



**Система моделирования
движения жидкости и газа**

FlowVision

Версия 2.5.4

Руководство пользователя

Оглавление

1 Введение	10
1.1 Краткое техническое описание FlowVision	11
1.2 Обзор FlowVision	12
1.2.1 Что такое вычислительная гидродинамика	12
1.2.2 Шаги пользователя при работе с FlowVision	13
1.2.3 Шаг 1. Задание области расчета	13
1.2.3.1 Что такое область расчета	13
1.2.3.2 Создание области расчета в FlowVision	14
1.2.4 Шаг 2. Выбор математической модели движения жидкости и газа	17
1.2.4.1 Что такое математическая модель движения жидкости и газа	17
1.2.4.2 Задание математической модели	17
1.2.4.3 Основные модели движения жидкости и газа, имеющиеся в FlowVision	19
1.2.4.3.1 Рассчитываемые переменные	19
1.2.4.3.2 Теплоперенос в твердой фазе	19
1.2.4.3.3 Ламинарное несжимаемое течение	20
1.2.4.3.4 Турбулентное несжимаемое течение	20
1.2.4.3.5 Турбулентное слабосжимаемое течение	21
1.2.4.3.6 Турбулентное сжимаемое течение	21
1.2.4.3.7 Двухфазное течение со свободными поверхностями	22
1.2.4.3.8 Течение с горением	22
1.2.5 Шаг 3. Задание граничных условий	22
1.2.5.1 Типы границ «стенка с и без вдува»	23
1.2.5.1.1 Тип границы Стенка	24
1.2.5.1.2 Тип границы Вход/Выход	25
1.2.5.1.3 Тип границы Свободный выход	26
1.2.5.1.4 Тип границы Симметрия	26
1.2.5.2 Специальные типы границ	26
1.2.5.2.1 Сопряженные границы	26
1.2.5.2.2 Периодические границы	28
1.2.5.2.3 Скользящая поверхность	29
1.2.5.3 Пример задания граничных условий	31
1.2.6 Шаг 4. Генерация расчетной сетки	32
1.2.6.1 Что такое адаптивная сетка с локальным измельчением	32
1.2.6.2 Что такое подсеточное разрешение геометрии	33
1.2.6.3 Задание расчетной сетки	33
1.2.7 Шаг 5. Задание параметров метода численного моделирования	35
1.2.7.1 Как решаются уравнения конвективно-диффузионного переноса	35
1.2.7.1.1 Аппроксимация уравнения конвективно-диффузионного переноса	35
1.2.7.1.2 Аппроксимация конвективного переноса	36
1.2.7.1.3 Аппроксимация конвективного переноса “скошенной” схемой	38
1.2.7.1.4 Явный и неявный методы расчета	38
1.2.8 Шаг 6. Просмотр результатов моделирования	39
1.2.9 Шаг последний. Оценка точности расчетов	41

1.3 Часто задаваемые вопросы	42
1.3.1 Можно ли работать с FlowVision без ключа защиты?.....	42
1.3.2 Что делать, если при загрузке геометрии выдается сообщение об ошибках?	42
1.3.3 Что делать в ситуации Т-образных поверхностей?.....	43
1.3.4 Как продолжить старый расчет с новой геометрией?.....	43
1.3.5 Как решать задачи взаимодействия ротор-статор?.....	43
1.3.6 Как решать задачи с подвижным телом?.....	44
1.3.7 Как правильно выбрать шаг по времени?.....	44
1.3.8 Как задать турбулизацию набегающего потока?.....	45
1.3.9 Как посмотреть одни и те же слои визуализации в разных вариантах?	45
1.3.10 Как определить коэффициент сопротивления тела при его обтекании жидкостью?.....	45
1.3.11 Каким образом можно установить, что рассчитываемый вариант сошелся?	45
1.3.12 Как загрузить GLO-файл в Excel?.....	45
1.3.13 Как сделать анимацию нестационарного процесса?.....	46
 2 Руководство пользователя	 47
2.1 Интерфейс пользователя FlowVision	47
2.1.1 Термины интерфейса FlowVision.....	47
2.1.2 Получение справки.....	48
2.1.3 Открытие варианта FlowVision.....	48
2.1.3.1 Открытие нового варианта FlowVision.....	48
2.1.3.2 Открытие существующего варианта FlowVision.....	49
2.1.3.3 Открытие существующего варианта из Проводника.....	49
2.1.4 Сохранение варианта FlowVision.....	49
2.1.5 Панели инструментов.....	51
2.1.5.1 Размещение панелей инструментов.....	52
2.1.5.2 Панель инструментов Геометрия.....	52
2.1.5.3 Панель инструментов Режимы.....	53
2.1.5.4 Панель инструментов Виды.....	54
2.1.5.5 Панель инструментов Расчет.....	54
2.1.5.6 Панель инструментов Захват.....	55
2.1.6 Рабочее окно препроцессора FlowVision.....	55
2.1.7 Контекстные меню.....	55
2.1.8 Способы выбора.....	56
2.1.8.1 Выбор в графическом окне.....	56
2.1.8.2 Выбор скрытых или совпадающих элементов.....	56
2.1.8.3 Выбор в дереве варианта.....	57
2.1.9 Редактирование параметров элементов дерева.....	57
2.1.10 Предустановки.....	58
2.1.10.1 Общие предустановки.....	58
2.1.10.2 Предустановки препроцессора и процесса расчета.....	59
2.1.10.3 Предустановки постпроцессора.....	60

2.2 Задание варианта FlowVision	61
2.2.1 Создание нового варианта.....	61
2.2.2 Изменение геометрии.....	64
2.2.3 Редактирование подобласти.....	65
2.2.3.1 Изменение математической модели подобласти.....	65
2.2.3.2 Задание параметров модели.....	66
2.2.3.2.1 Начальные значения.....	67
2.2.3.2.2 Опорные величины.....	67
2.2.3.2.3 Параметры модели.....	67
2.2.3.2.4 Физические свойства веществ.....	68
2.2.3.2.5 Параметры метода.....	68
2.2.3.3 Задание движения подобласти.....	70
2.2.3.4 Задание критериев адаптации сетки.....	71
2.2.3.5 Задание граничных условий.....	73
2.2.3.6 Расстановка граничных условий.....	75
2.2.3.7 Фильтры.....	77
2.2.3.7.1 Фильтр подвижного тела.....	80
2.2.3.7.2 Фильтр подвижного тела, связанный с ABAQUS.....	83
2.2.3.7.3 Фильтр изотропной силы сопротивления.....	83
2.2.3.7.4 Фильтр анизотропной силы сопротивления и источника тепловыделения.....	84
2.2.3.8 Супергруппы.....	86
2.2.3.8.1 Создание супергруппы.....	87
2.2.3.8.2 Установка граничных условий на супергруппе.....	87
2.2.3.8.3 Экспорт геометрического объекта.....	88
2.2.4 Вспомогательные инструменты FlowVision.....	89
2.2.4.1 Редактирование базы данных.....	89
2.2.4.1.1 Добавление вещества.....	90
2.2.4.1.2 Добавление параметра.....	91
2.2.4.1.3 Графическое отображение данных.....	92
2.2.4.1.4 Все параметры в библиотеке.....	94
2.2.4.2 Дополнительные инструменты для работы с геометрией.....	94
2.2.4.2.1 Преобразование геометрии.....	94
2.2.4.2.2 Перегруппировка геометрии.....	96
2.2.4.3 Пакетная обработка результатов.....	97
2.2.4.4 Справочный инструмент FPS Meter.....	98
2.2.5 Связывание граничных условий.....	98
2.2.6 Задание начальной сетки.....	101
2.2.7 Задание глобальных параметров.....	103
2.2.7.1 Исходные данные для начала процесса (Старт).....	104
2.2.7.2 Направление и размер вектора гравитации (Гравитация).....	104
2.2.7.3 Время расчета и сохранения варианта (Время).....	105
2.2.7.4 Параметры метода расчета и выбора шага по времени (Шаги).....	105
2.2.7.5 Опции процесса расчета (Настройка).....	106
2.2.7.6 Дополнительные параметры.....	107
2.3 Процесс расчета	109
2.3.1 Запуск расчета.....	109
2.3.2 Остановка расчета.....	111
2.3.3 Аварийная остановка расчета.....	111

2.4 Постпроцессор	112
2.4.1 Окна постпроцессора и его элементы управления	112
2.4.1.1 <i>Дерево постпроцессора в рабочем окне FlowVision</i>	113
2.4.1.2 <i>Графическое окно варианта</i>	113
2.4.1.3 <i>Окна Инфо</i>	114
2.4.2 Панели инструментов постпроцессора	114
2.4.3 Термины и организация постпроцессора	115
2.4.3.1 <i>Виды 3D сцены</i>	116
2.4.3.2 <i>Геометрические объекты</i>	117
2.4.3.3 <i>Расчетные переменные</i>	118
2.4.3.4 <i>Слои визуализации</i>	120
2.4.3.5 <i>Интерактивная настройка и интерактивная анимация</i>	121
2.4.3.5.1 <i>Интерактивная настройка</i>	121
2.4.3.5.2 <i>Интерактивная анимация</i>	121
2.4.3.6 <i>Сохранение и загрузка состояния постпроцессора</i>	122
2.4.4 3D сцена	122
2.4.4.1 <i>Состояние 3D сцены</i>	122
2.4.4.1.1 <i>Положение камеры в 3D пространстве</i>	123
2.4.4.1.2 <i>Источники света</i>	123
2.4.4.1.3 <i>Работа с видами</i>	124
2.4.4.2 <i>Остальные настройки</i>	125
2.4.4.2.1 <i>Вид проекции сцены на экран</i>	125
2.4.4.2.2 <i>Пропорциональность изображения</i>	126
2.4.4.2.3 <i>Настройки варианта</i>	126
2.4.5 Геометрические объекты	127
2.4.5.1 <i>Создание геометрического объекта из шаблона объекта</i>	127
2.4.5.2 <i>Контекстное меню геометрического объекта</i>	128
2.4.5.3 <i>Режим настройки параметров</i>	128
2.4.5.4 <i>Шаблоны объектов</i>	128
2.4.5.4.1 <i>Шаблон линии</i>	128
2.4.5.4.2 <i>Шаблон плоскости</i>	129
2.4.5.4.3 <i>Шаблон прямоугольного параллелепипеда</i>	130
2.4.5.4.4 <i>Шаблон конуса</i>	131
2.4.5.5 <i>Объект Все пространство</i>	132
2.4.5.6 <i>Объекты, полученные из супергрупп</i>	132
2.4.6 Слои визуализации	132
2.4.6.1 <i>Создание слоя</i>	133
2.4.6.2 <i>Общие черты слоев</i>	134
2.4.6.2.1 <i>Контекстное меню слоя</i>	134
2.4.6.2.2 <i>Режим настройки параметров</i>	135
2.4.6.2.3 <i>Создание файла с данными слоя</i>	135
2.4.6.3 <i>Специальные слои</i>	135
2.4.6.3.1 <i>Твердые тела</i>	136
2.4.6.3.2 <i>Система координат</i>	137
2.4.6.3.3 <i>Расчетная сетка</i>	138
2.4.6.3.4 <i>Отладка ячеек</i>	140
2.4.6.3.5 <i>Набор ячеек</i>	140
2.4.6.4 <i>Статические слои</i>	141
2.4.6.4.1 <i>Двумерный график</i>	142
2.4.6.4.2 <i>График вдоль кривой</i>	144
2.4.6.4.3 <i>График вдоль окружности</i>	146

2.4.6.4.4	Распределенные характеристики.....	147
2.4.6.4.5	Характеристики.....	149
2.4.6.4.6	Вектора.....	155
2.4.6.4.7	Изолинии.....	157
2.4.6.4.8	Заливка.....	158
2.4.6.4.9	Изоповерхность.....	161
2.4.6.5	Слои с анимацией.....	161
2.4.6.5.1	Вспышки.....	162
2.4.6.5.2	Группа частиц.....	163
2.4.6.5.3	Траектории.....	165
2.4.7	Дополнительные средства постпроцессора.....	166
2.4.7.1	Редактор палитры.....	166
2.4.7.2	Счетчик кадров.....	168
2.4.7.3	Отрисовка сценария.....	169
2.5	Сообщения об ошибках.....	171
2.5.1	Фатальные ошибки.....	171
2.5.2	Ошибки.....	173
2.5.3	Предупреждения.....	174
3	Теория	178
3.1	Основные обозначения.....	178
3.2	Свойства веществ.....	180
3.2.1	Чистые вещества.....	180
3.2.2	Смесь веществ.....	180
3.3	Модели FlowVision.....	182
3.3.1	Модели турбулентности.....	182
3.3.1.1	Обозначения.....	183
3.3.1.2	Стандартная KE модель.....	184
3.3.1.3	Нелинейная (квадратичная) KE модель.....	184
3.3.1.4	Низкорейнольдсовая KE модель AKN.....	185
3.3.1.5	Низкорейнольдсовая KE модель HL.....	186
3.3.1.6	Низкорейнольдсовая KE модель LS.....	186
3.3.1.7	Модель SST (Shear Stress Transport).....	187
3.3.1.8	Модель SA (Spalart-Allmaras).....	188
3.3.1.9	Расстояние до ближайшей стенки.....	189
3.3.1.10	Пульсации температуры.....	189
3.3.1.10.1	Простая модель.....	189
3.3.1.10.2	Модель 'K-teta - E-teta'.....	189
3.3.1.11	Пульсации концентрации.....	190
3.3.1.12	Пристенные функции.....	191
3.3.1.12.1	Скорость.....	191
3.3.1.12.2	Тепловой поток.....	192
3.3.1.12.3	Турбулентная энергия.....	192
3.3.1.12.4	Удельная турбулентная диссипация.....	192
3.3.1.12.5	Турбулентная диссипация.....	193
3.3.1.13	Учет шероховатости.....	193
3.3.1.13.1	Скорость.....	193
3.3.1.13.2	Тепловой поток.....	194
3.3.1.13.3	Удельная турбулентная диссипация.....	194

3.3.1.14	Влияние градиента давления.....	194
3.3.1.15	Параметры.....	195
3.3.1.16	Граничные условия.....	195
3.3.1.16.1	Модели KE.....	196
3.3.1.16.2	Модель SST.....	197
3.3.1.16.3	Модель SA.....	199
3.3.1.16.4	Пульсации.....	199
3.3.1.17	Начальные условия.....	200
3.3.1.18	Литература.....	200
3.3.2	Твердый материал.....	201
3.3.2.1	Обозначения.....	201
3.3.2.2	Уравнения.....	201
3.3.2.3	Параметры.....	201
3.3.2.4	Граничные условия.....	201
3.3.2.4.1	Тип Стенка.....	202
3.3.2.4.2	Тип Симметрия.....	203
3.3.2.4.3	Тип Периодическое.....	203
3.3.2.4.4	Тип Сопряженное.....	204
3.3.2.5	Начальные условия.....	204
3.3.3	Ламинарная жидкость.....	204
3.3.3.1	Обозначения.....	205
3.3.3.2	Уравнения.....	205
3.3.3.2.1	Модели массопереноса.....	205
3.3.3.3	Параметры.....	206
3.3.3.4	Граничные условия.....	208
3.3.3.4.1	Тип Стенка.....	209
3.3.3.4.2	Тип Симметрия.....	210
3.3.3.4.3	Тип Вход/Выход.....	210
3.3.3.4.4	Тип Свободный выход.....	212
3.3.3.4.5	Тип Периодическое.....	213
3.3.3.4.6	Тип Сопряженное.....	214
3.3.3.4.7	Тип Скользящая поверхность.....	214
3.3.3.5	Начальные условия.....	214
3.3.4	Несжимаемая жидкость.....	214
3.3.4.1	Обозначения.....	214
3.3.4.2	Уравнения.....	215
3.3.4.2.1	Модели массопереноса.....	215
3.3.4.3	Параметры.....	215
3.3.4.4	Граничные условия.....	216
3.3.4.4.1	Тип Стенка.....	216
3.3.4.5	Начальные условия.....	217
3.3.5	Слабосжимаемая жидкость.....	217
3.3.5.1	Обозначения.....	218
3.3.5.2	Уравнения.....	218
3.3.5.2.1	Модели массопереноса.....	218
3.3.5.2.2	Модель расчета средних квадратов пульсаций.....	219
3.3.5.3	Параметры.....	219
3.3.5.4	Граничные условия.....	219
3.3.5.4.1	Тип Вход/выход.....	219
3.3.5.5	Начальные условия.....	220
3.3.6	Пористая среда.....	220
3.3.6.1	Обозначения.....	220

3.3.6.2 Уравнения.....	221
3.3.6.2.1 Модели массопереноса.....	221
3.3.6.3 Параметры.....	221
3.3.6.4 Граничные условия.....	222
3.3.6.4.1 Тип Скользящая поверхность.....	222
3.3.6.5 Начальные условия.....	222
3.3.7 Полностью сжимаемая среда.....	222
3.3.7.1 Обозначения.....	222
3.3.7.2 Уравнения.....	223
3.3.7.2.1 Модели массопереноса.....	223
3.3.7.2.2 Модель расчета средних квадратов пульсаций.....	223
3.3.7.3 Параметры.....	223
3.3.7.4 Граничные условия.....	223
3.3.7.4.1 Тип Вход/выход.....	224
3.3.7.4.2 Тип Свободный выход.....	225
3.3.7.4.3 Тип Риман.....	225
3.3.7.4.4 Тип Симметрия физ.....	227
3.3.7.5 Начальные условия.....	227
3.3.8 Модель двухфазного течения жидкости.....	228
3.3.8.1 Обозначения.....	228
3.3.8.2 Уравнения.....	228
3.3.8.2.1 Модели массопереноса.....	229
3.3.8.2.2 Модель расчета средних квадратов пульсаций.....	229
3.3.8.3 Параметры.....	229
3.3.8.4 Граничные условия.....	229
3.3.8.5 Начальные условия.....	229
3.3.9 Модель горения.....	229
3.3.9.1 Базовые понятия.....	229
3.3.9.2 Уравнения.....	230
3.3.9.3 Скорость брутто-реакции.....	231
3.3.9.3.1 Модель горения Зельдовича.....	231
3.3.9.3.2 Кинетическая модель горения.....	231
3.3.9.3.3 Турбулентная модель горения.....	232
3.3.9.3.4 Пульсационная модель горения.....	232
3.3.9.4 Инициализация процесса горения.....	232
3.3.9.5 Установка свойств реагентов.....	232
3.3.9.6 Образование оксидов азота NO.....	233
3.3.9.7 Параметры.....	233
3.3.9.8 Граничные условия.....	234
3.3.9.9 Начальные условия.....	235
3.3.10 Модель 2-фазного горения.....	235
3.3.10.1 Обозначения.....	235
3.3.10.1.1 Состав топлива.....	235
3.3.10.1.2 Состав летучих.....	236
3.3.10.1.3 Состав золы.....	236
3.3.10.1.4 Газовые компоненты.....	236
3.3.10.1.5 Другие обозначения.....	236
3.3.10.2 Топливо.....	239
3.3.10.2.1 Жидкое топливо.....	239
3.3.10.2.2 Твёрдое топливо.....	239
3.3.10.2.3 Теплота сгорания топлива.....	240
3.3.10.3 Дисперсная фаза.....	240

