентрации веществ**: **Массовая концентрация горючего** - `1`; **Массовая концентрация окислителя** - `0`		

Тип	**Массовый расход на входе**	
Имя	**Air Массовый расход на входе**	
Поверхности	внутренняя кольцеобразная поверхность крышки на выходе (компонент **INLET_LID1**)	
Массовый расход `9.45e-004 kg/s` **Термодинамические параметры**: Значения по умолчанию (101325 Pa и 293.2 K) **Концентрации веществ**: **Массовая концентрация горючего** - `0`; **Массовая концентрация окислителя** - `1`		

Тип	**Давление окружающей среды**	
Имя	**Давление окружающей среды 1**	
Поверхности	внутренняя поверхность крышки на выходе (компонент **OUTLET_LID**)	
Термодинамические параметры: Значения по умолчанию (101325 Па и 293.2 K)		

Задание целей проекта

1 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Глобальные цели**.

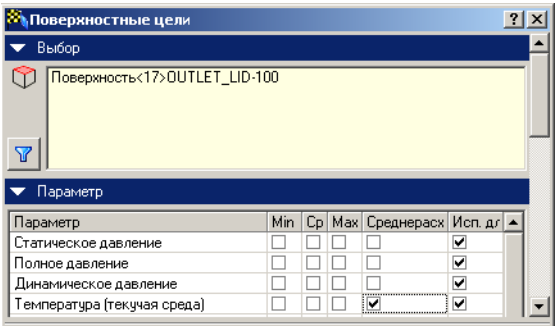


В Creo Parametric кликните ***Flow Analysis > Добавить > Цели > Глобальные цели.***

2 В таблице **Параметр** выберите **Max** и **Ср** для параметра **Температура (Текучая среда)**.

3 Кликните **OK** .

4 Кликните **Flow Analysis > Добавить > Поверхностные цели**.



В Creo Parametric кликните ***Flow Analysis > Добавить > Цели > Поверхностные цели.***

5 В дереве анализа выберите граничное условие **Давление окружающей среды 1**.

6 В таблице **Параметр** выберите **Среднерасходное** значение для параметра **Температура (Текучая среда)**.

7 Кликните **OK** .

Задание настроек глобальной сетки

Задайте следующие настройки глобальной сетки:

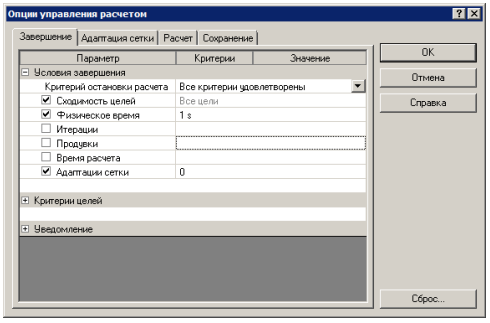
Тип	*Автоматический режим*
Уровень начальной сетки	`3` *(по умолчанию)*
Минимальный зазор	`0.015 m`
Другие опции по умолчанию	

Настройка опций управления расчетом

1 Кликните **Flow Analysis > Опции управления расчетом**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Проект > Опции управления расчетом.***

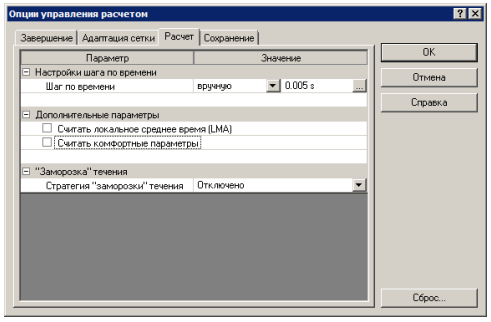
2 На вкладке **Завершение** диалогового окна **Опции управления расчетом** раскройте группу **Условия завершения** и в качестве **Критерия остановки расчета** выберите **Все критерии удовлетворены**. Также включите **Сходимость целей**.



3 Перейдите на вкладку **Расчет**.

4 Для параметра **Шаг по времени** выберите режим **вручную** и измените значение шага на `0.005 s`. Это значение соответствует заданным условиям и позволяет получить решение быстрее, т.к. ожидаемый по умолчанию шаг по времени на порядок меньше.

5 Кликните **OK**.

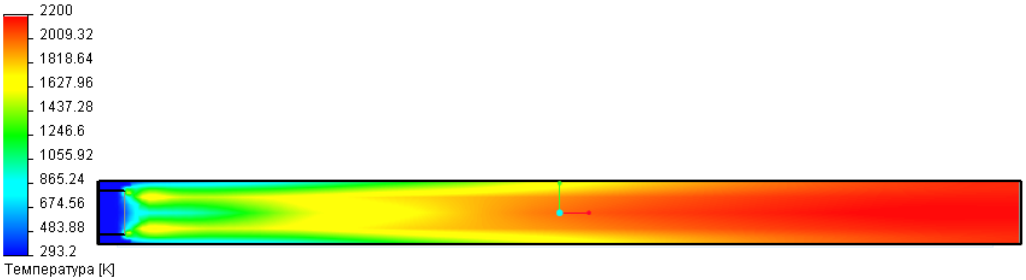


Сохраните модель и запустите расчет. Если Вы запускаете этот пример впервые и рассчитанной таблицы с термодинамическими и теплофизическими свойствами смеси **Метан+Воздух** нет, FloEFD сначала рассчитает эту таблицу.