3.3.10.4 Газовая фаза.....	241
3.3.10.5 Взаимодействие между фазами.....	241
3.3.10.6 Модели пиролиза и горения кокса.....	241
3.3.10.6.1 Кинетическая модель горения.....	242
3.3.10.6.2 Эмпирическая модель.....	242
3.3.10.7 Теплообмен частицы с газом.....	244
3.3.10.8 Модели горения летучих.....	244
3.3.10.8.1 Модель горения Зельдовича (модель "что смешалось, то сгорело").....	244
3.3.10.8.2 Кинетическая модель горения.....	244
3.3.10.8.3 Модель Магнуссена.....	245
3.3.10.8.4 Пульсационная модель горения.....	245
3.3.10.8.5 Модель Сполдинга.....	245
3.3.10.8.6 Обобщенная модель Магнуссена.....	245
3.3.10.9 Инициализация 2-фазного горения.....	245
3.3.10.10 Установка свойств реагентов.....	246
3.3.10.11 Параметры.....	246
3.3.10.12 Граничные условия.....	248
3.3.10.13 Начальные условия.....	248
3.3.11 Модели излучения.....	248
3.3.11.1 Модель ПП излучения.....	248
3.3.11.1.1 Обозначения.....	249
3.3.11.1.2 Уравнения.....	249
3.3.11.1.3 Граничные условия.....	250
3.3.11.1.4 Начальные условия.....	250
3.3.11.2 Модели излучения в объеме.....	250
3.3.11.2.1 Обозначения.....	251
3.3.11.2.2 Уравнения.....	251
3.3.11.2.2.1 Диффузионная модель (модель P1).....	252
3.3.11.2.2.2 Модель осреднённой лучистой энергии.....	252
3.3.11.2.2.3 Модель объёмного высвечивания.....	253
3.3.11.2.3 Параметры.....	253
3.3.11.2.4 Граничные условия.....	253
3.3.11.2.5 Начальные условия.....	254
3.3.12 Частицы.....	254
3.3.12.1 Обозначения.....	254
3.3.12.2 Уравнения.....	256
3.3.12.2.1 Уравнения для несущей фазы.....	256
3.3.12.2.2 Динамика частицы.....	256
3.3.12.2.3 Испарение и нагревание частицы.....	258
3.3.12.2.4 Взаимодействие капли со стенкой.....	259
3.3.12.2.5 Пленки.....	260
3.3.12.2.6 Взаимодействие между фазами.....	260
3.3.12.3 Параметры.....	261
3.3.12.4 Граничные условия.....	262
3.3.12.4.1 Тип Стенка.....	263
3.3.12.4.2 Тип Вход/выход.....	264
3.3.12.4.3 Тип Свободный выход.....	264
3.3.12.4.4 Тип Сопряженное.....	264
3.3.12.4.5 Тип Симметрия.....	264
3.3.12.4.6 Тип Периодическое.....	265
3.3.12.4.7 Тип Скользящая поверхность.....	265
3.3.12.5 Начальные условия.....	265

3.3.12.6 Фильтр "Начальное распределение частиц".....	265
3.3.12.7 Фильтр "Остановка горения".....	266
3.3.12.8 Дополнительные средства представления результатов.....	266
3.3.13 Модель зазора.....	266
3.3.13.1 Уравнения.....	267
3.3.13.2 Параметры.....	268
3.3.13.3 Граничные условия.....	268
3.3.13.4 Начальные условия.....	269
3.4 Метод расчета.....	270
3.4.1 Адаптивная сетка с локальным измельчением.....	270
3.4.2 Метод подсеточного разрешения геометрии.....	270
3.4.3 Моделирование одномерного переноса.....	272
3.4.4 Моделирование трехмерного переноса.....	274
3.4.5 Неявный алгоритм расщепления по физическим переменным.....	274
3.4.6 Общий вид уравнений.....	275
3.4.7 Разностная схема.....	275
3.4.7.1 Совместное решение.....	276
3.4.7.2 Предиктор-Корректор.....	276
3.4.8 Методы решения системы алгебраических уравнений.....	276
3.4.8.1 Условие устойчивости алгоритма.....	277
3.4.8.2 Выбор шага интегрирования по времени.....	277
3.5 Список переменных.....	278
3.5.1 Скалярные переменные.....	278
3.5.2 Векторные переменные.....	279

1 Введение

Программный комплекс **FlowVision** предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации этих течений методами компьютерной графики.

Моделируемые течения включают в себя стационарные и нестационарные, сжимаемые, слабосжимаемые и несжимаемые потоки жидкости и газа. Использование различных моделей турбулентности и адаптивной расчетной сетки позволяет моделировать сложные движения жидкости, включая течения с сильной закруткой, горением, течения со свободной поверхностью.

FlowVision основан на конечно-объемном методе решения уравнений гидродинамики и использует прямоугольную адаптивную сетку с локальным измельчением. Для аппроксимации криволинейной геометрии с повышенной точностью **FlowVision** использует технологию подсеточного разрешения геометрии. Эта технология позволяет импортировать геометрию из систем САПР и обмениваться информацией с системами конечно-элементного анализа. Использование этой технологии позволило решить проблему автоматической генерации сетки – чтобы сгенерировать сетку, достаточно задать всего лишь несколько параметров, после чего сетка автоматически генерируется для расчетной области, имеющей геометрию любой степени сложности.

Чтобы начать работать с программным комплексом **FlowVision**, Вам необходимо иметь на своем персональном компьютере операционную систему **Windows ME/2000/XP** и систему автоматизации проектирования (САПР), в которой Вы будете задавать геометрию расчетной области. Рекомендуемые системы: **SolidWorks, T-Flex, Unigraphics, Autocad Mechanical Desktop, ProEngineer, Catia**. О других системах Вы можете узнать в группе технической поддержки ТЕСИС.

1.1 Краткое техническое описание FlowVision

Ниже приведено краткое описание технических характеристик программного комплекса **FlowVision**.

Интерфейс пользователя:

MS-Windows.

Препроцессор:

- Импорт геометрии, созданной в различных системах автоматизированного проектирования и сохраненной в форматах **VRML**, **STL**, **DEFORM**, **ABAQUS**, **ANSYS** или **NASTRAN** (**VDAFS**, **IGES**, **PARASOLID** через модуль **Flow3DVision**).
- Интерактивное задание граничных условий на поверхностях.

Расчетная сетка:

- Автоматическая генерация сетки.
- Прямоугольная сетка с подсеточным разрешением геометрии.
- Локальное измельчение сетки.
- Адаптация сетки вдоль границы расчетной области и по решению.

Возможности моделирования:

- 3D стационарные/нестационарные сжимаемые/слабосжимаемые/несжимаемые потоки жидкости.
- Ламинарные или турбулентные потоки.
- Модели турбулентности:
 - $k-\varepsilon$ – подобные модели,
 - $k-\omega$ – подобная SST модель,
 - модель Spalart-Allmaras.
- Перенос скалярных величин и их флуктуаций.
- Свободные поверхности.
- Горение предварительно перемешанных/неперемешанных газовых смесей.
- Сопряженный тепло- массоперенос.
- Граничные условия на стенке:
 - Проскальзывание/Прилипание.
 - Степенной и логарифмической законы для турбулентных течений.
 - Адиабатические/ изотермические/ тепловой поток/ теплообмен/ сопряженный теплообмен.
- Граничные условия, зависящие от времени.
- Периодические и сопряженные граничные условия.
- Скользящая сетка.

Метод решения:

- Конечно-объемный метод.
- Явный и неявный методы.
- Неявный алгоритм расщепления для решения уравнения Навье-Стокса.
- Схема расчета уравнений переноса повышенной точности.
- Решение систем линейных алгебраических уравнений методами:
 - сопряженного градиента с использованием неполного разложения Холесского.
 - модифицированный метод поточечной верхней релаксации.

Постпроцессор:

- Векторы на плоскости или поверхности.
- Изолинии или тоновая заливка на плоскости или поверхности.
- Отрезающие или полупрозрачные поверхности.
- Анимация движения маркеров.
- Интегрирование параметров течения жидкости по сечению и по поверхности.
- Локальные характеристики.

Графика:

Основана на **OpenGL**.

Платформа:

Intel/AMD

WindowsME/2000/XP.

1.2 Обзор FlowVision

В этой главе рассматриваются некоторые основные понятия вычислительной гидродинамики.

В ней приводится краткое описание последовательности действий при задании вариант в программе **FlowVision**:

1. [Задание области расчета.](#)
2. [Выбор математической модели течения.](#)
3. [Задание граничных условий.](#)
4. [Генерация расчетной сетки.](#)
5. [Задание параметров метода численного моделирования.](#)
6. [Просмотр результатов расчета.](#)
7. [Оценка точности расчетов.](#)

1.2.1 Что такое вычислительная гидродинамика

Вычислительная гидродинамика (ВГД) – это раздел науки, решающий проблему моделирования тепломассопереноса в различных технических и природных объектах. Основной задачей ВГД является численное решение **уравнений Навье-Стокса**, описывающих динамику жидкости. Дополнительно учитываются различные физико-химические эффекты: **горение, турбулентность** или **потoki сквозь пористую среду**. Эти уравнения составляют математическую модель тепломассопереноса (см. том [Теория](#)).

ВГД как прикладная наука сформировалась в середине 20 века. Основным потребителем ее результатов была аэрокосмическая промышленность.

С развитием высокопроизводительных компьютеров, которые стали доступны по цене большому числу пользователей, в 70-х годах началось бурное развитие коммерческих программ вычислительной гидродинамики. В 80-х и начале 90-х годов эти программы устанавливаются на компьютеры класса "рабочие станции". В конце 90-х годов дешевые персональные компьютеры догнали по мощности рабочие станции, а основная операционная система, которая устанавливается на них – **MS Windows** – стала превосходить по уровню пользовательского интерфейса графические оболочки операционных систем рабочих станций. В это время появились программы в области ВГД, предназначенные для персональных компьютеров.

Вычислительная гидродинамика первоначально развивалась для решения задач аэрокосмической промышленности – расчет камер сгорания ракетных двигателей, расчет физико-химических процессов при обтекании головных частей боеголовки и обтекания сверхзвуковых самолетов. В настоящее время область применения ВГД значительно расширена гражданскими приложениями. Приведем ниже краткий список задач, решаемых методами ВГД с использованием коммерческих программ.

- **Автомобильная промышленность:**
 - определение коэффициентов сопротивления корпуса автомобиля набегающему воздушному потоку;
 - вентиляция подкапотного пространства и салона;
 - моделирование горения топлива в камере сгорания;
- **Аэрокосмическая промышленность:**
 - моделирование обтекания самолетов и ракет;
 - вентиляция и пожаробезопасность салонов самолетов;
 - моделирование физико-химических процессов в турбореактивных двигателях и в камерах сгорания ракет;
- **Технологические процессы производства материалов:**
 - моделирование литья металлов и пластмасс в форму;
 - моделирование физико-химических процессов в химических и биологических реакторах;
- **Строительство:**
 - расчет ветровых нагрузок на здания и сооружения;
 - вентиляция и пожаробезопасность зданий;
 - определение сопротивлений воздухопроводов и водо-раздаточных устройств;
- **Энергетика:**
 - расчет горелок для сжигания топлива в котлах Т \dot{U} Ц;
 - расчет выбросов оксидов азота котлами Т \dot{U} Ц;
 - определение сопротивлений газоходов;
- **Экология и чрезвычайные ситуации:**

- моделирования распространения загрязнений в водо-воздушных бассейнах;
- моделирование распространения пожаров в лесах и городах.

1.2.2 Шаги пользователя при работе с FlowVision

Процесс расчета течения жидкости включает в себя следующие шаги, выполняемые пользователем:

- Создание области расчета ("геометрии" устройства) в САПР и импорт ее через форматы **VRML, STL, DEFORM, ABAQUS, ANSYS** или **NASTRAN** в FlowVision (**IGES, PARASOLID, VDAFS** с помощью **Flow3DVision**).
- Задание математической модели.
- Задание граничных условий.
- Задание исходной расчетной сетки и критериев её адаптации по решению и по граничным условиям.
- Задание параметров методов расчета.
- Проведение расчета (без участия пользователя).
- Просмотр результатов расчета в графической форме ("визуализация" результатов расчетов) и сохранение данных в файлы.
- Оценка точности расчетов методом сходимости по сетке.

1.2.3 Шаг 1. Задание области расчета

На первом шаге создается и загружается расчетная область.

1.2.3.1 Что такое область расчета

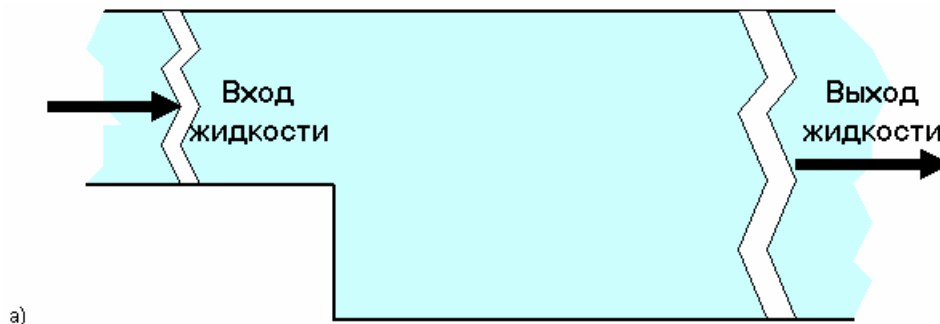
Под областью расчета понимается объем, в котором определены уравнения математической модели, и граница объема, на которой определены граничные условия. Следует отличать область расчета от физического объема, где определена (поставлена) задача обтекания. Например, если вы исследуете экспериментально обтекание цилиндра потоком воздуха, то физическим объемом будет вся лаборатория с экспериментальной установкой. Расчетную область логично ограничить относительно небольшой областью вокруг цилиндра по сравнению с лабораторией, однако достаточно большой, чтобы границы не влияли на результаты расчетов.

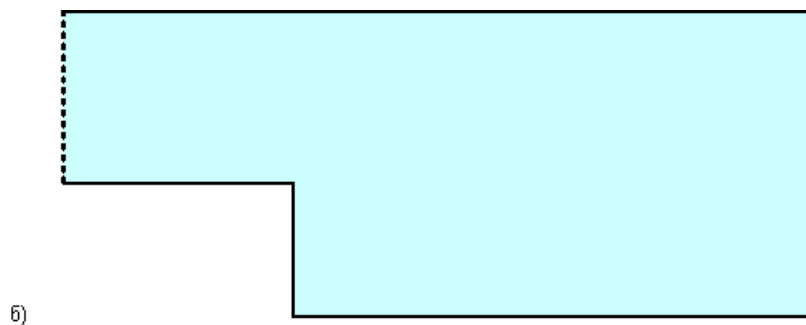
Задачи моделирования движения жидкости подразделяются на задачи внешнего обтекания и внутренних течений. Моделирование обтекания самолетов, автомобилей и кораблей относится к задачам внешнего обтекания, которое, применительно к воздушному обтеканию, называется аэродинамикой. В этом случае задача обтекания обычно поставлена для безграничной среды.

Внутренние течения – это течения, ограниченные твердыми границами. Моделирование течений внутри газопроводов, водозапорных устройств, котлов, камер сгорания относится к задачам расчетов внутренних течений. В этом случае физический объем ограничен и совпадает с границами моделируемого устройства.

По сути численных методов, область расчета не может быть безграничной, поэтому для задач внешнего обтекания физический объем никогда не совпадает с расчетной областью. Чтобы обеспечить моделирование неограниченного объема, на границах расчетной области, удаленных от рассматриваемого объекта, ставят соответствующие граничные условия.

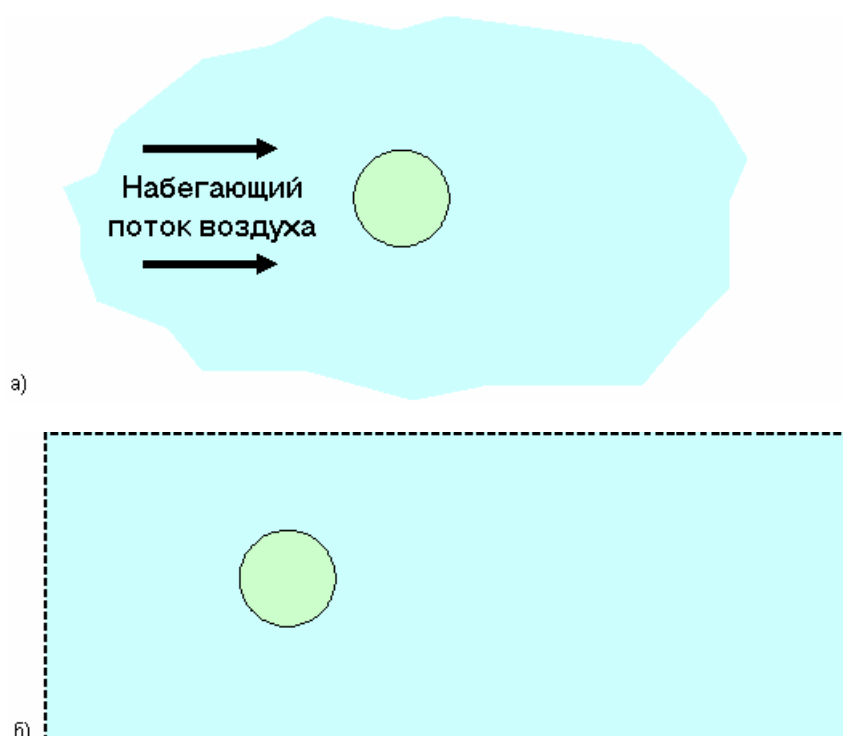
Приведем простейшие примеры задач внутреннего и внешнего обтекания. На рисунке приведена задача течения жидкости в канале с внезапным расширением (так называемая задача обтекания обратного уступа). Жидкость подается в и отбирается из канала бесконечной длины. Расчетная область показана на том же рисунке. Пунктирная линия соответствует входной и выходной границе области расчета.





Пример внутреннего течения – течение в канале с внезапным расширением:
а) физическая постановка задачи, б) область расчета.

На следующем рисунке приведена задача внешнего обтекания – течение воздуха вокруг цилиндра. Цилиндр находится в безграничной среде. Расчетная область показана на том же рисунке. Пунктирная линия соответствует внешней границе области расчета. Выбор расстояния от внешней границы расчетной области до цилиндра и граничных условий на ней обусловлен необходимостью исключения влияния этой границы на течение в окрестности цилиндра.

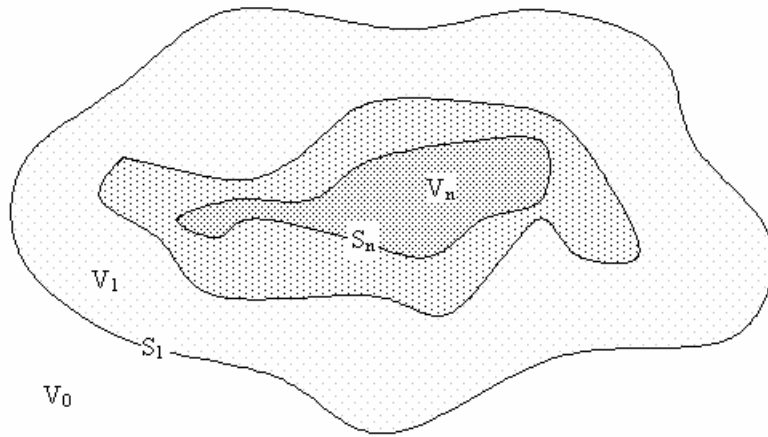


Пример внешнего обтекания – течение воздуха вокруг цилиндра:
а) физическая постановка задачи, б) область расчета.

1.2.3.2 Создание области расчета в FlowVision

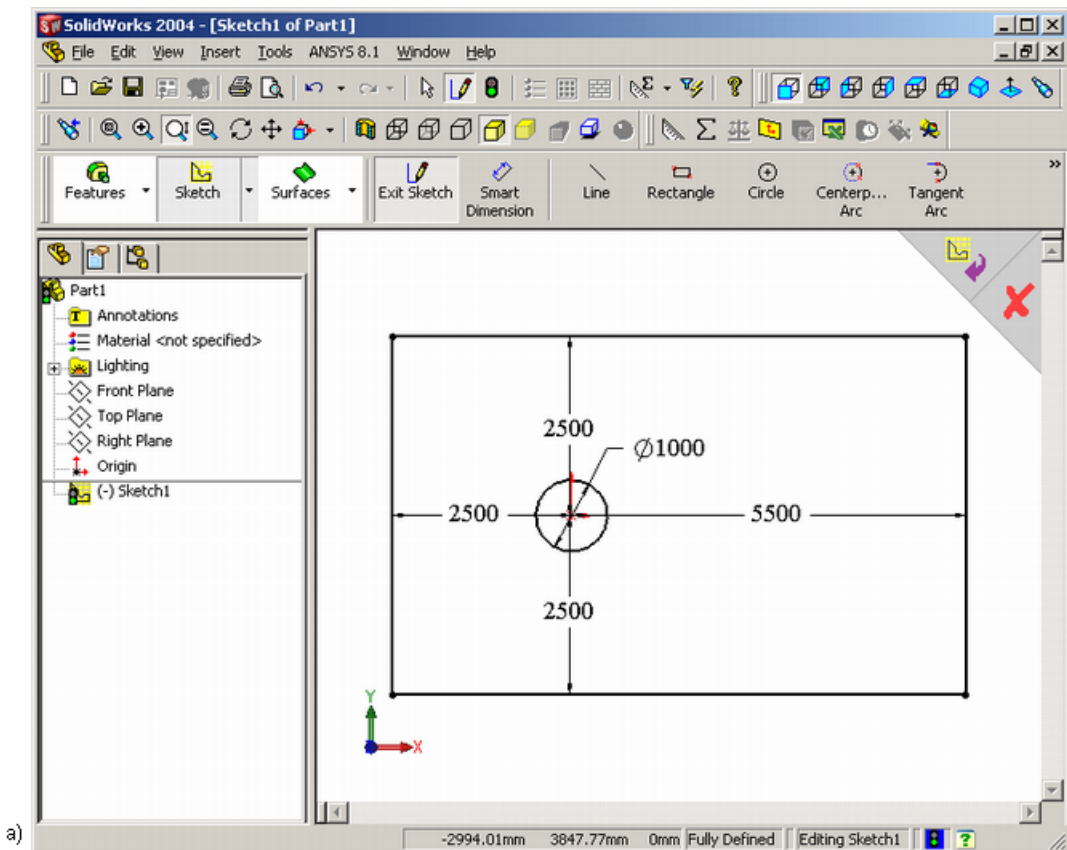
Область расчета создается вне программного комплекса **FlowVision** в системах САПР. Рекомендуемые САПР перечислены во [введении](#).

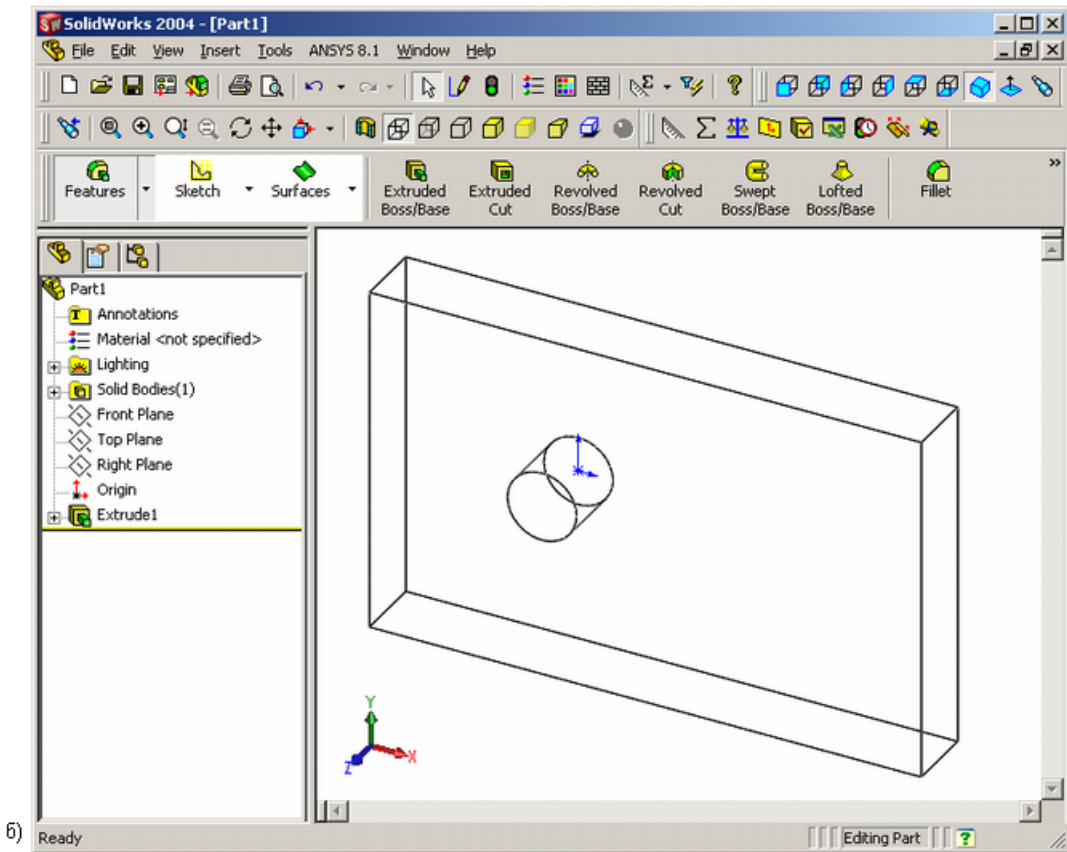
Поверхности расчетной области которые импортируются во **FlowVision** должны представлять собой совокупность плоских многоугольников – фасеток. Многоугольники объединены в замкнутые поверхности, которые вложены друг в друга и не пересекаются.



N поверхностей делят пространство на $N+1$ объем.

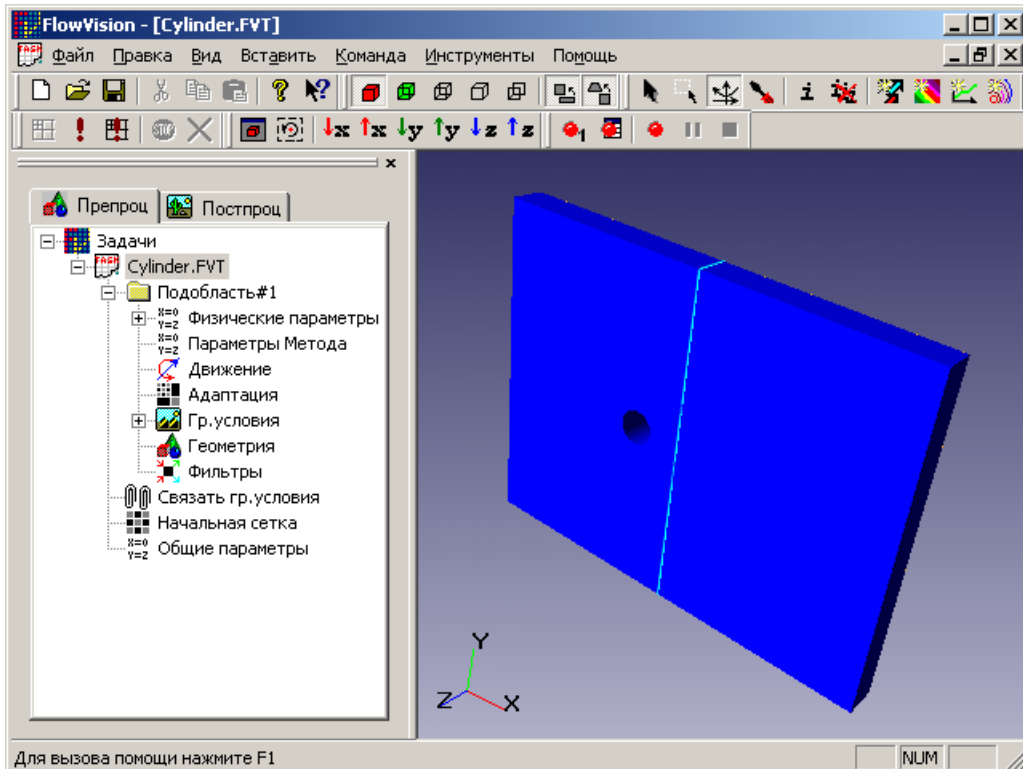
Пусть N – число вложенных друг в друга поверхностей S_1, S_2, \dots, S_n . Они делят трехмерное пространство на N объемов V_1, V_2, \dots, V_n , имеющих границу, совпадающую со сторонами поверхностей. Еще один объем V_0 является внешним, ему принадлежит сторона только одной поверхности S_1 . Любой из внутренних объемов V_i может быть определен как расчетная область. Внешнему объему V_0 не может быть поставлена в соответствие математическая модель и он автоматически исключается из рассмотрения. При импорте геометрии в **FlowVision**, система автоматически создает эти объемы, которые по умолчанию называются **Подобласть#1**, **Подобласть#2** и т.д. Отметим, что номера в имени объемов не соответствуют их вложенности в друг друга. Чтобы различить объемы и найти среди них нужный, нажмите правую кнопку мыши над нужной **Подобластью** в дереве варианта. Граница выбранной подобласти будет показана в графическом окне варианта цветом. Все остальные подобласти станут невидимыми.. Рассмотрим задание расчетной области на примере задачи обтекания цилиндра, заданная в САПР **SolidWorks**. Поскольку **FlowVision** предназначен для расчета только трехмерных течений, то для этой двумерной задачи необходимо задать трехмерную область. На рисунке показан чертеж расчетной области и трехмерная расчетная область, полученная из двумерного чертежа вытягиванием (экструзией) перпендикулярно плоскости чертежа.





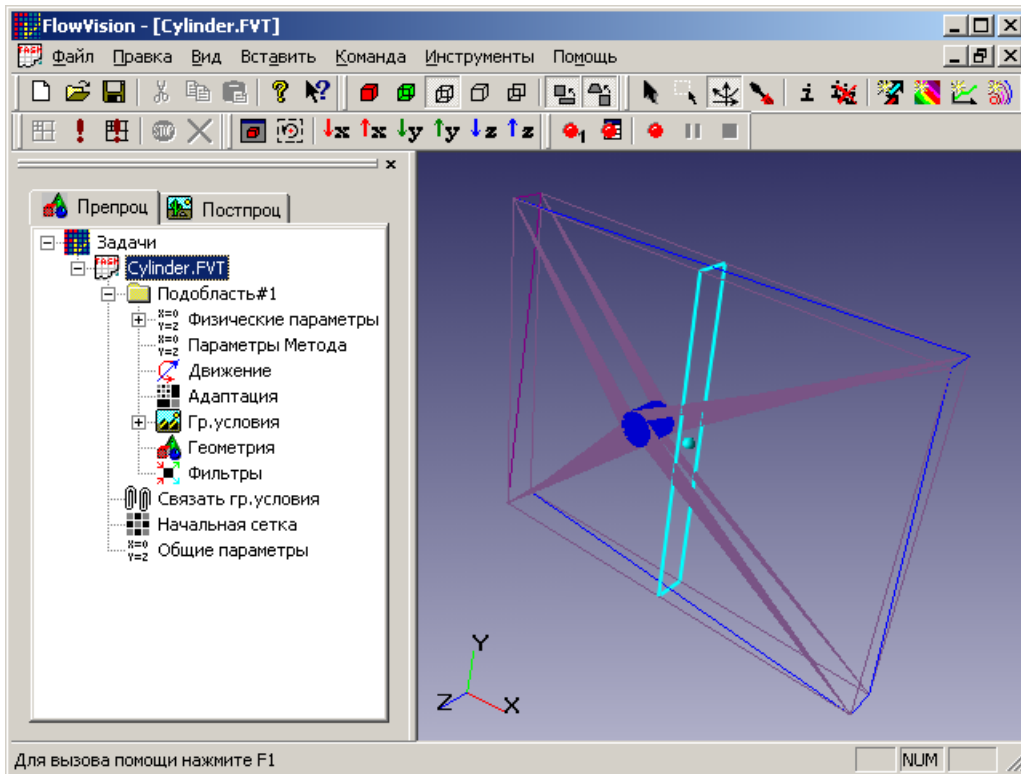
Геометрия расчетной области для задачи обтекания цилиндра, созданная в САПР **SolidWorks**:
а) чертеж расчетной области, б) трехмерная модель.

После задания геометрии расчетной области в САПР, геометрия сохраняется в форматах **VRML** или **STL**. Загрузка геометрии в **FlowVision** осуществляется через меню **Файл Создать**, где в окне диалога выбирается файл с геометрией (более подробно см. том [Руководство пользователя](#)). На рисунке показана расчетная область для задачи обтекания цилиндра, импортированная в **FlowVision**.



Расчетная область для задачи обтекания цилиндра, импортированная в **FlowVision**.

Фасетки поверхности области расчета показаны на следующем рисунке.



Фасеточное представление геометрии расчетной области.

Импортированная геометрия в данном случае имеет одну поверхность (отметим, что любая двумерная геометрия должна описываться одной замкнутой трехмерной поверхностью). Эта поверхность образует один внутренний объем **Подобласть#1**, который показан в окне рабочего пространства.

1.2.4 Шаг 2. Выбор математической модели движения жидкости и газа

На втором шаге выбирается модель течения и решаемые уравнения в каждой расчетной подобласти.

1.2.4.1 Что такое математическая модель движения жидкости и газа

Целью моделирования движения жидкости и газа в расчетной области является получение распределений скорости, давления и других физических параметров жидкости (газа). Чтобы рассчитать эти параметры, необходимо задать физические законы их изменения, совокупность которых для данной задачи называется математической моделью.

Математическая модель движения жидкости или газа – это система уравнений в частных производных, определяющих законы сохранения (энергии, массы, импульса) и уравнений состояния жидкости (газа). Математической моделью может быть модифицирована через интерфейс **FlowVision** – путем отключения части уравнений модели (а вместе с ними и рассчитываемых переменных) и через изменение констант модели (см. [задание модели](#)).

В версии **FlowVision** имеются следующие математические модели (более подробное описание моделей Вы найдете в томе [Теория](#)).

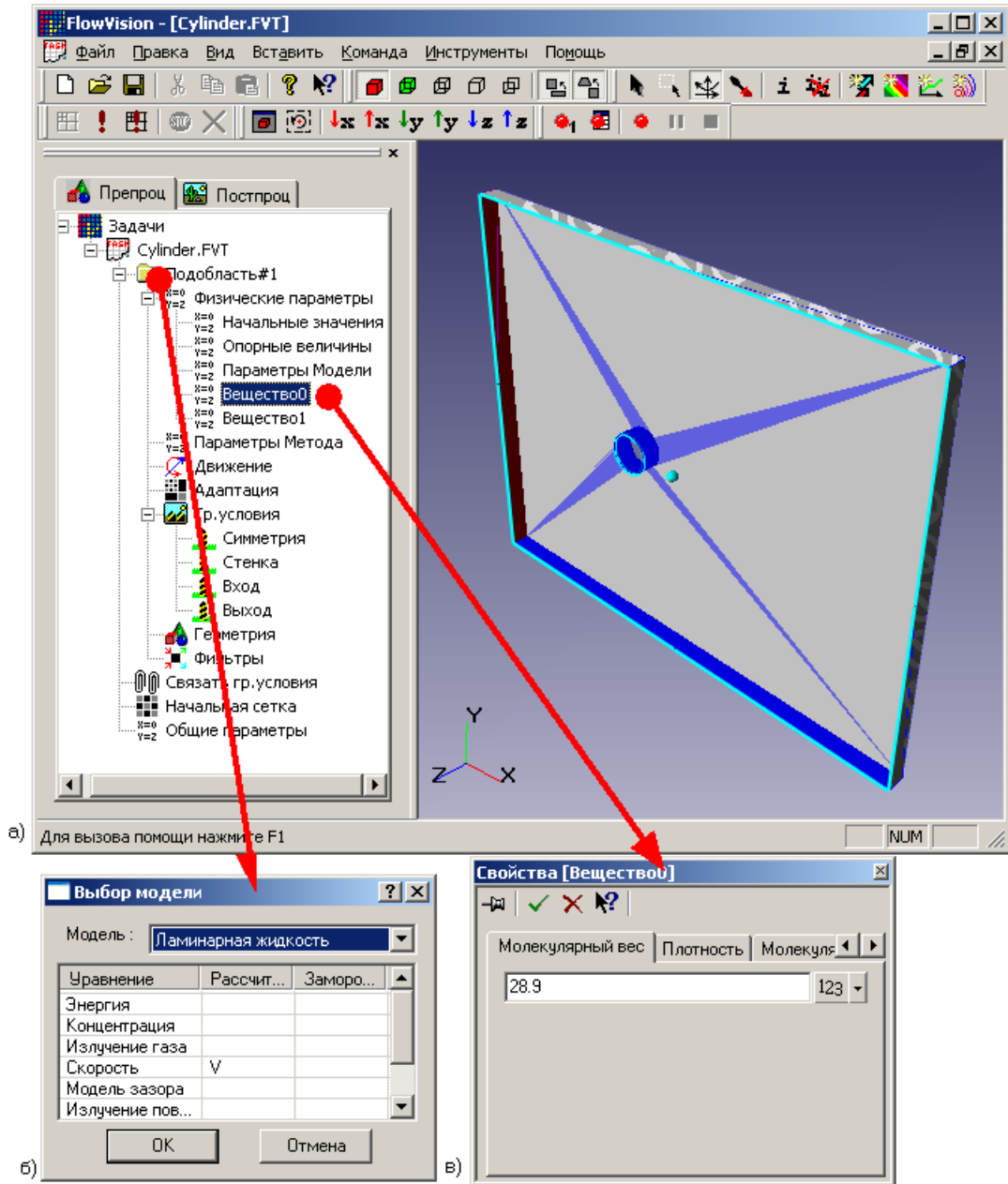
1.2.4.2 Задание математической модели

Математическая модель задается после импортирования геометрии расчетной области в **FlowVision**. Мышью в дереве препроцессора (см. том [Руководство пользователя](#)) выбирается необходимый объем **Подобласть#i**. Затем с помощью нажатия правой клавиши мыши открывается окно **Изменить модель...**, в котором выбирается модель из предложенного списка. В этом же окне выбираются параметры, которые будут определяться в процессе расчета.

На рисунке показан пример задания математической модели для задачи обтекания цилиндра ламинарным потоком. Математическая модель выбирается из списка **Модель** в диалоговом окне. После выбора модели в таблице в этом окне показывается список уравнений (или систем уравнений), которые составляют эту модель. В колонке **Уравнение** показаны имена этих уравнений. В колонке **Рассчитывать** отмечаются уравнения, по которым будет проводиться данный вариант расчета (если галочки нет, то уравнение и переменная исключаются из расчетов).

Назначение колонки **Заморозить** см. том [Руководство пользователя](#).

В примере, показанном на рисунке, отмечены уравнения **Скорость**. Это имя обозначает совокупность уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности. Более подробно о именах уравнений (систем уравнений) и расчетных переменных, см. раздел [Основные модели движения жидкости и газа](#). Таким образом, в данном примере будут рассчитаны скорости жидкости и давление.