📖*Рассчитанная таблица с термодинамическими и теплофизическими свойствами горючей смеси может использоваться для будущих FloEFD проектов, включающих эту смесь. Эта таблица не пересчитывается, если нет изменений в свойствах смеси (т.е. min/max значений температуры или давления).*

Результаты

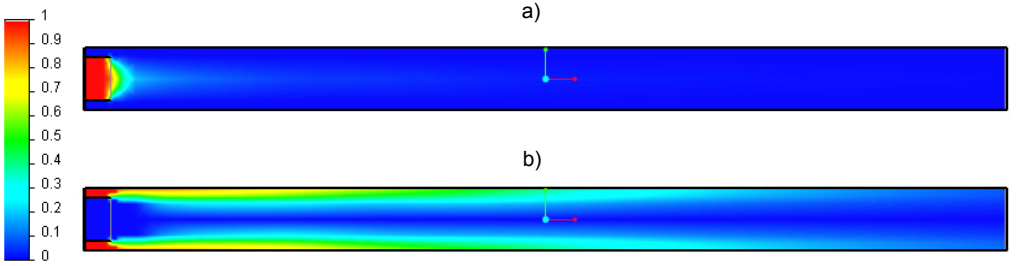
Распределение температуры текучей среды вдоль трубы показано на рисунке ниже.



Распределение температуры вдоль плоскости симметрии трубы

Кроме того, рассмотрим распределение несгоревшего горючего и непрореагировавшего окислителя вдоль трубы.

Чтобы отобразить параметры **Массовая концентрация несгоревшего горючего** и **Массовая концентрация непрореагировавшего окислителя**, нужно включить их в список **Параметр** (Вы можете добавить эти параметры в список **Параметр** в диалоговом окне редактирования картины или палитры, выбрав **Добавить параметр** в конце списка).



Распределение несгоревшего горючего (a) и непрореагировавшего окислителя (b) в плоскости симметрии вдоль трубы

Согласно этим рисункам, горючее и окислитель в трубе успевают полностью прореагировать между собой. Распределение непрореагировавших компонентов показывает характер смешивания вдоль трубы.

Также можно вывести массовые концентрации некоторых конкретных продуктов сгорания. Рассмотрим массовые концентрации токсичных продуктов сгорания, таких как оксид углерода (CO) и оксиды азота (NO_x), рассчитанные на поверхности выхода. Чтобы отобразить параметры **Массовая концентрация оксида углерода (CO)**, **Массовая концентрация оксида азота (NO)** и **Массовая концентрация диоксида азота (NO2)**, нужно включить их в список **Параметр** (Вы можете добавить эти параметры в список **Параметр** в диалоговом окне редактирования картины или палитры**,** выбрав **Добавить параметр** в конце списка).

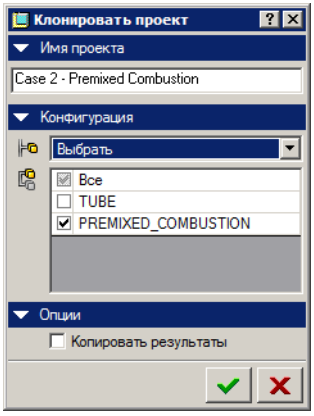
Параметр	Минимум	Максимум	Среднее	Среднерасходный	Площадь поверхности [m^2]
Массовая концентрация диоксида углерода (CO2) [ ]	0,126467662	0,133556112	0,130904627	0,129631533	0,001944867
Массовая концентрация оксида углерода (CO) [ ]	0,002118455	0,023118126	0,009948792	0,013763697	0,001944867
Массовая концентрация оксида азота (NO) [ ]	0,000887142	0,003387577	0,002478966	0,002023925	0,001944867
Массовая концентрация диоксида азота (NO2) [ ]	2,21039E-07	2,3555E-06	1,50725E-06	1,13546E-06	0,001944867

Массовые концентрации токсичных компонентов продуктов сгорания на поверхности выхода

Случай 2: Горение предварительно перемешанных веществ с воспламенением

Рассмотрим решение подобной задачи, если горючее и окислитель предварительно смешаны. Чтобы рассчитать горение предварительно перемешанных компонентов, необходимо включить опцию **Горение с конечной скоростью образования равновесных продуктов сгорания** и задать значение параметра **Температура воспламенения** в смеси **Метан + Воздух**. Для этого примера значение температуры воспламенения принято равным 700K. Это означает, что возгорание возникнет только тогда, когда температура смеси превысит 700K. Для обеспечения необходимой температуры воспламенения тепловой источник мощностью 100 W располагается позади плохо обтекаемого тела и включается на 0.05 s.

1. Кликните **Flow Analysis > Проект > Клонировать проект**
2. В поле **Имя проекта** введите `Case 2 - Premixed Combustion`**.**
3. В списке **Конфигурация, в которую необходимо добавить проект** выберите **Выбрать**.
4. В списке **Конфигурации** выберите `PREMIXED_COMBUSTION`.
5. Кликните **OK**. В ответ на вопрос о восстановлении настроек сетки кликните **Да**. Обратите внимание на предупреждение, вызванное изменениями в геометрии.