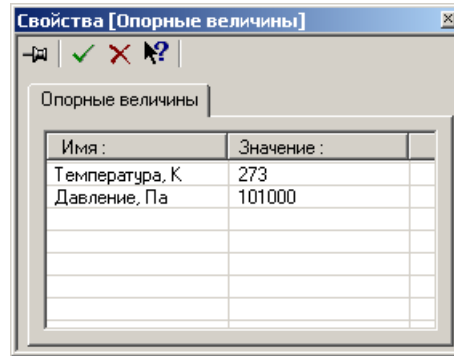
Задание модели ламинарного течения с расчетом только скоростей и давления для задачи обтекания цилиндра:

- а) выбор нужного объема; б) окно выбора математической модели
- в) одно из окон параметров математической модели

(стрелками показаны пункты дерева препроцессора, к которым привязаны окна б) и в)).

Чтобы изменить свойства параметров математической модели, таких, как вязкость, плотность жидкости, коэффициенты зависимости плотности от концентрации и температуры, необходимо раскрыть папку **Подобласть #1**, затем раскрыть папку **Физические параметры** и вызвать свойства нужного пункта, например, **Параметры Модели** – окно, показанное на рисунке выше.

Некоторые переменные представлены относительными значениями, абсолютные значения которых вычисляются по формуле $f_a = f + f_{ref}$ где f_a – абсолютное значение переменной, f – рассчитываемое относительное значение переменной, f_{ref} – опорная величина. Опорные величины задаются в пункте **Опорные величины** папки физических параметров. Следует иметь в виду, что [граничные условия](#) также задаются в относительных переменных f .



Цели введения опорных величин просты. Во-первых, чтобы задавать граничные условия и получать значения переменных в области в привычных величинах. Например, для температуры можно использовать привычную шкалу Цельсия а не Кельвина, а для давления воздуха использовать значения избыточного давления. Во-вторых, введение относительных значений позволяет решить проблему потери точности при вычислении переменных, слабо меняющихся на фоне большого среднего уровня. Отметим, что для того, чтобы лучше увидеть внутренний объем, прикрытый внешней поверхностью, применяется рассечение изображения области расчета в графическом окне. Подробнее о рассекающей плоскости см. том [Руководство пользователя](#).

1.2.4.3 Основные модели движения жидкости и газа, имеющиеся в FlowVision

[Тепломассоперенос в твердой фазе](#)

[Ламинарное несжимаемое течение](#)

[Турбулентное несжимаемое течение](#)

[Турбулентное слабосжимаемое течение](#)

[Турбулентное сжимаемое течение](#)

[Двухфазное течение со свободной поверхностью](#)

[Течение с горением](#)

1.2.4.3.1 Рассчитываемые переменные

Рассчитываемыми переменными математической модели являются векторные и скалярные поля, разделяемые на независимые и зависимые переменные. Независимые переменные определяются из решения систем уравнений с совокупностью начальных и граничных условий, а зависимые выражаются через них. Например, скорость \mathbf{V} – независимая векторная переменная, определяемая из решения уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности, а модуль скорости $||\mathbf{V}||$ – скалярная зависимая переменная.

В таблице показано соответствие имен уравнений (системы уравнений) и входящих в них зависимых и независимых переменных математической модели.

Имя уравнения (системы уравнений)	Независимая переменная	Обозначение	Зависимая переменная	Обозначение
Скорость	Скорость	\mathbf{V}	Модуль скорости	$ \mathbf{V} $
	Давление	P		
Энергия	Температура	T		
Концентрация	Концентрация	C		
Турбулентность	Турбулентная энергия	k	Турбулентная вязкость	
	Турбулентная диссипация	ε		
Отн. объем жидкости в ячейке	Объем жидкости в ячейке	VOF		

1.2.4.3.2 Тепломассоперенос в твердой фазе

Модель тепломассопереноса в твердом теле включает в себя следующие уравнения:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Закон сохранения энергии	Энергия
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	Концентрация

[Примеры применения:](#)

- моделирование теплопереноса в микросхемных схемах,
- моделирование теплопереноса в стенах зданий и сооружений.

Подробное описание этой модели см. в томе [Теория](#).

1.2.4.3.3 Ламинарное несжимаемое течение

Модель ламинарного теплопереноса в жидкости включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	Скорость
Закон сохранения энергии	Энергия
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	Концентрация

Эта модель медленного течения при малых изменениях плотности (приближение Буссинеска), малых числах Рейнольдса (Re) и малых числах Маха (M):

$$Re = UL/\nu < 2 \cdot 10^3$$

$$M = U/a < 0.3,$$

где U – характерная скорость, L – расстояние, ν – кинематическая вязкость жидкости, a – скорость звука.

Примеры применения:

- Течение крови в мелких сосудах.

Подробное описание этой модели см. в томе [Теория](#).

1.2.4.3.4 Турбулентное несжимаемое течение

Модель турбулентного теплопереноса в жидкости включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	Скорость
Закон сохранения энергии	Энергия
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	Концентрация
k-ε модель турбулентности	Турбулентность

Ограничения этой модели соответствуют ограничениям предыдущей модели по плотности и числам Маха, но позволяют рассчитывать течение при больших (турбулентных) числах Рейнольдса $Re > 2 \cdot 10^3 \div 10^4$.

Примеры применения:

- моделирование обтекания автомобиля;
- моделирование движения воды в водозапорных устройствах, клапанах и жиклерах;
- моделирования движения воздуха при вентиляции помещений.

Подробное описание этой модели см. в томе [Теория](#).

1.2.4.3.5 Турбулентное слабосжимаемое течение

Модель слабосжимаемого течения жидкости включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	Скорость
Закон сохранения энергии	Энергия
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	Концентрация
k-е модель турбулентности	Турбулентность

В отличие от модели турбулентного несжимаемого течения, эта модель допускает течение с любыми изменениями плотности жидкости (однако числа Маха все равно малы – т.е. изменения плотности обусловлены только температурными эффектами или влиянием примесей в жидкости/газе).

Примеры применения:

- моделирование смешения двух газов с разной плотностью (например, метана и воздуха в горелках котлов ТЭЦ);
- моделирование движения газа в теплообменниках с большим перепадом температуры.

Подробное описание этой модели см. в томе [Теория](#).

1.2.4.3.6 Турбулентное сжимаемое течение

Модель полностью сжимаемого газа включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	Скорость
Закон сохранения энергии, записанный через полную энтальпию	Энергия
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	Концентрация
k-е модель турбулентности	Турбулентность

В отличие от модели турбулентного слабосжимаемого течения, эта модель допускает течение с любыми изменениями плотности жидкости и при любых числах Маха. Отметим, что эта модель может полностью заменять модель слабосжимаемой жидкости, однако стоит иметь ввиду, что в своем диапазоне физических параметров, расчет слабосжимаемой жидкостью будет происходить в 1.5-2 раза быстрее, чем моделью сжимаемого течения.

Примеры применения:

- моделирование обтекания самолетов и ракет при до-, транс- и сверхзвуковых скоростях полета;
- моделирование движения газа в соплах ракетных двигателей.

Подробное описание этой модели см. в томе [Теория](#).

1.2.4.3.7 Двухфазное течение со свободными поверхностями

Модель движения двухфазной жидкости включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	Скорость
Закон сохранения энергии	Энергия
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	Концентрация
k-ε модель турбулентности	Турбулентность
Уравнение переноса "концентрации жидкости в газе" (функция VOF) для аппроксимации свободной поверхности	Отн.объем жидкости в ячейке

В отличие от модели турбулентного несжимаемого течения, в этой модели включена возможность расчета среды со свободной поверхностью, например, вода-воздух. При этом рассчитывается только первая среда (в данном случае вода).

Примеры применения:

- моделирование обтекания корабля водой;
- моделирование движения газоконденсатной смеси в порах породы.

Подробное описание этой модели см. в томе [Теория](#).

1.2.4.3.8 Течение с горением

Модель течения с горением является наиболее сложной моделью движения газа, реализованной в системе FlowVision.

Модель включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	Скорость
Закон сохранения энергии, записанный через полную энтальпию	Энергия&Горючее
Уравнения переноса реагентов в приближении брутто-реакции (перенос топлива, окислителя и продуктов сгорания)	Энергия&Горючее
k-ε модель турбулентности	Турбулентность

Эта модель представляет собой развитие модели течения [слабосжимаемой жидкости](#) со всеми ее ограничениями, но при этом учитывается горение газовой смеси. Предполагается, что газовая смесь может быть предварительно перемешана и не перемешана.

Примеры применения:

- моделирование горения метана в котлах ТЭЦ;
- моделирование пожаров в помещениях.

Подробное описание этой модели см. в томе [Теория](#).

1.2.5 Шаг 3. Задание граничных условий

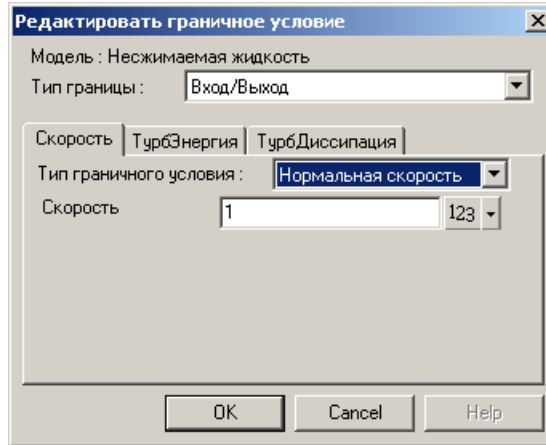
Следующий шаг создания расчетного варианта – это задание граничных условий (ГУ) на границе расчетной области. Как это сделать в FlowVision, описано в томе [Руководство пользователя](#). В этом разделе будут затронуты общие вопросы задания граничных условий и показан пример выбора граничных условий для задачи обтекания цилиндра.

Граничные условия задаются для каждой из расчетных переменных. Чтобы облегчить выбор и исключить постановку несовместимых граничных условий, они объединены в **Тип границы** – ТГ. Каждый ТГ соответствует некоторому физическому процессу, происходящему на границе.

В FlowVision существует две группы типов границ:

1. типы «стенка с и без вдува» и
2. типы специальных границ, в которые входят периодические, сопряженные граничные условия и скользящая поверхность.

Окно задания граничных условий показано на рисунке ниже.



Его вызов осуществляется путем нажатия на правую клавишу мыши при выборе ГУ, которое подлежит редактированию, в папке **Подобласть#i Гр.условия** рабочего дерева. В появляющемся меню выбирается пункт **Редактировать**.

Рассмотрим далее, что из себя представляет каждый тип границы.

1.2.5.1 Типы границ «стенка с и без вдува»

Совокупность типов границ «стенка с и без вдува» включает следующие типы границ:

- Стенка,
- Вход/Выход,
- Свободный выход,
- Симметрия.

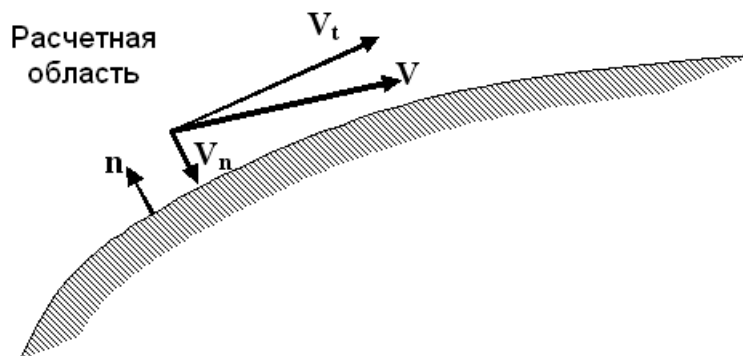
Эти типы имеются во всех моделях, за исключением **Твердый материал**, в которой имеются только типы **Стенка** и **Симметрия**.

Соответствие типа граничного условия моделируемой границе:

Имя типа границы	Моделируемая граница
<i>Стенка</i>	Твердая стенка, нет протекания
<i>Вход/Выход</i>	Стенка со вдувом или отсосом
<i>Свободный выход</i>	Выходная граница потока
<i>Симметрия</i>	Условие симметрии

Каждый тип границы включает в себя наборы граничных условий для каждой независимой переменной данной математической модели. Рассмотрим эти наборы для скоростей жидкости, давления и скалярной переменной.

В FlowVision принято соглашение, что нормаль к границе расчетной области направлена внутрь области, как показано на рисунке. Чтобы поставить граничное условие для скоростей жидкости, скорость **V** раскладывается на нормальную **V_n** и тангенциальную составляющую **V_t**, как это показано на рисунке.



Направление нормали к границе и разложение вектора скорости вблизи границы на тангенциальную и нормальную составляющие.

В следующих таблицах приведены названия граничных условий для скорости и для абстрактной скалярной переменной, которые входят в перечисленные выше типы границ. В колонке «задаваемая величина» приводятся числовые параметры данного граничного условия, которые пользователь задает в интерфейсе.

1.2.5.1.1 Тип границы Стенка

Переменная	Имя ГУ	Граничное условие	Задаваемая величина
Скорость, V	Стенка	$V_n = 0, V_t = 0$	нет
	Стенка с проскальзыванием	$V_n = 0, \frac{dV_t}{dn} = 0$	нет
	Тангенциальная закрутка ⁴	ω	ω – угловая скорость потока, в 1/с
	Вращающаяся стенка ²	$V_n = 0, V_t = 0$	нет
	Стенка, логарифмический закон ¹	$V_n = 0, \tau_w = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \Big _{y=0}$	U_R – значение песочной шероховатости, в мкм
	Тангенциальная закрутка, логарифмический закон ⁵	$\omega, \tau_w = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \Big _{y=0}$	ω – угловая скорость потока, в 1/с
	Вращающаяся стенка, логарифмический закон ³	$V_n = 0, \tau_w = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \Big _{y=0}$	нет
	Тангенциальная скорость, логарифмический закон		
Скаляр, f	Нулевой поток	$\frac{df}{dn} \Big _w = 0$	нет
	Значение на стенке	$f \Big _w = f_w$	f_w – значение скаляра на границе
	Поток ⁶	$D \frac{df}{dn} \Big _w = q_w$	q_w – поток скаляра через границу
	Диффузионный поток	$D_w \frac{df}{dn} \Big _w = q_w$	q_w – поток скаляра через границу, D_w – коэффициент диффузии
	Поток с сопротивлением	$D \frac{df}{dn} \Big _w = \frac{\alpha \alpha_{eff}}{\alpha + \alpha_{eff}} (f_e - f)$	f_e – значение скаляра на внешней границе, α_{eff} – коэффициент тепломассоотдачи

Примечания к таблице:

¹ это граничное условие – логарифмический закон изменения скорости в турбулентном пограничном слое – имеется только для моделей, включающих в себя модель турбулентности. Подробнее описание этого граничного условия смотрите в томе [Теория](#).

² это граничное условие используется только в тех задачах, где присутствует вращение (см. том [Руководство пользователя](#)), в неподвижной системе координат. Подробнее описание этого граничного условия смотрите в томе [Теория](#).

³ это граничное условие используется только в тех задачах, где присутствует вращение (см. том [Руководство пользователя](#)) в неподвижной системе координат. Подробнее описание этого граничного условия смотрите в томе [Теория](#).

⁴ это граничное условие – изменения скорости в при условии закрученного потока. Подробнее описание этого граничного условия смотрите в томе [Теория](#).

⁵ это граничное условие – изменения скорости в при условии закрученного потока. Подробнее описание этого граничного условия смотрите в томе [Теория](#).

⁶ здесь D — коэффициент диффузии, входящий в уравнение переноса скаляра f .

1.2.5.1.2 Тип границы Вход/Выход

Переменная	Имя ГУ	Граничное условие	Задаваемая величина
Скорость, V	Нормальная скорость ¹	$V_n _w = V_w, V_t = 0$	V_w – нормальная компонента скорости
	Вектор скорости	$V _w = V_w$	V_w – три компоненты вектора скорости в абсолютной системе координат
	Давление ²	$P _w = P_w,$ $(V, n) > 0 \quad V _w = V_{nw} = V $ $(V, n) \leq 0 \quad \nabla(V_i, n) _w = 0$	P_w – давление на границе
	Закрутка скорости ¹	$V_n _w = V_{wn}, V_t = 0, \omega$	V_{wn} – нормальная компонента вектора скорости, ω – угловая скорость потока, в 1/с
	Нормальная скорость с давлением ³	$V_n _w = V_w, V_t = 0, P _w = P_w$	V_w – нормальная компонента скорости, P_w – давление на границе
	Вектор скорости с давлением ⁴	$V _w = V_w, P _w = P_w$	V_w – три компоненты вектора скорости в абсолютной системе координат, P_w – давление на границе
	Норм. массовая скорость	$V_n _w = V_w, V_t = 0$	ρV_w – нормальная компонента массовой скорости
	Вектор масс. скорости ⁵	$V _w = V_w$	ρV_w – три компоненты вектора массовой скорости в абсолютной системе координат
	Закрутка масс. скорости	$\rho V_n _w = \rho V_w, V_t = 0, \omega$	ρV_{wn} – нормальная компонента вектора массовой скорости, ω – угловая скорость потока, в 1/с
	Давление торможения ⁶	$P_0 = P \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}},$ $h(T_0) = h(T) + \frac{ V ^2}{2}$	P_0 – давление торможения на границе, T_0 – температура торможения на границе, γ – показатель адиабаты
Скаляр, f	Нулевой поток ⁷	$\frac{df}{dn} _w = 0$	нет
	Значение на стенке	$f _w = f_w$	f_w – значение скаляра на границе

Примечания к таблице:

¹ Если $V_w > 0$, то жидкость втекает в расчетную область, если $V_w < 0$, то жидкость вытекает из расчетной области.

² Если вектор скорости направлен внутрь расчетной области, то на границе устанавливается нормальная скорость, равная по модулю рассчитанной в приграничной ячейке скорости. Если вектор скорости направлен из расчетной области, то на границе устанавливаются нулевые нормальные производные компонент вектора скорости.

³ Подробнее описание этого граничного условия смотрите в томе [Теория](#).

⁴ Подробнее описание этого граничного условия смотрите в томе [Теория](#).

⁵ Подробнее описание этого граничного условия смотрите в томе [Теория](#).

⁶ При малых числах Маха $P_0 = P + \rho \frac{|V|^2}{2}$. Подробнее описание этого граничного условия смотрите в томе [Теория](#).

⁷ Это ГУ используется только для выходной границы расчетной области.

1.2.5.1.3 Тип границы Свободный выход

Переменная	Имя ГУ	Граничное условие	Задаваемая величина
Скорость, \mathbf{V}	Нулевое давление/выход ¹	$P = 0$ $(\mathbf{V}, \mathbf{n}) > 0 \quad V _w = V_{tw}$ $(\mathbf{V}, \mathbf{n}) \leq 0 \quad \nabla(\mathbf{V}_i, \mathbf{n}) _w = 0$	нет
	Давление/выход ¹	$P _w = P_w$ $(\mathbf{V}, \mathbf{n}) > 0 \quad V _w = V_{tw}$ $(\mathbf{V}, \mathbf{n}) \leq 0 \quad \nabla(\mathbf{V}_i, \mathbf{n}) _w = 0$	P_w – давление на границе
	Свободная граница ²	$\frac{\partial P}{\partial n} _w = 0$ $(\nabla \mathbf{V}_i, \mathbf{n}) _w = 0, i = 1+3$	нет
	Давление, нет втока ³	$P _w = P_w$ $(\mathbf{V}, \mathbf{n}) > 0 \quad V _w = 0$ $(\mathbf{V}, \mathbf{n}) \leq 0 \quad \nabla(\mathbf{V}_i, \mathbf{n}) _w = 0$	P_w – давление на границе
Скаляр, f	Нулевой поток	$\frac{df}{dn} _w = 0$	нет
	Значение на стенке	$f _w = f_w$	f_w – значение скаляра на границе

Примечания к таблице:

- ¹ Это граничное условие используется только для выходной границы течения. Скорость на границе полагается равной тангенциальной компоненте вектора скорости, если ее вектор направлен внутрь расчетной области. Подробнее его описание смотрите в томе [Теория](#).
- ² Это граничное условие используется только для выходной границы течения. Подробнее его описание смотрите в томе [Теория](#).
- ³ Это граничное условие используется только для выходной границы течения. Скорость на границе обнуляется, если ее вектор направлен внутрь расчетной области. Подробнее его описание смотрите в томе [Теория](#).

1.2.5.1.4 Тип границы Симметрия

Переменная	Имя ГУ	Граничное условие	Задаваемая величина
Скорость, \mathbf{V}	Стенка с проскальзыванием	$V_n = 0, \frac{dV_t}{dn} = 0$	нет
Скаляр, f	Симметрия	$\frac{df}{dn} _w = 0$	нет

1.2.5.2 Специальные типы границ

К специальным типам границ относятся **Периодические**, **Сопряженные** граничные условия и **Скользкая поверхность**. Эти типы граничных условий служат для задания периодики или для связи подобластей между собой.

Граничные условия этих типов задаются попарно и должна быть задана связь этих граничных условий внутри данной пары.

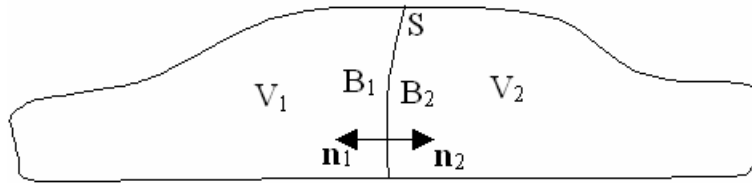
Внимание! Нельзя использовать в одной задаче одновременно граничные условия типа **Сопряженное** и **Скользкая поверхность**!

1.2.5.2.1 Сопряженные границы

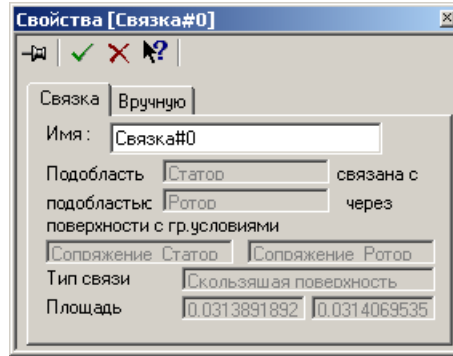
Тип «сопряженная граница» **Сопряженное** предназначен для решения сопряженных задач. Термин сопряженная задача в основном используется для обозначения класса задач теплообмена между твердым телом и жидкостью, когда важен одновременный расчет распределения температуры и в твердом теле и в жидкости. Решение в двух различных областях, имеющих разные математические модели, сопрягается (сшивается) на общей границе этих двух областей.

В **FlowVision** два различных объема V_1 и V_2 , если они даже имеют общую геометрическую поверхность S , все же имеют разные границы, поскольку объем V_1 имеет в качестве границы обращенную к нему сторону

этой поверхности V_1 , а другой объем V_2 – сторону B_2 .

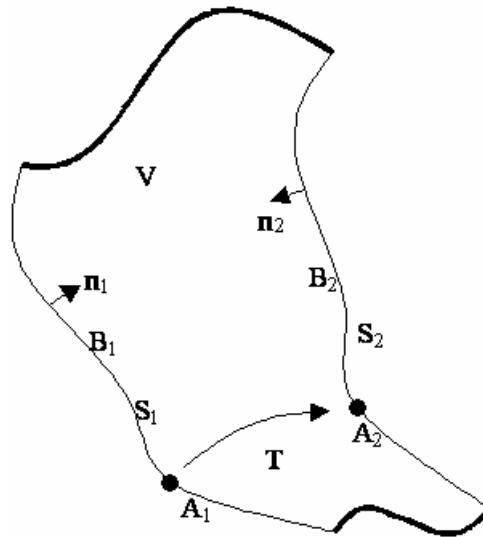


Для сопряжения таких границ используется тип **Сопряженное**. Чтобы граничное условие **Сопряженное** ввести, его нужно поставить как на границе B_1 , так и на границе B_2 . Затем граничные условия связываются между собой в папке **Связать гр.условия**.



При генерации сетки программа, встретив это граничное условие на одной из поверхностей, ищет ее образ на других поверхностях. Если образа нет, выдается сообщение об ошибке. В случае, если автоматическое связывание привело к ошибке, можно воспользоваться ручным режимом (подробнее см. том [Руководство пользователя](#)).

Тип **Сопряженное** может быть использован также для произвольного связывания двух границ. Границы могут принадлежать как одному, так и разным объемам и могут принадлежат двум разным поверхностям. Достаточным условием такого связывания является условие существования однозначного отображения одной поверхности в другую путем преобразований переноса и поворота.



Сопряжение двух границ внутри одной расчетной области.

Если граница определена как тип **Сопряженное**, то список граничных условий для независимых переменных включает в себя уже известный список **Стенка**, расширенный двумя граничными условиями – **L-Сопряжение** и **Сопротивление**.

Пусть T – преобразование переноса и поворота, переводящее границу B_1 в границу B_2 . Пусть на этих границах для данной переменной f задано граничное условие **L-Сопряжение**. В этом случае на них будет выполняться следующее условие:

$$f_{A_1} = f_{A_2}$$

где A_1 и A_2 – соответствующие друг другу точки на границах B_1 и B_2 соответственно, или:

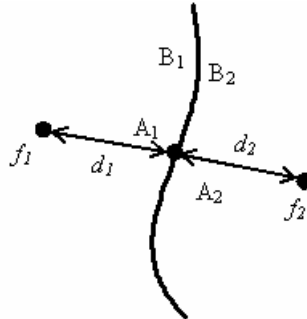
$$A_1 = T(A_2)$$

Граничное условие **Сопротивление** введено для задания сопротивления диффузионному потоку

переменной f через поверхность, заданную двумя границами B_1 и B_2 . Пусть D_1 и D_2 , f_1 и f_2 – коэффициенты диффузии переменной f , ее значение в точке, p вблизи границ B_1 и B_2 соответственно, а d_1 и d_2 – расстояние от точек, где определены f_1 и f_2 до границ B_1 и B_2 . В этом случае на этих границах будет выполнено соотношение

$$D_1 \cdot \frac{(f_A - f_1)}{d_1} = R \cdot (f_A - f_A) = D_2 \cdot \frac{(f_2 - f_A)}{d_2}$$

где R – сопротивление, задаваемое пользователем.



Если в качестве расчетной переменной f взять температуру, то физическая аналогия граничного условия **Сопротивление** проста – можно считать, что между двумя рассматриваемыми границами имеется тонкий слой изоляции толщиной d и коэффициентом теплопроводности λ . Величина сопротивления R в этом случае равна λ/d .

Подробнее о задании ГУ **Сопряженное** см. в томе [Теория](#).

Отметим, что определяя две границы одного и того же объема как тип **Conjugate** и задавая для всех переменных граничное условие **L-Сопряжение**, на этих двух границах будет установлено периодическое граничное условие. Вместе с тем, во **FlowVision** имеется другая возможность задания периодических ГУ с помощью типа границы [Периодическое](#).

1.2.5.2.2 Периодические границы

Тип границы **Периодическое** включает в себя граничные условия:

1. для скалярных переменных – **Периодичное** и **Периодическое с перепадом**;
2. для скоростей – **Периодичное** и **Периодическое с перепадом давления**.

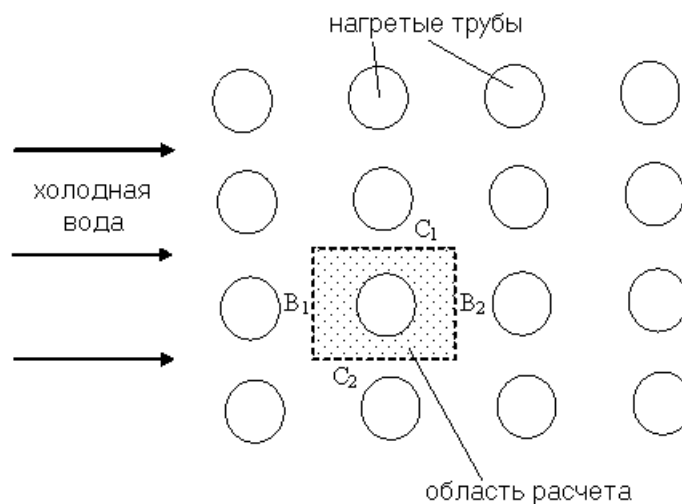
Способ и условия задания типа границы **Периодическое** совпадают с типом **Сопряженное**. Отличие состоит в том, что тип границы **Периодическое** может быть установлен для двух отображаемых друг в друга границ, принадлежащих одному и тому же расчетному объему.

Граничное условие **Периодическое с перепадом** позволяет задать скачок Δf скалярной переменной на границах B_1 и B_2 :

$$f_{B_2} - f_{B_1} = \Delta f$$

Граничное условие **Периодическое с перепадом давления** позволяет задать скачок давления на соответствующих границах.

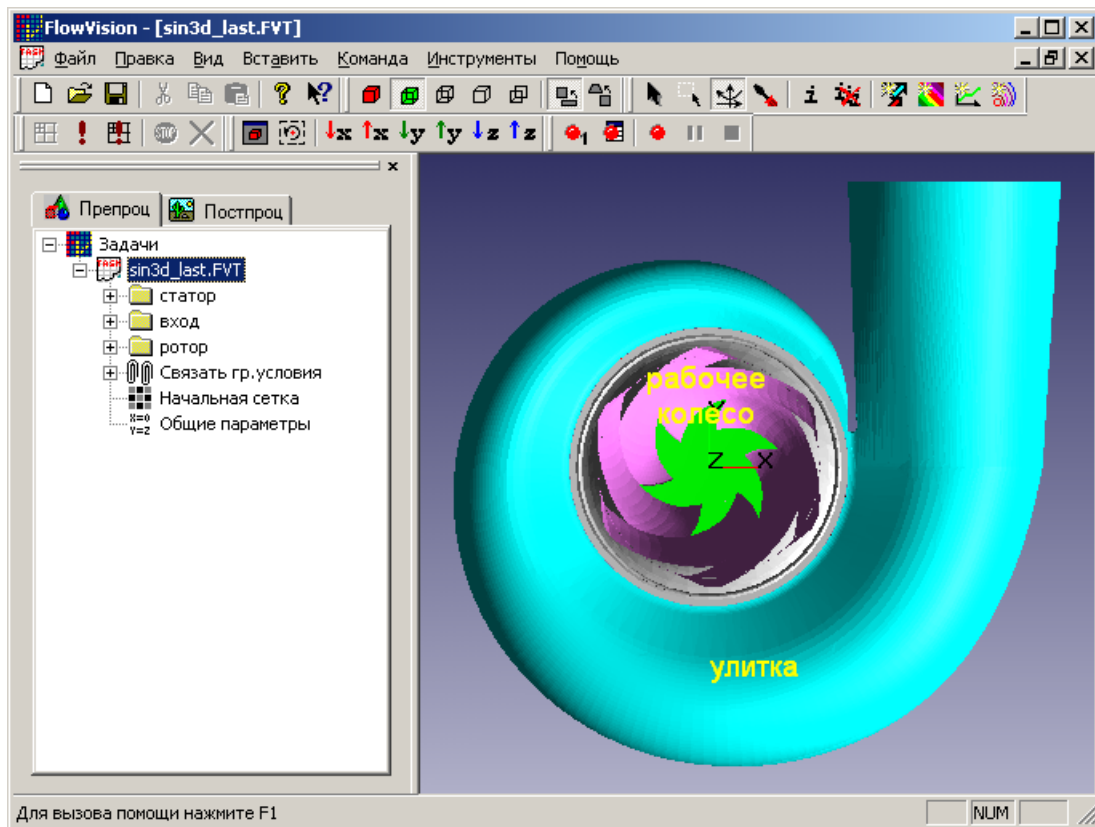
Примером использования граничных условий со скачками переменных может служить моделирование теплообменника из нагретых труб, поперечно обтекаемых охлаждаемой жидкостью. Расчетная область, которая является периодом этой задачи, показана пунктиром на представленном ниже рисунке.



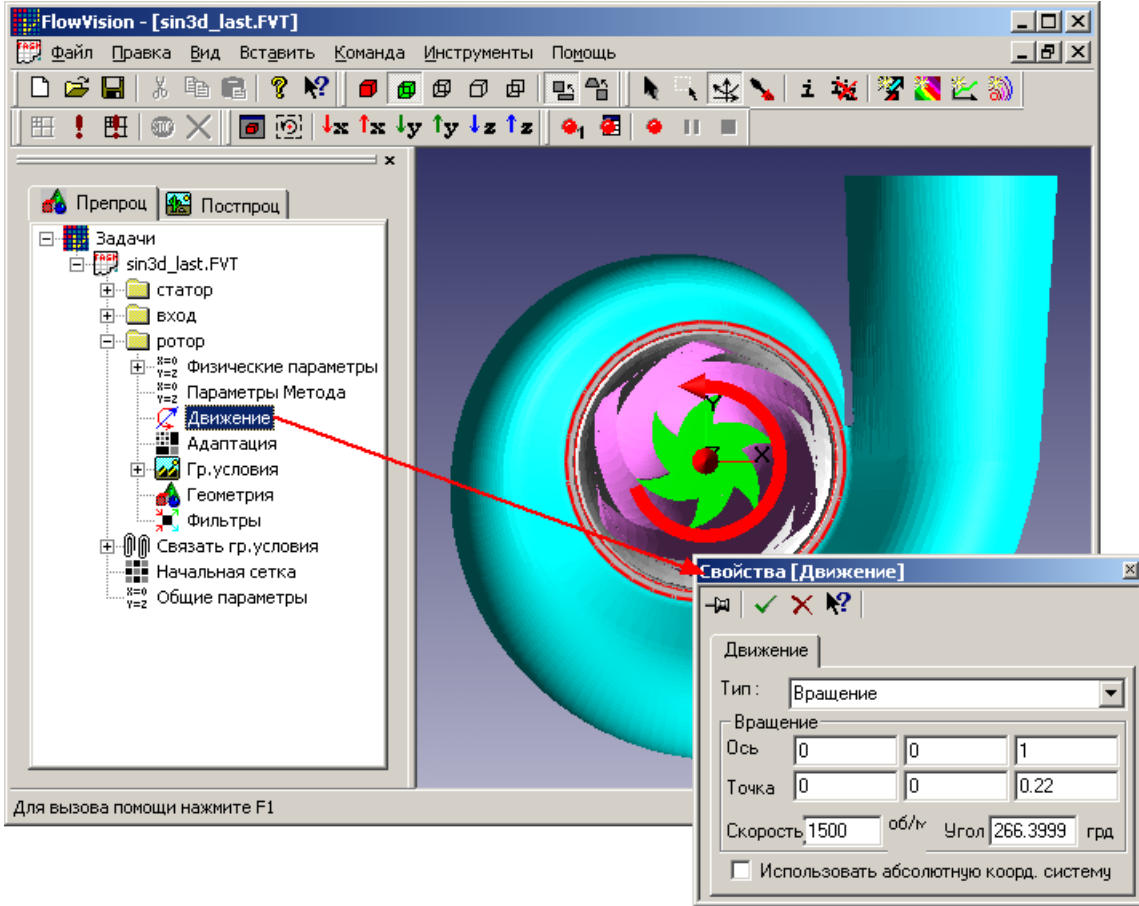
На границах C_1 и C_2 ставятся периодические граничные условия **Периодичное** для всех переменных задачи. Отметим, что если эти границы проведены точно между цилиндрами и поток холодной воды параллелен этим границам, то на них можно поставить граничное условие симметрии **Симметрия**. На границах B_1 и B_2 ставятся ГУ **Периодическое с перепадом давления** для скоростей и **Периодическое с перепадом** для температуры. Величина скачка давления определяет количество воды, проходящей через расчетную область. Скачок температуры, который равен разнице средней температуры воды на входе в расчетную область и на выходе из нее, может быть получен из интегральных соотношений энергетического баланса.

1.2.5.2.3 Скользящая поверхность

Граничное условие **Скользкая поверхность** предназначено для расчета течения жидкости и газа в устройствах, в которых есть вращающиеся и неподвижные части (ротор-статор). Для того, чтобы воспользоваться этим граничным условием, нужно выделить расчетные области, связанные с ротором и со статором. На рисунке изображена расчетная область центробежного насоса с улиткой. Улитка задана своей областью расчета, рабочее колесо насоса – своей.

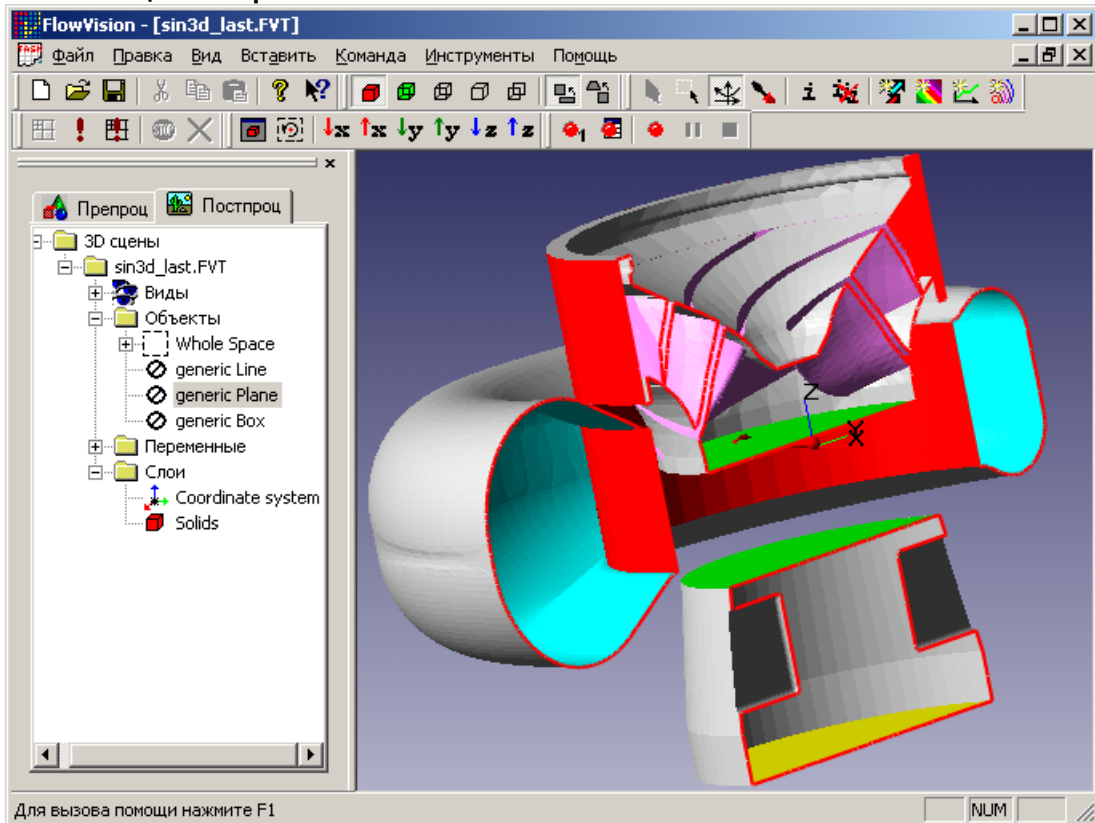


Для каждой области расчета задается своя скорость вращения.