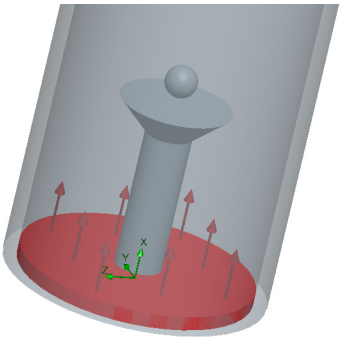
6. В склонированном проекте удалите граничные условия **Methane Массовый расход на входе** и **Air Массовый расход на входе**.
7. Кликните **Flow Analysis > Инструменты > Инженерная база данных**.
8. Раскройте группу **Вещества, Горючие смеси, Заданы пользователем** и скопируйте и вставьте горючую смесь **Метан+Воздух**. Переименуйте ее на `Метан+Воздух с воспламенением` и измените ее параметры, как показано ниже:

Горение с конечной скоростью образования равновесных продуктов сгорания	☑
Температура воспламенения	700 K

9. Сохраните изменения и выйдите из **Инженерной базы данных**.
10. Кликните **Flow Analysis > Общие настройки** и на вкладке **Текучая среда** замените смесь в таблице **Текучие среды проекта** на только что созданную (**Метан+Воздух с воспламенением**). По окончании кликните **OK**, чтобы принять изменения.

*Чтобы открыть диалоговое окно **Общие настройки** в Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Проект > Общие настройки.***

11 На кольцевой поверхности крышки на входе (компонент **INLET_LID**) создайте граничное условие **Массовый расход на входе** и задайте значения, как показано ниже:



Параметры течения:

Массовый расход: 0.001 kg/s

Термодинамические параметры:

Значения по умолчанию (101325 Pa and 293 K)

Концентрации веществ:

Массовая концентрация горючего: 0.055;

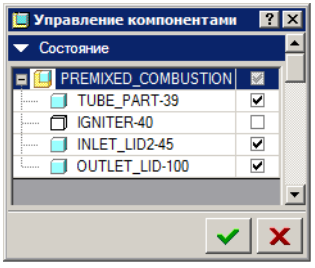
Массовая концентрация окислителя: 0.945

12 Кликните **Flow Analysis > Управление компонентами**.

*В Creo Parametric кликните **Flow Analysis > Проект > Управление компонентами.***

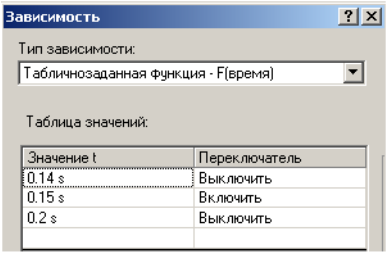
13 В диалоговом окне **Управление компонентами** отключите компонент **IGNITER**, затем кликните **OK**.

Теперь FloEFD будет трактовать это компонент как текучую среду.



14 Выберите компонент **IGNITER** и задайте **Объемный тепловой источник**, который включен в период времени с 0.15 s до 0.2 s. Чтобы сделать это, в группе **Переключатель**, кликните **Зависимость** .

15 Выберите **F(время)** в качестве **Типа зависимости** и заполните таблицу, как показано ниже. По окончании кликните **OK** .



16 Задайте **Мощность тепловыделения** равной `100 W` и кликните **OK**.

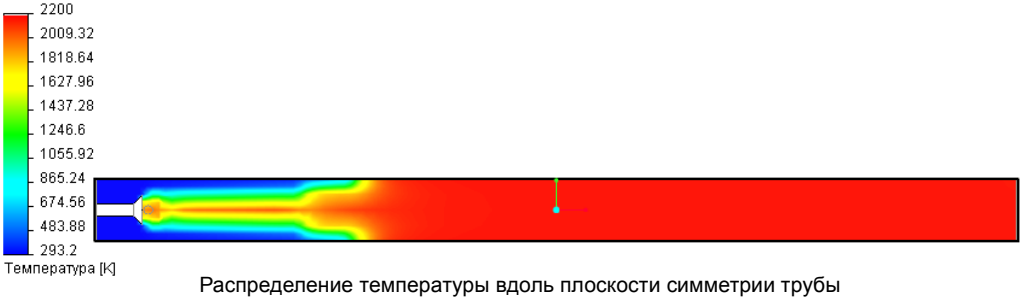
📖*Мощность теплового источника, необходимая для воспламенения горючей смеси, зависит от объема теплового источника, локальной температуры, теплоемкости и скорости смеси.*

📖*Существуют другие способы нагрева горючей смеси выше температуры воспламенения, такие как подача горячих газов или наличие горячих стенок.*

Сохраните модель и запустите расчет.

В течение расчета можно проследить, как изменяется температура потока во времени. Обратите внимание, что когда максимальная температура смеси ниже заданной температуры воспламенения, смесь не горит. После 0.15 s тепловой источник включается, нагревает смесь выше температуры воспламенения, и начинается горение.

Распределение рассчитанной температуры показано ниже.



Распределение температуры вдоль плоскости симметрии трубы

Так как заданный состав смеси метан/воздух близок к стехиометрическому, максимальная температура продуктов сгорания такая же, как и в предыдущем посчитанном проекте.

End-User License Agreement

The latest version of the End-User License Agreement is available on-line at:
www.mentor.com/eula

MPORTANT INFORMATION

USE OF ALL SOFTWARE IS SUBJECT TO LICENSE RESTRICTIONS. CAREFULLY READ THIS LICENSE AGREEMENT BEFORE USING THE PRODUCTS. USE OF SOFTWARE INDICATES CUSTOMER'S COMPLETE AND UNCONDITIONAL ACCEPTANCE OF THE TERMS AND CONDITIONS SET FORTH IN THIS AGREEMENT. ANY ADDITIONAL OR DIFFERENT PURCHASE ORDER TERMS AND CONDITIONS SHALL NOT APPLY.

END-USER LICENSE AGREEMENT ("Agreement")

This is a legal agreement concerning the use of Software (as defined in Section 2) and hardware (collectively "Products") between the company acquiring the Products ("Customer"), and the Mentor Graphics entity that issued the corresponding quotation or, if no quotation was issued, the applicable local Mentor Graphics entity ("Mentor Graphics"). Except for license agreements related to the subject matter of this license agreement which are physically signed by Customer and an authorized representative of Mentor Graphics, this Agreement and the applicable quotation contain the parties' entire understanding relating to the subject matter and supersede all prior or contemporaneous agreements. If Customer does not agree to these terms and conditions, promptly return or, in the case of Software received electronically, certify destruction of Software and all accompanying items within five days after receipt of Software and receive a full refund of any license fee paid.

1. **ORDERS, FEES AND PAYMENT.**

1.1. To the extent Customer (or if agreed by Mentor Graphics, Customer's appointed third party buying agent) places and Mentor Graphics accepts purchase orders pursuant to this Agreement (each an "Order"), each Order will constitute a contract between Customer and Mentor Graphics, which shall be governed solely and exclusively by the terms and conditions of this Agreement, any applicable addenda and the applicable quotation, whether or not those documents are referenced on the Order. Any additional or conflicting terms and conditions appearing on an Order or presented in any electronic portal or automated order management system, whether or not required to be electronically accepted, will not be effective unless agreed in writing and physically signed by an authorized representative of Customer and Mentor Graphics.

1.2. Amounts invoiced will be paid, in the currency specified on the applicable invoice, within 30 days from the date of such invoice. Any past due invoices will be subject to the imposition of interest charges in the amount of one and one-half percent per month or the applicable legal rate currently in effect, whichever is lower. Prices do not include freight, insurance, customs duties, taxes or other similar charges, which Mentor Graphics will state separately in the applicable invoice. Unless timely provided with a valid certificate of exemption or other evidence that items are not taxable, Mentor Graphics will invoice Customer for all applicable taxes including, but not limited to, VAT, GST, sales tax, consumption tax and service tax. Customer will make all payments free and clear of, and without reduction for, any withholding or other taxes; any such taxes imposed on payments by Customer hereunder will be Customer's sole responsibility. If Customer appoints a third party to place purchase orders and/or make payments on Customer's behalf, Customer shall be liable for payment under Orders placed by such third party in the event of default.

1.3. All Products are delivered FCA factory (Incoterms 2010), freight prepaid and invoiced to Customer, except Software delivered electronically, which shall be deemed delivered when made available to Customer for download. Mentor Graphics retains a security interest in all Products

delivered under this Agreement, to secure payment of the purchase price of such Products, and Customer agrees to sign any documents that Mentor Graphics determines to be necessary or convenient for use in filing or perfecting such security interest. Mentor Graphics' delivery of Software by electronic means is subject to Customer's provision of both a primary and an alternate e-mail address.

2. **GRANT OF LICENSE.** The software installed, downloaded, or otherwise acquired by Customer under this Agreement, including any updates, modifications, revisions, copies, documentation, setup files and design data ("Software") are copyrighted, trade secret and confidential information of Mentor Graphics or its licensors, who maintain exclusive title to all Software and retain all rights not expressly granted by this Agreement. Except for Software that is embeddable ("Embedded Software"), which is licensed pursuant to separate embedded software terms or an embedded software supplement, Mentor Graphics grants to Customer, subject to payment of applicable license fees, a nontransferable, nonexclusive license to use Software solely: (a) in machine-readable, object-code form (except as provided in Subsection 4.2); (b) for Customer's internal business purposes; (c) for the term of the license; and (d) on the computer hardware and at the site authorized by Mentor Graphics. A site is restricted to a one-half mile (800 meter) radius. Customer may have Software temporarily used by an employee for telecommuting purposes from locations other than a Customer office, such as the employee's residence, an airport or hotel, provided that such employee's primary place of employment is the site where the Software is authorized for use. Mentor Graphics' standard policies and programs, which vary depending on Software, license fees paid or services purchased, apply to the following: (a) relocation of Software; (b) use of Software, which may be limited, for example, to execution of a single session by a single user on the authorized hardware or for a restricted period of time (such limitations may be technically implemented through the use of authorization codes or similar devices); and (c) support services provided, including eligibility to receive telephone support, updates, modifications, and revisions. For the avoidance of doubt, if Customer provides any feedback or requests any change or enhancement to Products, whether in the course of receiving support or consulting services, evaluating Products, performing beta testing or otherwise, any inventions, product improvements, modifications or developments made by Mentor Graphics (at Mentor Graphics' sole discretion) will be the exclusive property of Mentor Graphics.