У областей расчета ротора и статора должны быть выделены цилиндрические поверхности сопряжения равной высоты и радиуса. На этих поверхностях устанавливается граничное условие **Скользящая поверхность**, которое затем связывается в папке **Связать гр.условия**.

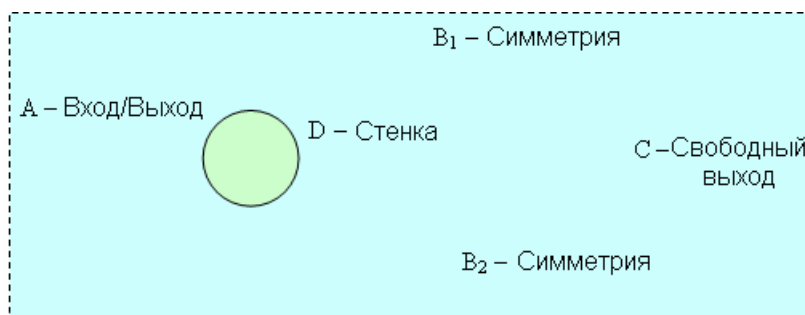
Внимание: Для каждой пары областей ротора и статора может быть задана только одна скользящая поверхность!



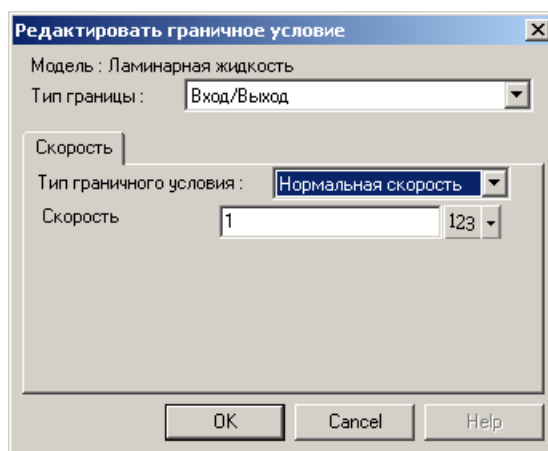
Разрез насоса. Скользящие поверхности показаны красным цветом.

1.2.5.3 Пример задания граничных условий

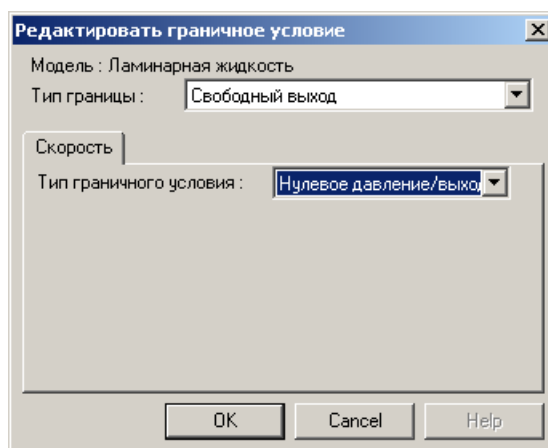
На рисунке показан пример задания граничных условий для задачи обтекания цилиндра.



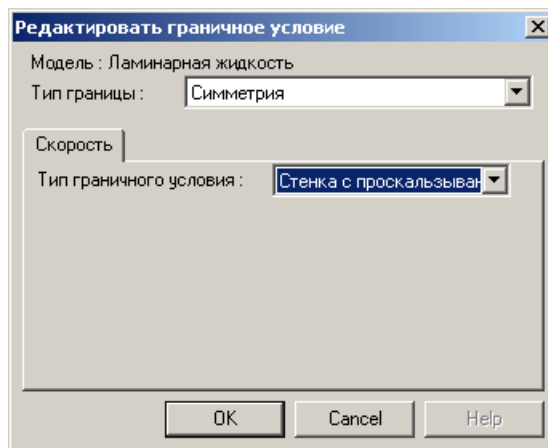
Входная граница А – тип границы **Вход/Выход**, граничное условие для скорости – **Нормальный вход/выход**, нормальная величина скорости положена равной 1 м/с.



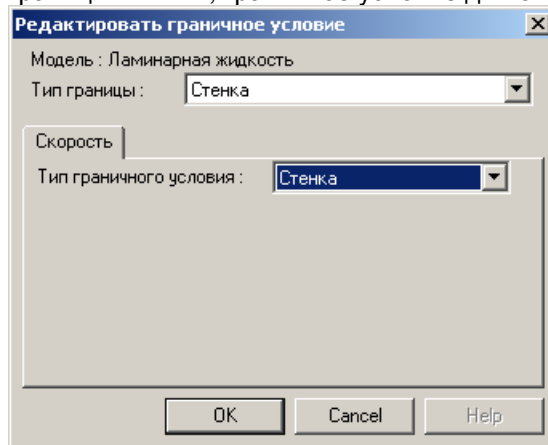
Выходная граница С – тип границы **Свободный выход**, граничное условие для скорости – **Нулевое давление/выход**.



Верхняя и нижняя границы V1 и V2 – тип границ **Симметрия**, граничное условие для скорости – **Стенка с проскальзыванием**.



Поверхность цилиндра D – тип границы **Стенка**, граничное условие для скорости – **Стенка**.

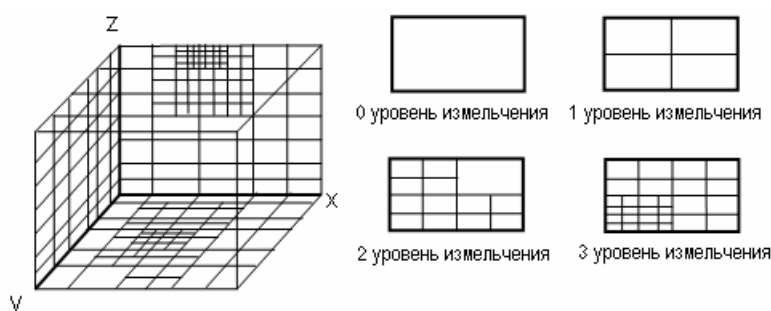


1.2.6 Шаг 4. Генерация расчетной сетки

В этом разделе описаны особенности используемой во **FlowVision** расчетной сетки и ее задание.

1.2.6.1 Что такое адаптивная сетка с локальным измельчением

FlowVision использует прямоугольную адаптивную локально измельченную сетку (**АЛИС**) для решения уравнений математической модели. Возможность адаптации этой сетки позволяет разрешать малые детали геометрии расчетной области и высокие градиенты рассчитываемых величин.

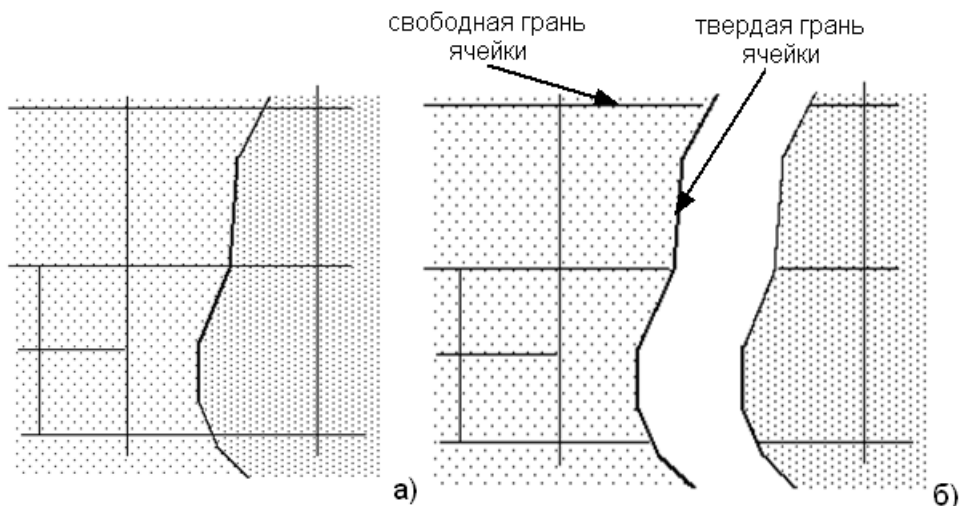


Адаптивная сетка с локальным измельчением.

Сущность технологии **АЛИС** заключается в следующем. Во всей расчетной области вводится прямоугольная сетка. Выделяются подобласти с особенностями геометрии или течения, в которых необходимо провести расчет на более мелкой, чем исходная, сетке. При этом расчетная ячейка, в которую попала выделяемая особенность, делится на 8 равных ячеек. Далее, если необходимо, ячейки делятся еще раз и так до достижения необходимой точности. Ячейки начальной сетки называются ячейками уровня 0, ячейки, получаемые измельчением уровня 0, называются ячейками уровня 1 и т.д. При генерации **АЛИС** накладывается условие, что гранями и ребрами могут граничить друг с другом только ячейки с номерами уровней, отличающимися не более, чем на единицу.

1.2.6.2 Что такое подсеточное разрешение геометрии

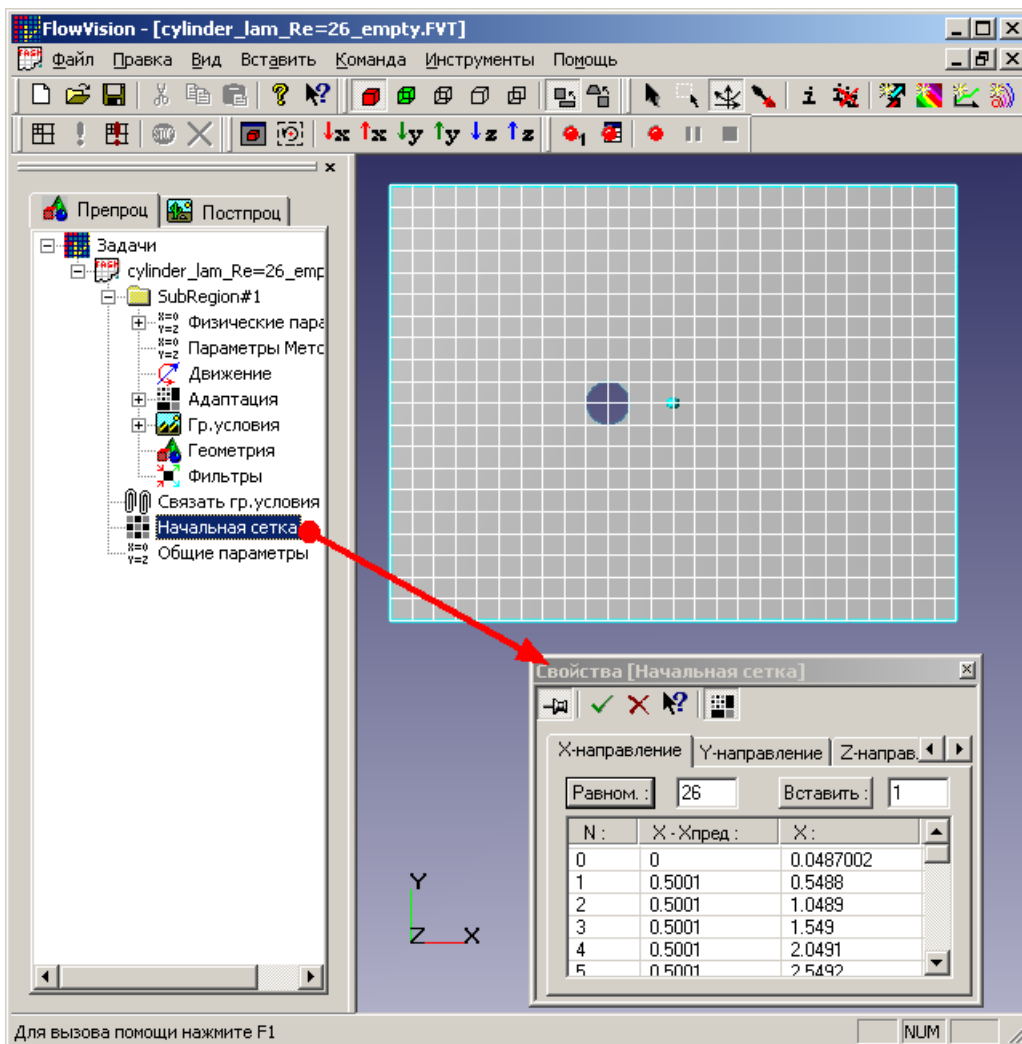
Метод подсеточного разрешения геометрии, который используется в **FlowVision**, предназначен для аппроксимации криволинейных границ на прямоугольной сетке. Суть этого метода в следующем. Ячейки, через которые проходит граница, расщепляются на 2, 3 и т.д. ячеек. При этом они теряют свою первоначальную форму параллелепипеда и превращаются в многогранники произвольной формы. Уравнения математической модели аппроксимируются для этих многогранников без каких-либо упрощений. Такой подход позволяет с достаточной степенью точности рассчитывать течения даже на грубой расчетной сетке.



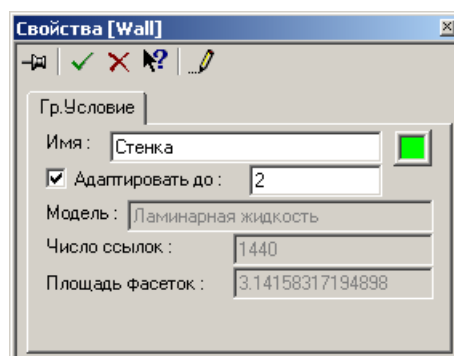
Метод подсеточного разрешения:
а) поверхность проходит через ячейки, б) расщепление ячеек границей.

1.2.6.3 Задание расчетной сетки

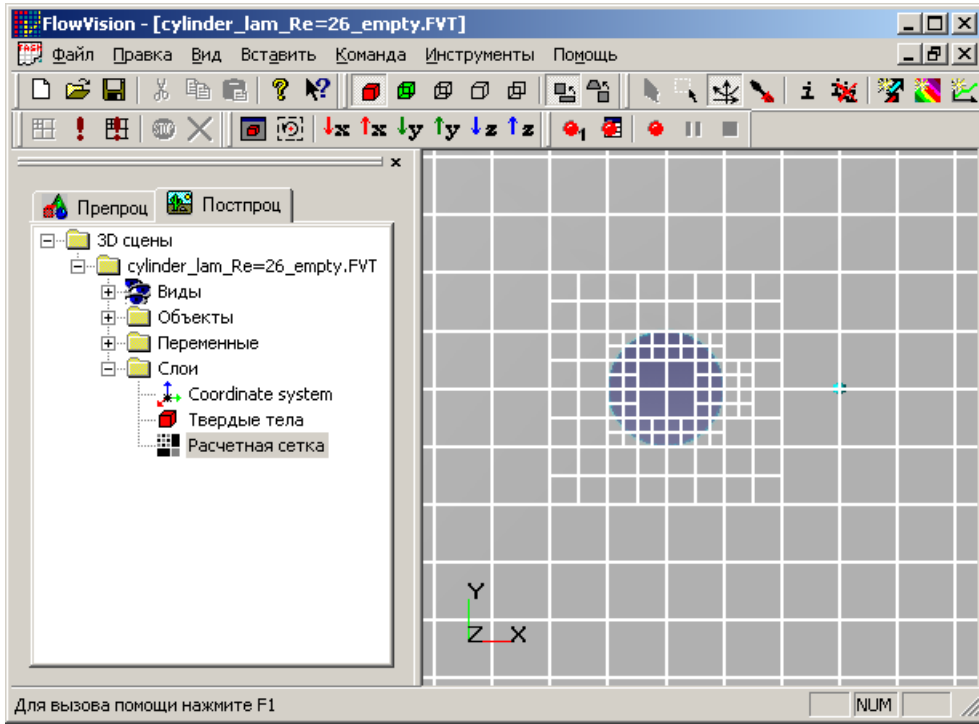
Сетка уровня 0 задается через диалоговое окно **Свойства**, вызываемое с помощью нажатия на правую клавишу мыши на пункт **Начальная сетка** в дереве варианта. В этом окне имеется три закладки, в которых сетка задается вдоль направлений осей x , y , z . На этом же рисунке виден пример задания расчетной сетки уровня 0 для задачи обтекания цилиндра.



Из представленного выше рисунка видно, что сетка уровня 0 слишком груба вблизи цилиндра. Одним из способов повысить точность, является измельчение сетки вблизи поверхности. Для этого в окне свойств граничного условия задается уровень адаптации. В этом случае, все ячейки вблизи поверхности, содержащей это граничное условие, будут измельчены до соответствующего уровня. В диалоговом окне **Свойства** граничного условия задается уровень, до которого все ячейки, включающие в себя поверхность с данным ГУ, будут измельчены.



На следующем рисунке показан результат адаптации сетки по граничному условию.



1.2.7 Шаг 5. Задание параметров метода численного моделирования

1.2.7.1 Как решаются уравнения конвективно-диффузионного переноса

1.2.7.1.1 Аппроксимация уравнения конвективно-диффузионного переноса

Математическая модель движения жидкости (газа) представляет собой совокупность уравнений конвективно-диффузионного переноса. В обобщенной дифференциальной форме эти уравнения имеют следующий вид

$$(1) \quad \frac{\partial f}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}f) = \nabla(D\nabla f) + Q$$

здесь f – рассчитываемая переменная, \mathbf{V} – скорость, D – коэффициент диффузии, Q – источниковый член. **FlowVision** использует метод конечных объемов для численного решения уравнений (1). В этом методе уравнения (1) интегрируются по объему каждой i -ой ячейки расчетной сетки и по отрезку времени (шаг времени) :

$$(2) \quad \int_{V_i} f dv \Big|_{t=t^{n+1}} - \int_{V_i} f dv \Big|_{t=t^n} + \int_{S_i} f \mathbf{V} ds dt = \int_{S_i} D \nabla f ds dt + \int_{V_i} Q dv dt$$

где V_i – объем ячейки, S_i – ее поверхность, $t_n, t_{n+1} = t_n + \Delta t$ – моменты времени начала и конца шага по времени.

Ячейка расчетной сетки имеет форму произвольного многогранника. Назовем "свободными гранями" ячейки те грани, с которыми она граничит с другими ячейками. Площадь j -ой свободной грани в i -ой ячейки обозначим через s_i^j . "Твердыми гранями" назовем грани ячейки, образованные границей, пересекающую ячейку. Площадь j -ой твердой грани в i -ой ячейки обозначим через g_i^j . Запишем уравнение (2) в разностной форме

$$(3) \quad V_i(f_i^{n+1} - f_i^n) + \sum_j F_i^j s_i^j + \sum_j G_i^j g_i^j + Q = 0$$

здесь Q_i – объемный источник переменной f , f_n – осредненное значение переменной по объему ячейки в момент времени t_n ,

$$(4) \quad V_i f_i^n = \int_{V_i} f dv \Big|_{t^n}$$

осредненные плотности потоков рассчитываемой переменной F_i^j и G_i^j через свободные грани s_i^j и

твердые грани g_i^j за шаг по времени равны

$$(5) \quad F_i^j = \int_{\tau} (\mathcal{N} + D\nabla f) dt \Big|_{s_i^j}$$

$$(6) \quad G_i^j = \int_{\tau} (f_{w_j} \mathbf{V}_{w_j} + D(\nabla f)_{w_j}) dt \Big|_{g_i^j}$$

здесь индекс w соответствует значению соответствующих величин на границе расчетной области, которая соответствует грани g_i^j .