3. **BETA CODE.**

3.1. Portions or all of certain Software may contain code for experimental testing and evaluation (which may be either alpha or beta, collectively "Beta Code"), which may not be used without Mentor Graphics' explicit authorization. Upon Mentor Graphics' authorization, Mentor Graphics grants to Customer a temporary, nontransferable, nonexclusive license for experimental use to test and evaluate the Beta Code without charge for a limited period of time specified by Mentor Graphics. Mentor Graphics may choose, at its sole discretion, not to release Beta Code commercially in any form.

3.2. If Mentor Graphics authorizes Customer to use the Beta Code, Customer agrees to evaluate and test the Beta Code under normal conditions as directed by Mentor Graphics. Customer will contact Mentor Graphics periodically during Customer's use of the Beta Code to discuss any malfunctions or suggested improvements. Upon completion of Customer's evaluation and testing, Customer will send to Mentor Graphics a written evaluation of the Beta Code, including its strengths, weaknesses and recommended improvements.

3.3. Customer agrees to maintain Beta Code in confidence and shall restrict access to the Beta Code, including the methods and concepts utilized therein, solely to those employees and Customer location(s) authorized by Mentor Graphics to perform beta testing. Customer agrees that any written evaluations and all inventions, product improvements, modifications or developments that Mentor Graphics conceived or made during or subsequent to this Agreement, including those based partly or wholly on Customer's feedback, will be the exclusive property of Mentor Graphics. Mentor Graphics will have exclusive rights, title and interest in all such property. The provisions of this Subsection 3.3 shall survive termination of this Agreement.

4. **RESTRICTIONS ON USE.**

4.1. Customer may copy Software only as reasonably necessary to support the authorized use. Each copy must include all notices and legends embedded in Software and affixed to its medium and

container as received from Mentor Graphics. All copies shall remain the property of Mentor Graphics or its licensors. Except for Embedded Software that has been embedded in executable code form in Customer's product(s), Customer shall maintain a record of the number and primary location of all copies of Software, including copies merged with other software, and shall make those records available to Mentor Graphics upon request. Customer shall not make Products available in any form to any person other than Customer's employees and on-site contractors, excluding Mentor Graphics competitors, whose job performance requires access and who are under obligations of confidentiality. Customer shall take appropriate action to protect the confidentiality of Products and ensure that any person permitted access does not disclose or use Products except as permitted by this Agreement. Customer shall give Mentor Graphics written notice of any unauthorized disclosure or use of the Products as soon as Customer becomes aware of such unauthorized disclosure or use. Customer acknowledges that Software provided hereunder may contain source code which is proprietary and its confidentiality is of the highest importance and value to Mentor Graphics. Customer acknowledges that Mentor Graphics may be seriously harmed if such source code is disclosed in violation of this Agreement. Except as otherwise permitted for purposes of interoperability as specified by applicable and mandatory local law, Customer shall not reverse-assemble, disassemble, reverse-compile, or reverse-engineer any Product, or in any way derive any source code from Software that is not provided to Customer in source code form. Log files, data files, rule files and script files generated by or for the Software (collectively "Files"), including without limitation files containing Standard Verification Rule Format ("SVRF") and Tcl Verification Format ("TVF") which are Mentor Graphics' trade secret and proprietary syntaxes for expressing process rules, constitute or include confidential information of Mentor Graphics. Customer may share Files with third parties, excluding Mentor Graphics competitors, provided that the confidentiality of such Files is protected by written agreement at least as well as Customer protects other information of a similar nature or importance, but in any case with at least reasonable care. Customer may use Files containing SVRF or TVF only with Mentor Graphics products. Under no circumstances shall Customer use Products or Files or allow their use for the purpose of developing, enhancing or marketing any product that is in any way competitive with Products, or disclose to any third party the results of, or information pertaining to, any benchmark.

4.2. If any Software or portions thereof are provided in source code form, Customer will use the source code only to correct software errors and enhance or modify the Software for the authorized use, or as permitted for Embedded Software under separate embedded software terms or an embedded software supplement. Customer shall not disclose or permit disclosure of source code, in whole or in part, including any of its methods or concepts, to anyone except Customer's employees or on-site contractors, excluding Mentor Graphics competitors, with a need to know. Customer shall not copy or compile source code in any manner except to support this authorized use.

4.3. Customer agrees that it will not subject any Product to any open source software ("OSS") license that conflicts with this Agreement or that does not otherwise apply to such Product.

4.4. Customer may not assign this Agreement or the rights and duties under it, or relocate, sublicense, or otherwise transfer the Products, whether by operation of law or otherwise ("Attempted Transfer"), without Mentor Graphics' prior written consent and payment of Mentor Graphics' then-current applicable relocation and/or transfer fees. Any Attempted Transfer without Mentor Graphics' prior written consent shall be a material breach of this Agreement and may, at Mentor Graphics' option, result in the immediate termination of the Agreement and/or the licenses granted under this Agreement. The terms of this Agreement, including without limitation the licensing and assignment provisions, shall be binding upon Customer's permitted successors in interest and assigns.

4.5. The provisions of this Section 4 shall survive the termination of this Agreement.

5. **SUPPORT SERVICES.** To the extent Customer purchases support services, Mentor Graphics will provide Customer with updates and technical support for the Products, at the Customer site(s) for which support is purchased, in accordance with Mentor Graphics' then current End-User Support Terms located at http://supportnet.mentor.com/supportterms.

6. **OPEN SOURCE SOFTWARE.** Products may contain OSS or code distributed under a proprietary third party license agreement, to which additional rights or obligations ("Third Party Terms") may apply. Please see the applicable Product documentation (including license files, header files, read-me files or source code) for details. In the event of conflict between the terms of this Agreement (including any addenda) and the Third Party Terms, the Third Party Terms will control solely with respect to the OSS or third party code. The provisions of this Section 6 shall survive the termination of this Agreement.

7. **LIMITED WARRANTY.**

   7.1. Mentor Graphics warrants that during the warranty period its standard, generally supported Products, when properly installed, will substantially conform to the functional specifications set forth in the applicable user manual. Mentor Graphics does not warrant that Products will meet Customer's requirements or that operation of Products will be uninterrupted or error free. The warranty period is 90 days starting on the 15th day after delivery or upon installation, whichever first occurs. Customer must notify Mentor Graphics in writing of any nonconformity within the warranty period. For the avoidance of doubt, this warranty applies only to the initial shipment of Software under an Order and does not renew or reset, for example, with the delivery of (a) Software updates or (b) authorization codes or alternate Software under a transaction involving Software re-mix. This warranty shall not be valid if Products have been subject to misuse, unauthorized modification, improper installation or Customer is not in compliance with this Agreement. MENTOR GRAPHICS' ENTIRE LIABILITY AND CUSTOMER'S EXCLUSIVE REMEDY SHALL BE, AT MENTOR GRAPHICS' OPTION, EITHER (A) REFUND OF THE PRICE PAID UPON RETURN OF THE PRODUCTS TO MENTOR GRAPHICS OR (B) MODIFICATION OR REPLACEMENT OF THE PRODUCTS THAT DO NOT MEET THIS LIMITED WARRANTY. MENTOR GRAPHICS MAKES NO WARRANTIES WITH RESPECT TO: (A) SERVICES; (B) PRODUCTS PROVIDED AT NO CHARGE; OR (C) BETA CODE; ALL OF WHICH ARE PROVIDED "AS IS."

   7.2. THE WARRANTIES SET FORTH IN THIS SECTION 7 ARE EXCLUSIVE. NEITHER MENTOR GRAPHICS NOR ITS LICENSORS MAKE ANY OTHER WARRANTIES EXPRESS, IMPLIED OR STATUTORY, WITH RESPECT TO PRODUCTS PROVIDED UNDER THIS AGREEMENT. MENTOR GRAPHICS AND ITS LICENSORS SPECIFICALLY DISCLAIM ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NON-INFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY.

8. **LIMITATION OF LIABILITY.** TO THE EXTENT PERMITTED UNDER APPLICABLE LAW, IN NO EVENT SHALL MENTOR GRAPHICS OR ITS LICENSORS BE LIABLE FOR INDIRECT, SPECIAL, INCIDENTAL, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING LOST PROFITS OR SAVINGS) WHETHER BASED ON CONTRACT, TORT OR ANY OTHER LEGAL THEORY, EVEN IF MENTOR GRAPHICS OR ITS LICENSORS HAVE BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES. IN NO EVENT SHALL MENTOR GRAPHICS' OR ITS LICENSORS' LIABILITY UNDER THIS AGREEMENT EXCEED THE AMOUNT RECEIVED FROM CUSTOMER FOR THE HARDWARE, SOFTWARE LICENSE OR SERVICE GIVING RISE TO THE CLAIM. IN THE CASE WHERE NO AMOUNT WAS PAID, MENTOR GRAPHICS AND ITS LICENSORS SHALL HAVE NO LIABILITY FOR ANY DAMAGES WHATSOEVER. THE PROVISIONS OF THIS SECTION 8 SHALL SURVIVE THE TERMINATION OF THIS AGREEMENT.

9. **THIRD PARTY CLAIMS.**

   9.1. Customer acknowledges that Mentor Graphics has no control over the testing of Customer's products, or the specific applications and use of Products. Mentor Graphics and its licensors shall not be liable for any claim or demand made against Customer by any third party, except to the extent such claim is covered under Section 10.

   9.2. In the event that a third party makes a claim against Mentor Graphics arising out of the use of Customer's products, Mentor Graphics will give Customer prompt notice of such claim. At Customer's option and expense, Customer may take sole control of the defense and any settlement of such claim. Customer WILL reimburse and hold harmless Mentor Graphics for any

LIABILITY, damages, settlement amounts, costs and expenses, including reasonable attorney's fees, incurred by or awarded against Mentor Graphics or its licensors in connection with such claims.

9.3. The provisions of this Section 9 shall survive any expiration or termination of this Agreement.

10. **INFRINGEMENT.**

10.1. Mentor Graphics will defend or settle, at its option and expense, any action brought against Customer in the United States, Canada, Japan, or member state of the European Union which alleges that any standard, generally supported Product acquired by Customer hereunder infringes a patent or copyright or misappropriates a trade secret in such jurisdiction. Mentor Graphics will pay costs and damages finally awarded against Customer that are attributable to such action. Customer understands and agrees that as conditions to Mentor Graphics' obligations under this section Customer must: (a) notify Mentor Graphics promptly in writing of the action; (b) provide Mentor Graphics all reasonable information and assistance to settle or defend the action; and (c) grant Mentor Graphics sole authority and control of the defense or settlement of the action.