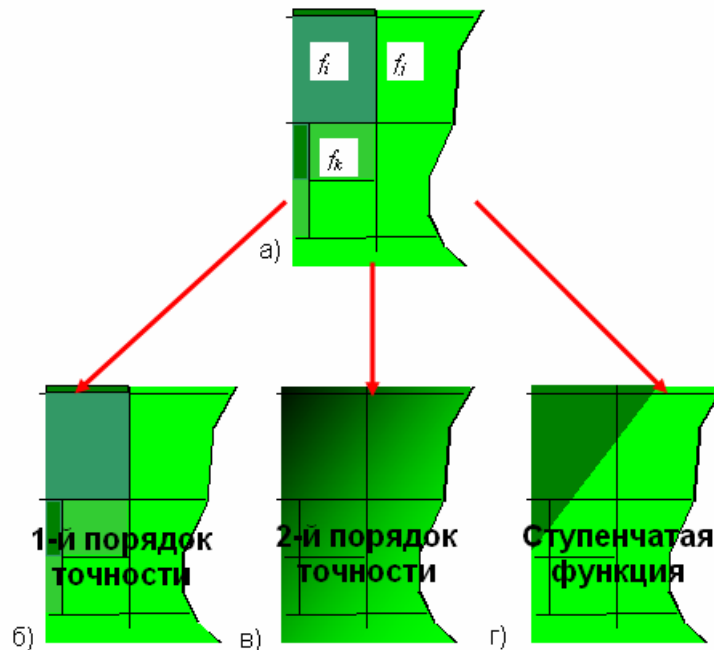
Второй член суммы подынтегрального выражения в (5), соответствующего диффузионному потоку f , аппроксимируется в **FlowVision** вторым порядком точности по пространственной переменной.

1.2.7.1.2 Аппроксимация конвективного переноса

Наиболее сложной проблемой является аппроксимация первого члена в подынтегральном выражении в (5) раздела [Аппроксимация уравнения](#), соответствующему конвективному потоку. В **FlowVision** используется несколько схем аппроксимации конвективного потока. Эти схемы основаны на восстановлении рассчитываемой переменной f из ее средних значений внутри ячейки расчетной сетки и переноса восстановленной функции по линиям тока жидкости (характеристикам поля скорости). В этом разделе приводятся только общие сведения об аппроксимации уравнений конвективного переноса, более подробно аппроксимация рассмотрена в томе [Теория](#).

На рисунке показаны способы восстановления рассчитываемой переменной в ячейке. Трехмерное восстановление есть линейная комбинация трех одномерных функций $f_k(x_k)$, восстановленных вдоль осей координат x_k внутри ячейки

$$(7) \quad f_i(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^3 f^k(x_k) - 2f$$



Методы восстановления рассчитываемой переменной внутри расчетной ячейки

- а) средние величины в расчетных ячейках
- б) восстановление первого порядка
- в) гладкое восстановление высокого порядка
- г) ступенчатое восстановление высокого порядка.

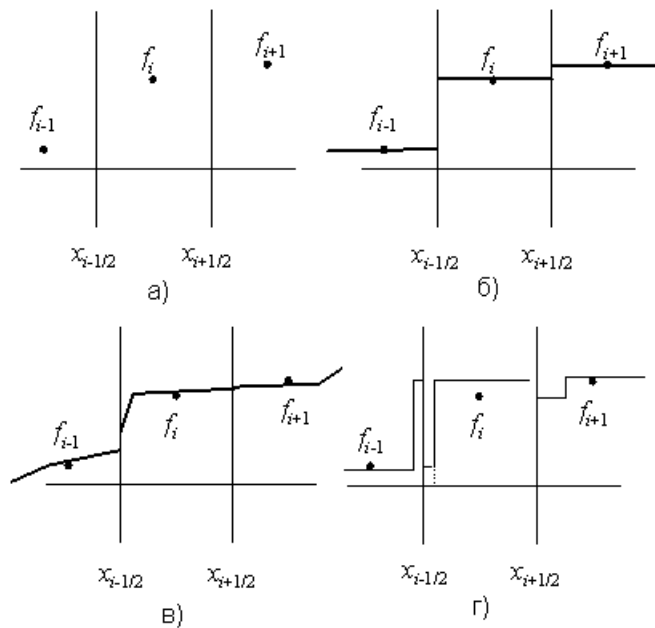
Способ восстановления **1-го порядка** соответствует известной схеме против потока, имеющей первый порядок точности по пространственной переменной. Расчет течения с использованием этой схемы для аппроксимации конвективного члена дает грубое решение, имеющее большую схемную диссипацию, и приводит к искусственному уменьшению его градиентов ("размазыванию"). Расчет этой схемой имеет максимальную скорость сходимости решения к стационарному состоянию (если оно есть). Более того,

итерация по времени выполняется при использовании схемы быстрее. Рекомендуется использовать эту схему при расчетах тех вариантов, на которых схемы высокого порядка точности не устойчивы, либо в начальные моменты времени при расчетах стационарных вариантов для получения первого приближения решения с последующим расчетом схемами высокого порядка точности.

Способ восстановления **2-го порядка** соответствует формально схеме второго порядка по времени и по пространству, однако, как показали исследования (Aksenov A.A., Dyadkin A.A., Gudzovsky A.V., *Numerical Simulation of Car Tire Aquaplaning. Computational Fluid Dynamics '96*, J.-A. Desideri, C.Hirsch, P.Le Tallec, M.Pandolfi, J.Periaux eds, John Wiley&Sons, 1996, pp. 815-820) эта схема имеет точность схем повышенного порядка точности. Рекомендуется использовать для расчета всех уравнений конвективного переноса.

Способ восстановления **Ступенчатая функция** соответствует схеме для расчета переноса ступенчатой функции, принимающей только два значения f_{min} и f_{max} во всей области расчета. Пример перенос функции **VOF**, принимающей значения 0 (газ) и 1 (жидкость), которая применяется в **FlowVision** для отслеживания границ раздела между жидкостью и газом.

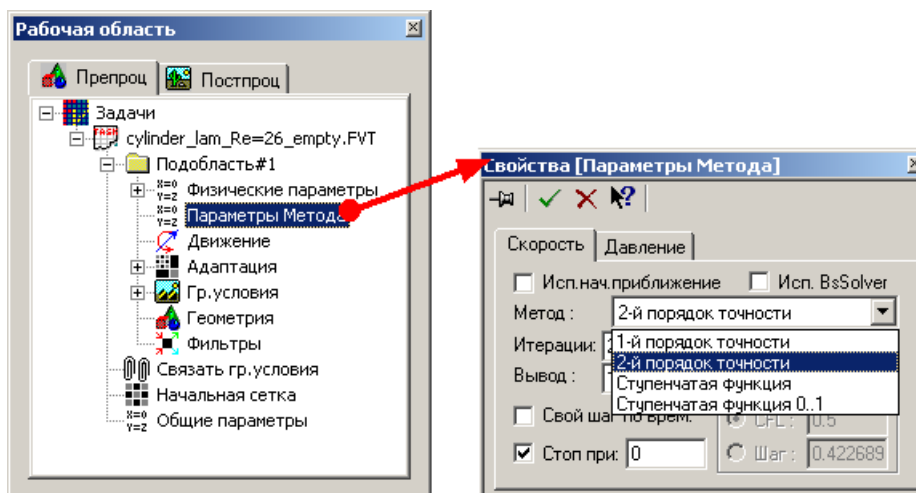
На рисунке изображены одномерные восстановления, соответствующие способам **1-й порядок точности**, **2-й порядок точности**, **Ступенчатая функция**.



Одномерное восстановление рассчитываемой переменной внутри расчетной ячейки, располагающейся между координатными плоскостями $x_{i-1/2}$ и $x_{i+1/2}$:

- а) средние величины в расчетных ячейках
- б) восстановление первого порядка
- в) гладкое восстановление высокого порядка
- г) ступенчатое восстановление высокого порядка.

Выбор способа восстановления осуществляется в свойствах пункта **Параметры метода** в дереве варианта. По умолчанию установлен метод **2-й порядок точности**.

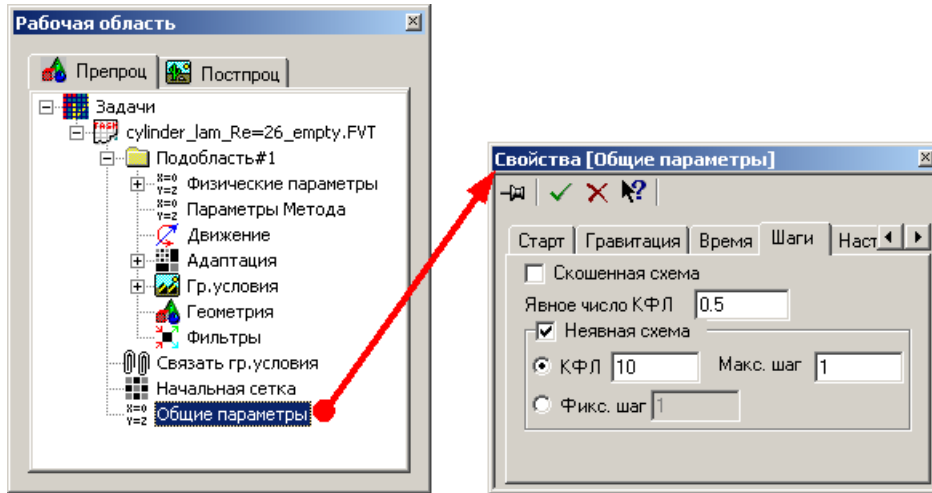


Выбор схемы аппроксимации конвективного члена в уравнения конвективно-диффузионного переноса.

1.2.7.1.3 Аппроксимация конвективного переноса “скошенной” схемой

Точность численного решения уравнения конвективного переноса сильно зависит от ориентации потока жидкости относительно расчетной сетки. Наиболее сильно схемные искажения решения проявляются при диагональном, “скошенном” потоке жидкости относительно ячеек сетки. Чтобы повысить точность расчета при диагональном потоке жидкости, в **FlowVision** применяется “скошенная” расчетная схема. Применение этой схемы увеличивает время расчета уравнения конвективного переноса примерно на 50%. Рекомендуется ее использование для моделирования закрученных течений.

На рисунке показано, как задать аппроксимацию “скошенной” схемой конвективного члена в уравнении конвективно-диффузионного переноса. Отметим, что при таком задании, расчет “скошенной” схемой будет проводиться во всех расчетных областях, имеющихся в данном варианте. Чтобы установить аппроксимацию уравнения конвективного переноса “скошенной” схемой, выберите пункт **Скошенная схема** в окне **Общие параметры** **Свойства Шаги**.



1.2.7.1.4 Явный и неявный методы расчета

Интегрирование уравнения (1) раздела [Аппроксимация уравнения](#) производится с шагом по времени τ , значение которого определяется из условий устойчивости вычислительного алгоритма. В **FlowVision** имеется возможность расчета этого уравнения явным и неявным алгоритмами.

Явный алгоритм записывается в следующем виде

$$(1) \quad \frac{f^{n+1} - f^n}{\tau} + \nabla(Vf^n) = \nabla(D \nabla f^{n+1}) + Q^{n+1}$$

Отметим, что в явном алгоритме только конвективный член уравнения переноса записывается в явном виде. Все остальные члены вычисляются неявно.

Шаг по времени τ_{expl} в явном алгоритме (далее этот шаг будем называть явным шагом) ограничен условием Куранта-Фридрихса-Леви

$$(2) \quad \tau_{expl} < \tau_{min} = \min_{k,i=1..3} \frac{h_{ki}}{u_{ki}}$$

где τ_{min} – минимальный шаг по времени, полученный в результате обхода всех расчетных ячеек, h_{ki} , u_{ki} – размер k -ой ячейки и скорость в направлении оси x_i . Выбор явного шага по времени в **FlowVision** осуществляется через задания “явного числа Куранта-Фридрихса-Леви” CFL_{expl}

$$(3) \quad \tau_{expl} = CFL_{expl} \cdot \tau_{min}$$

Число CFL_{expl} положительное и всегда меньше 1

$$(4) \quad 0 < CFL_{expl} \leq 1$$

Для решения уравнения конвективного переноса неявным алгоритмом используется метод коррекции ошибки. В этом методе в уравнение добавляется и вычитается конвективный член, аппроксимированный схемой первого порядка точности. Уравнение принимает вид

$$(5) \quad \frac{f^{n+1} - f^n}{\tau} + \nabla(Vf^n) - [\nabla(Vf^n)]_1 + [\nabla(Vf^{n+1})]_1 = \nabla(D \nabla f^{n+1}) + Q^{n+1}$$

Неявный алгоритм не имеет ограничений на величину шага по времени. Этот шаг задается либо постоянным, либо через “неявное число Куранта-Фридрихса-Леви” CFL_{impl} . В последнем случае шаг по времени равен

$$(6) \quad \tau_{impl} = \tau_{expl} \cdot CFL_{impl}$$

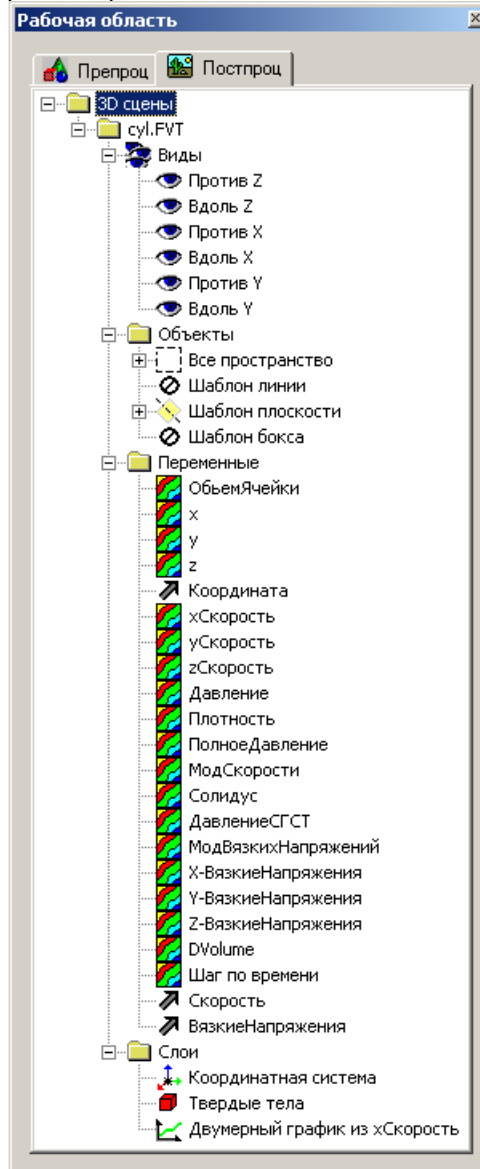
Решение системы алгебраических уравнений, получаемых после аппроксимации уравнений (1), (5), ищется методом верхней либо нижней поточечной релаксации. Метод поточечной релаксации – итерационный и имеет эмпирический параметр ω , влияющий на скорость сходимости. Параметр ω лежит в следующих пределах

$$(7) \quad 0 < \omega < 2$$

Как показывает практика, при значении $\omega = 0.9$ метод поточечной релаксации (в этом случае он называется методом поточечной нижней релаксации) хорошо сходится для большинства задач.

1.2.8 Шаг 6. Просмотр результатов моделирования

Чтобы посмотреть результаты моделирования, необходимо открыть раздел постпроцессора в окне рабочего пространства. Раздел постпроцессора состоит из нескольких папок:



Папка **Виды** – это виды геометрических объектов в графическом окне. При выделении объектов из этой папки, устанавливается predetermined направление оси наблюдателя к осям системы координат объекта. Например, при выделении объекта **Против Z** наблюдатель будет смотреть на объект, который будет повернут ему таким образом, что ось Z будет смотреть прямо на наблюдателя.

Папка **Объекты** – здесь находятся все геометрические объекты, на которых (или в которых) будут отображаться расчетные параметры.

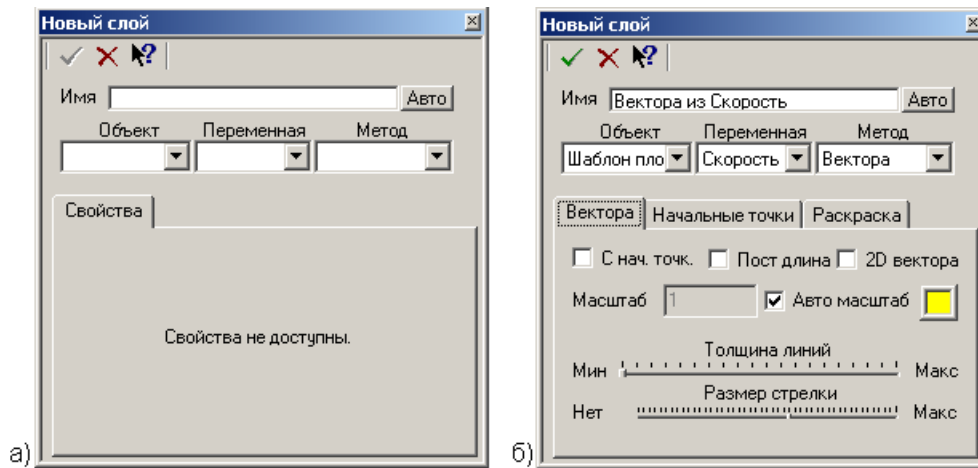
Папка **Переменные** – в ней собраны все расчетные (зависимые и независимые) переменные, имеющиеся во всех расчетных областях данной задачи.

Папка **Слои** – это список графических объектов, называемых слоями, отображенных в графическом окне. Слои **Координатная система** и **Твердые тела** в этой папке появляются автоматически с заданием варианта, они соответствуют системе координат и поверхности расчетной области.

Чтобы визуализировать переменную, необходимо задать соответствующий слой. Слой задается из трех составляющих – геометрический объект (папка **Объекты**), имя переменной и метод ее отображения.


Поясним на примере визуализации распределения скоростей в плоскости с помощью векторов.

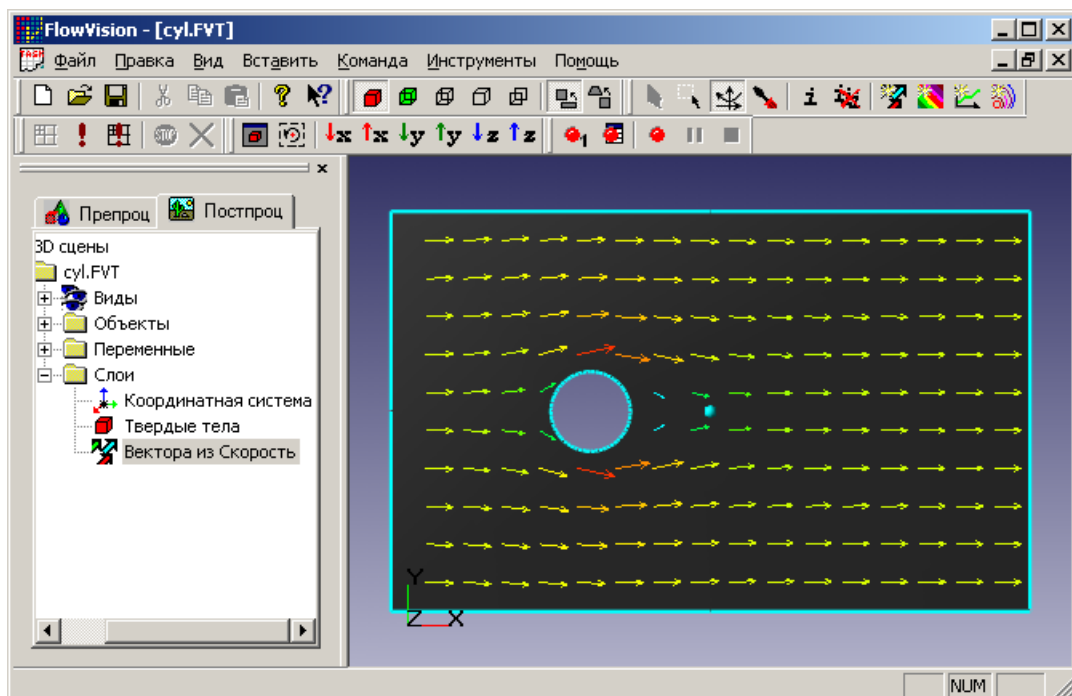
Через меню **Вид Создать слой...** вызывается окно задания слоя. В нем устанавливается геометрический объект – плоскость **Объекты шаблон Плоскости**, переменная – скорость **Переменная Скорость** и устанавливается метод отображения векторами **Метод Вектора**. После заполнения этих окошек, в окне появляются закладки, соответствующие свойствам объекта и метода отображения. В приведенном примере в первой закладке **Параметры плоскости** находятся свойства плоскости, отвечающие за ее ориентацию, во второй – густота сетки на этой плоскости, в узлах которой изображаются векторы скорости и другие параметры. Более подробно см. в том [Руководство пользователя](#).