10.2. If a claim is made under Subsection 10.1 Mentor Graphics may, at its option and expense: (a) replace or modify the Product so that it becomes noninfringing; (b) procure for Customer the right to continue using the Product; or (c) require the return of the Product and refund to Customer any purchase price or license fee paid, less a reasonable allowance for use.

10.3. Mentor Graphics has no liability to Customer if the action is based upon: (a) the combination of Software or hardware with any product not furnished by Mentor Graphics; (b) the modification of the Product other than by Mentor Graphics; (c) the use of other than a current unaltered release of Software; (d) the use of the Product as part of an infringing process; (e) a product that Customer makes, uses, or sells; (f) any Beta Code or Product provided at no charge; (g) any software provided by Mentor Graphics' licensors who do not provide such indemnification to Mentor Graphics' customers; (h) OSS, except to the extent that the infringement is directly caused by Mentor Graphics' modifications to such OSS; or (i) infringement by Customer that is deemed willful. In the case of (i), Customer shall reimburse Mentor Graphics for its reasonable attorney fees and other costs related to the action.

10.4. THIS SECTION 10 IS SUBJECT TO SECTION 8 ABOVE AND STATES THE ENTIRE LIABILITY OF MENTOR GRAPHICS AND ITS LICENSORS, AND CUSTOMER'S SOLE AND EXCLUSIVE REMEDY, FOR DEFENSE, SETTLEMENT AND DAMAGES, WITH RESPECT TO ANY ALLEGED PATENT OR COPYRIGHT INFRINGEMENT OR TRADE SECRET MISAPPROPRIATION BY ANY PRODUCT PROVIDED UNDER THIS AGREEMENT.

11. **TERMINATION AND EFFECT OF TERMINATION.**

11.1. If a Software license was provided for limited term use, such license will automatically terminate at the end of the authorized term. Mentor Graphics may terminate this Agreement and/or any license granted under this Agreement immediately upon written notice if Customer: (a) exceeds the scope of the license or otherwise fails to comply with the licensing or confidentiality provisions of this Agreement, or (b) becomes insolvent, files a bankruptcy petition, institutes proceedings for liquidation or winding up or enters into an agreement to assign its assets for the benefit of creditors. For any other material breach of any provision of this Agreement, Mentor Graphics may terminate this Agreement and/or any license granted under this Agreement upon 30 days written notice if Customer fails to cure the breach within the 30 day notice period. Termination of this Agreement or any license granted hereunder will not affect Customer's obligation to pay for Products shipped or licenses granted prior to the termination, which amounts shall be payable immediately upon the date of termination.

11.2. Upon termination of this Agreement, the rights and obligations of the parties shall cease except as expressly set forth in this Agreement. Upon termination of this Agreement and/or any license granted under this Agreement, Customer shall ensure that all use of the affected Products ceases, and shall return hardware and either return to Mentor Graphics or destroy Software in Customer's

possession, including all copies and documentation, and certify in writing to Mentor Graphics within ten business days of the termination date that Customer no longer possesses any of the affected Products or copies of Software in any form.

12. **EXPORT.** The Products provided hereunder are subject to regulation by local laws and European Union ("E.U.") and United States ("U.S.") government agencies, which prohibit export, re-export or diversion of certain products, information about the products, and direct or indirect products thereof, to certain countries and certain persons. Customer agrees that it will not export or re-export Products in any manner without first obtaining all necessary approval from appropriate local, E.U. and U.S. government agencies. If Customer wishes to disclose any information to Mentor Graphics that is subject to any E.U., U.S. or other applicable export restrictions, including without limitation the U.S. International Traffic in Arms Regulations (ITAR) or special controls under the Export Administration Regulations (EAR), Customer will notify Mentor Graphics personnel, in advance of each instance of disclosure, that such information is subject to such export restrictions.

13. **U.S. GOVERNMENT LICENSE RIGHTS.** Software was developed entirely at private expense. The parties agree that all Software is commercial computer software within the meaning of the applicable acquisition regulations. Accordingly, pursuant to U.S. FAR 48 CFR 12.212 and DFAR 48 CFR 227.7202, use, duplication and disclosure of the Software by or for the U.S. government or a U.S. government subcontractor is subject solely to the terms and conditions set forth in this Agreement, which shall supersede any conflicting terms or conditions in any government order document, except for provisions which are contrary to applicable mandatory federal laws.

14. **THIRD PARTY BENEFICIARY.** Mentor Graphics Corporation, Mentor Graphics (Ireland) Limited, Microsoft Corporation and other licensors may be third party beneficiaries of this Agreement with the right to enforce the obligations set forth herein.

15. **REVIEW OF LICENSE USAGE.** Customer will monitor the access to and use of Software. With prior written notice and during Customer's normal business hours, Mentor Graphics may engage an internationally recognized accounting firm to review Customer's software monitoring system and records deemed relevant by the internationally recognized accounting firm to confirm Customer's compliance with the terms of this Agreement or U.S. or other local export laws. Such review may include FlexNet (or successor product) report log files that Customer shall capture and provide at Mentor Graphics' request. Customer shall make records available in electronic format and shall fully cooperate with data gathering to support the license review. Mentor Graphics shall bear the expense of any such review unless a material non-compliance is revealed. Mentor Graphics shall treat as confidential information all information gained as a result of any request or review and shall only use or disclose such information as required by law or to enforce its rights under this Agreement. The provisions of this Section 15 shall survive the termination of this Agreement.

16. **CONTROLLING LAW, JURISDICTION AND DISPUTE RESOLUTION.** The owners of certain Mentor Graphics intellectual property licensed under this Agreement are located in Ireland and the U.S. To promote consistency around the world, disputes shall be resolved as follows: excluding conflict of laws rules, this Agreement shall be governed by and construed under the laws of the State of Oregon, U.S., if Customer is located in North or South America, and the laws of Ireland if Customer is located outside of North or South America or Japan, and the laws of Japan if Customer is located in Japan. All disputes arising out of or in relation to this Agreement shall be submitted to the exclusive jurisdiction of the courts of Portland, Oregon when the laws of Oregon apply, or Dublin, Ireland when the laws of Ireland apply, or the Tokyo District Court when the laws of Japan apply. Notwithstanding the foregoing, all disputes in Asia (excluding Japan) arising out of or in relation to this Agreement shall be resolved by arbitration in Singapore before a single arbitrator to be appointed by the chairman of the Singapore International Arbitration Centre ("SIAC") to be conducted in the English language, in accordance with the Arbitration Rules of the SIAC in effect at the time of the dispute, which rules are deemed to be incorporated by reference in this section. Nothing in this section shall restrict Mentor Graphics' right to bring an action (including for example a motion for injunctive relief) against Customer in the jurisdiction where Customer's place of business is located. The United Nations Convention on Contracts for the International Sale of Goods does not apply to this Agreement.

17. **SEVERABILITY.** If any provision of this Agreement is held by a court of competent jurisdiction to be void, invalid, unenforceable or illegal, such provision shall be severed from this Agreement and the remaining provisions will remain in full force and effect.

18. **MISCELLANEOUS.** This Agreement contains the parties' entire understanding relating to its subject matter and supersedes all prior or contemporaneous agreements. Any translation of this Agreement is provided to comply with local legal requirements only. In the event of a dispute between the English and any non-English versions, the English version of this Agreement shall govern to the extent not prohibited by local law in the applicable jurisdiction. This Agreement may only be modified in writing, signed by an authorized representative of each party. Waiver of terms or excuse of breach must be in writing and shall not constitute subsequent consent, waiver or excuse.

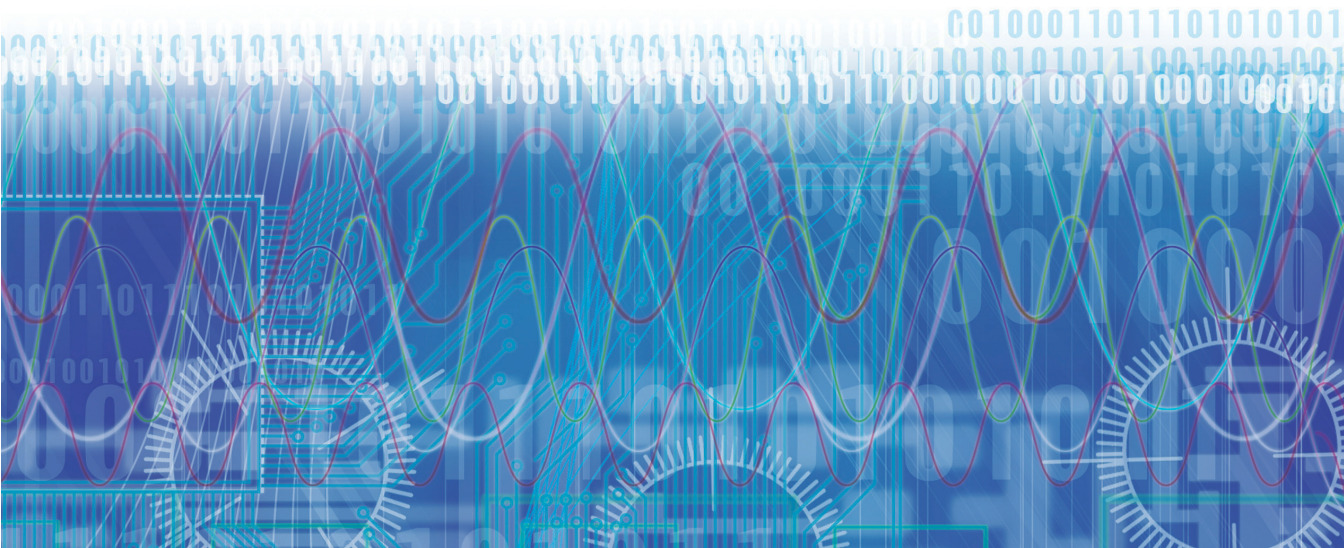
Rev. 151102, Part No. 265968

Corporate Headquarters
Mentor Graphics Corporation
8005 SW Boeckman Road
Wilsonville, Oregon 97070-7777
United States of America
503-685-7000

Sales and Product Information
800-547-3000 or 503-685-8000

North American Support Center
800-547-4303

For support locations outside of the US, please refer to the following website: http://www.mentor.com/supportnet/support-offices.html

SSPA star★award hall of fame

www.mentor.com/supportnet