Окно задания слоя визуализации:

- а) перед заполнением окошек **Объекты**, **Переменная**, **Метод**;
 б) после заполнения

После нажатия кнопки  в окне задания слоя, слой отобразится в графическом окне, как это показано на следующем рисунке.



Распределение скоростей газа, визуализированное векторами на плоскости.

Отметим, что слои можно задавать в процессе проведения моделирования, но слой будет отображен в графическом окне только по окончании итерации по времени – пользователь предупреждается об этом сообщением. Обновление графической информации в окне происходит на каждом шаге по времени, поэтому пользователь имеет возможность наблюдать развитие решения постоянно.

При проведении долговременных расчетов рекомендуется всегда визуализировать данные в процессе расчета, поскольку в этом случае пользователь получает возможность постоянного контроля над процессом сходимости решения и, если нужно, вмешаться в процесс расчета при возникновении численных неустойчивостей или несходимости решения. Иногда пользователь ошибается при задании варианта и большинство таких ошибок обнаруживаются на первых итерациях вычислительного алгоритма путем созерцания получаемого решения.

1.2.9 Шаг последний. Оценка точности расчетов

Время работы компьютера при выполнении численного моделирования обычно колеблется от нескольких минут (простейшие двумерные задачи с сотнями и несколькими тысячами ячеек) до нескольких суток (например, задачи с горением с числом ячеек в сотни тысяч). Поэтому пользователю требуется опыт для создания расчетной сетки с минимальным количеством ячеек, но которая разрешает основные особенности течения, ради которых проводится моделирование.

Оценить точность полученного решения, если нет результатов экспериментов (либо они ненадежны) чрезвычайно сложно. Здесь можно дать следующие рекомендации:

- Во-первых, проверьте сходимость по сетке. Это общий принцип оценки точности получаемого решения, который заключается в проведении серии расчетов одной и той же задачи на сетке, которая последовательно сгущается во всей области расчета. При уменьшении расчетных ячеек точность решения исходных уравнений увеличивается пропорционально h^{-n} , где h – размер расчетной ячейки, n – порядок аппроксимации расчетной схемы (в **FlowVision** $n = 2$). Моделируемые параметры задачи (например, перепад давления на устройстве) при этом сходятся к некоторому значению, соответствующему бесконечно мелкой сетке. Выберите в качестве базовой сетки самую грубую сетку, на которой значение моделируемых параметров близко к рассчитанным параметрам на мелкой сетке с нужной точностью. Отметим, что этот способ оценки точности решения годен только в том случае, если используется "непогрешимая" математическая модель. Например, исследуется движение вязкой ньютоновской жидкости (например, воды) при малых числах Рейнольдса (ламинарное течение). При исследовании турбулентного движения жидкости с помощью эмпирических моделей этим методом вы сможете оценить только точность решения исходных уравнений, но не задачи!
- Во-вторых, решите задачу, близкую к моделируемой, для которой известны экспериментальные результаты или данные других авторов. Например, если вы решаете задачи аэродинамики крыла, то промоделируйте обтекание профиля NACA0012, для которого в литературе можно найти результаты расчетов и экспериментов для широкого диапазона скоростей. На таких задачах можно подобрать оптимальное соотношение точность расчета / грубость сетки, которое потом можно будет использовать для решения своих задач.
- В-третьих, всегда контролируйте характеристики течения, которые могут быть вам известны хотя бы предположительно (перепады давлений, максимальная температура, плотность). Очень часто бывает, что такой контроль позволяет оценить точность получаемого решения без использования трудоемких способов, описанных выше.

1.3 Часто задаваемые вопросы

В этом разделе приводятся ответы на вопросы, наиболее часто задаваемые пользователями и представляющие наибольшие затруднения.

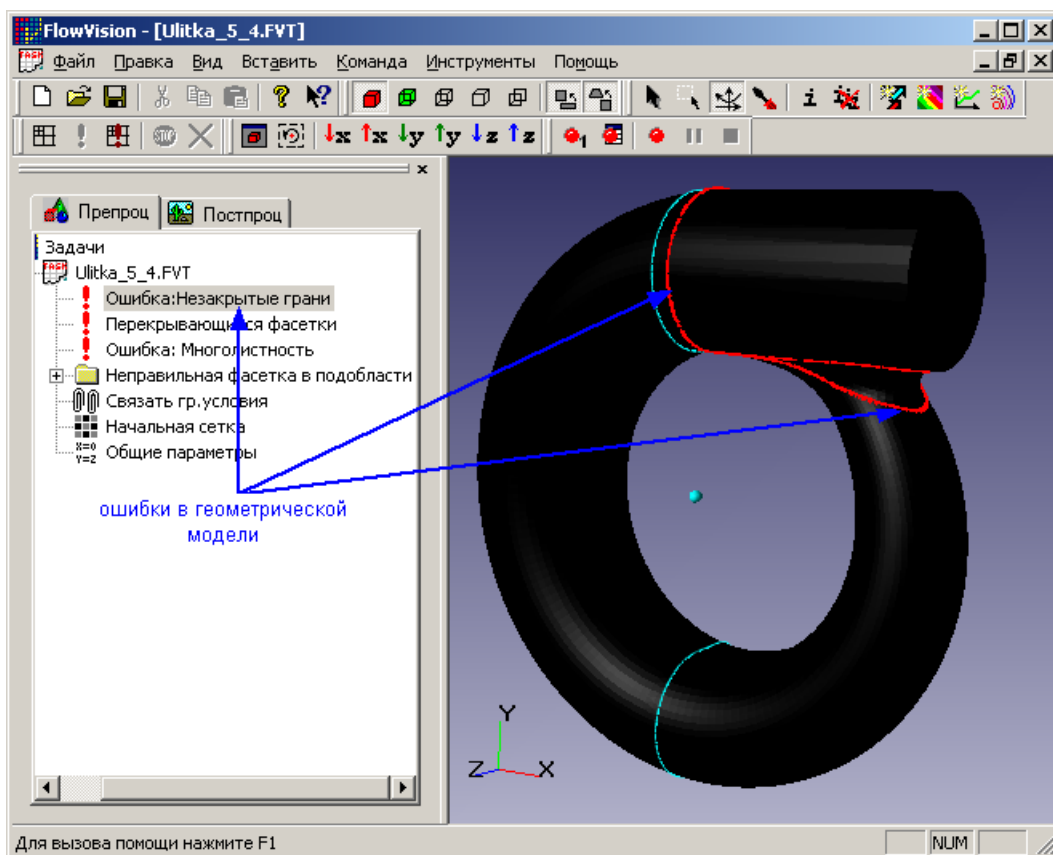
1.3.1 Можно ли работать с FlowVision без ключа защиты?

В зависимости от типа лицензии во **FlowVision** используются аппаратный или программный ключи защиты (особенности регистрации программы в каждом из этих случаев см. на инсталляционном диске в файле **ReadmeRus.exe**).

Если не используется ни аппаратный, ни программный ключ защиты, то **FlowVision** будет работать в режиме демо-версии. При этом ограничения демо-версии действуют только на этапе расчета (задавать вариант, просматривать результаты уже рассчитанных вариантов можно без каких бы то ни было ограничений).

1.3.2 Что делать, если при загрузке геометрии выдается сообщение об ошибках?

При загрузке геометрии из выбранного файла выполняется анализ, разбиение на поверхности и замкнутые подобласти. Если в процессе импортирования были обнаружены ошибки в геометрической модели, то эти ошибки будут отображаться в дереве и графическом окне варианта красным цветом.



Имеются следующие способы исправления ошибок при вставке геометрии:

- Во **FlowVision** качество вставляемого изображения регулируется в **Файл Предусетовки Допуск**. Если возникают ошибки **Незакрытые грани**, то **Допуск** лучше уменьшать (по абсолютному значению), если возникают ошибки **Многолиственность**, то — увеличивать.
- Можно исправить проблемы в исходной геометрии, загрузив ее во **Flow3D Vision**. Произвести там сшивку (и при необходимости ручное исправление) поверхностной сетки. Затем через формат **mesh** загрузить исправленную геометрию во **FlowVision**.
- Также существуют возможности корректировки геометрии в различных системах САПР. Например, в **SolidWorks** имеются следующие возможности:
 - Если при вставке геометрии во **FlowVision** используется формат **WRML**, то желательно сохранять **wrl** файл с наилучшим качеством изображения. Оно устанавливается в **Инструменты Параметры Качество Изображения** кнопка "Качество изображения" **Качество полутоновой закрашки**, переключатель — в крайнем правом положении (точность максимальна). Если возникают проблемы с геометрией, то этот параметр можно изменять в более грубую сторону, но, как правило, наилучшей является максимальная точность.

- Сохранение исходной геометрии в других форматах: **IGES**, **STL** и т.д.
- Сглаживание острых кромок и другие изменения геометрии.

1.3.3 Что делать в ситуации Т-образных поверхностей?

FlowVision не позволяет загружать геометрию с Т-образными поверхностями. Такие ситуации возникают при решении задач сопряженного теплообмена, например течения в трубе с толстыми металлическими стенками.

Проблема загрузки геометрии в подобных задачах решается несколькими способами:



- Задать две трубы и жидкость внутри трубы как два отдельных твердых тела. Недостаток этого способа состоит в том, что таким образом вдвое увеличивается расчетная область.
- Изменить геометрию, добавив тонкие стенки там, где были Т-образные поверхности. На границе этих фиктивных стенок задаются адиабатические граничные условия (**Симметрия**). Недостаток этого способа заключается в том, что он искажает физическую картину процесса. Если в задаче решается уравнение энергии, введение таких стенок приведет к возникновению тепловых мостов.

1.3.4 Как продолжить старый расчет с новой геометрией?

Следует обратить внимание на то, что данная операция допустима только в тех случаях, когда варианты геометрии отличаются друг от друга незначительным образом, т.е. количество подобластей, граничных условий, параметры модели и т.д. остаются неизменными. В противном случае, если отличия между вариантами являются существенными, пользоваться вставкой геометрии не следует, т.к. это приведет к возникновению трудно устранимых ошибок.

Для того, чтобы импортировать новую геометрию в старый вариант:

- Выберите пункт главного меню **Вставить Геометрия**.
- В окне **Открыть** выберите тип импортируемого файла и сам файл и нажмите кнопку **Открыть**.
- После этого новая геометрия будет импортирована в вариант, проанализирована, разбита на поверхности и замкнутые подобласти. Структура нового варианта появится в рабочем окне, а изображение геометрии в графическом окне. Расчетная сетка будет автоматически растянута или сжата так, чтобы совпадать с границами новой геометрии.
- После импортирования новой геометрии существует несколько возможностей продолжения процесса расчета:
 - обновить геометрическую информацию в ячейках сетки и продолжать расчет, используя старые сетку и значения переменных;
 - обновить геометрическую информацию в ячейках сетки и продолжать расчет, используя старые сетку, но не использовать значения переменных из предыдущего расчета;
 - начать расчет сначала, т.е. не использовать ни сетку, ни значения переменных из предыдущего расчета.

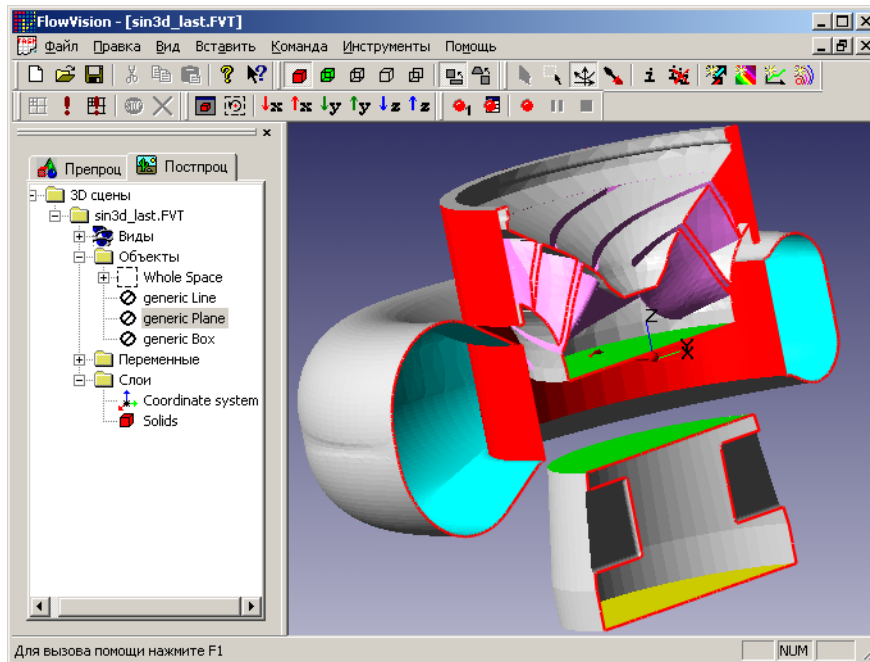
1.3.5 Как решать задачи взаимодействия ротор-статор?

Чтобы решать задачи взаимодействия ротор-статор, необходимо воспользоваться граничным условием **Скользкая поверхность**. Граничное условие **Скользкая поверхность** предназначено для расчета течения жидкости и газа в устройствах, в которых есть вращающиеся и неподвижные части (ротор-статор).

Для того чтобы воспользоваться этим граничным условием, нужно выделить расчетные области, связанные с ротором и со статором. Статор задается своей областью расчета, ротор – своей. Для каждой области расчета задается своя скорость вращения.

У областей расчета ротора и статора должны быть выделены цилиндрические поверхности сопряжения равной высоты и радиуса. На этих поверхностях устанавливается граничное условие **Скользкая**

поверхность, которое затем связывается в папке **Связать гр.условия**.



Разрез насоса. Скользящие поверхности показаны красным цветом.

1.3.6 Как решать задачи с подвижным телом?

Задачи с подвижными телами можно решать следующим образом:

- Задать геометрию расчетной области и движущихся тел в САПР.
- Создать рассчитываемый вариант, загрузив во **FlowVision** файл геометрии, содержащий расчетную область.
- Затем вставить файл с вращающимся телом, используя **Фильтр подвижного тела**.
- Указать параметры движения тела, начальное положение и связать с граничными условиями.

1.3.7 Как правильно выбрать шаг по времени?

При выборе шага по времени следует исходить в первую очередь из того, какие математические модели используются в данной задаче.

Для большинства используемых моделей можно дать следующие общие рекомендации:

- Для модели **Твердый материал** шаг по времени может быть оценен, исходя из оценки времени прогрева неравномерно прогретого тела:

$$\tau = \frac{l^2}{\chi},$$

где l – характерный размер тела, $\chi = \lambda / (\rho C_p)$ – коэффициент температуропроводности.

- Для моделей **Ламинарная жидкость**, **Несжимаемая жидкость**, **Слабосжимаемая жидкость** и **Модель горения** шаг по времени можно задать равным одной десятой пролетного времени. Пролетным временем называется то время, которое потребуется частице, выпущенной из входа в расчетную область, чтобы достигнуть выхода расчетной области.
- Для модели **Свободная поверхность** шаг по времени следует задавать исходя из Куранта равного 1.
- Для модели **Полностью сжимаемая жидкость** шаг по времени зависит от сходимости уравнений по давлению. Первоначальный шаг по времени следует задавать аналогично моделям **Ламинарная жидкость**, **Несжимаемая жидкость** и т.д. Если при таком шаге сходимости по давлению нет, то шаг нужно уменьшать.

Если в задаче присутствуют несколько подобластей с разными моделями, и характерные времена процессов по каждой из моделей существенно отличаются друг от друга, то рекомендуется воспользоваться такой возможностью **FlowVision**, как расчет с собственным шагом по времени.

1.3.8 Как задать турбулизацию набегающего потока?

При использовании моделей турбулентности необходимо задавать как начальную турбулизацию потока во всей области, так и турбулизацию потока на входном граничном условии. Для задания турбулизации набегающего потока используются следующие характеристики:

- b – турбулизация потока (отношение турбулентной кинетической энергии к кинетической энергии осредненного течения)
 $b < 0.03$ – низкая турбулизация потока
 $0.03 < b < 0.05$ – средняя турбулизация потока
 $0.05 < b < 0.1$ – высокая турбулизация потока
- l – масштаб турбулентности (характерный размер вихря)
Для внутренних течений обычно выбирается как $1/10$ характерного размера входного сечения, для внешнего обтекания принимается как $1/10$ характерного размера обтекаемого тела.

1.3.9 Как посмотреть одни и те же слои визуализации в разных вариантах?

Чтобы посмотреть одни и те же слои визуализации, следует воспользоваться сохранением и загрузкой статуса постпроцессора. Варианты, в которых просматриваются одни и те же слои визуализации, должны отличаться несущественно.

При сохранении состояния постпроцессора в файл *.fvs записывается вся информация из постпроцессора (слои визуализации, набор 3D видов и т.д.). При загрузке сохраненного статуса постпроцессора вся информация о текущем состоянии постпроцессора будет уничтожена и заменена новой.

1.3.10 Как определить коэффициент сопротивления тела при его обтекании жидкостью?

Напрямую во **FlowVision** нельзя определить коэффициент сопротивления. Для этого нужно рассчитать силу сопротивления. Это делается следующим образом: в препроцессоре создается супергруппа на интересующем теле (это можно сделать из граничного условия), затем созданная супергруппа экспортируется в постпроцессор, в постпроцессоре создается слой визуализации **Характеристики из Давление**. В этом слое присутствуют x , y , z компоненты силы, действующей на объект, и x , y , z компоненты силы, действующей на объект с учетом силы трения. Соответственно, выбирается нужный компонент силы сопротивления. Чтобы получить значение коэффициента сопротивления значение силы трения нужно разделить на динамический напор и нужную площадь.

1.3.11 Каким образом можно установить, что рассчитываемый вариант сошелся?

Окончание расчета может проводиться:

- автоматически:
 - по заданному значению невязки выбранного параметра (**Параметры метода Стоп при**);
 - по заданному конечному времени процесса;
- вручную пользователем
 - пользователь может сам визуализировать в окне постпроцессора интересующую его величину и следить за ее изменением или создать слой **Характеристики** для интересующей переменной и сохранять значение этой переменной в файл, а затем во внешнем редакторе построить график зависимости данной величины от времени.

Последний способ является предпочтительным, т.к. он является наиболее наглядным и надежным.

1.3.12 Как загрузить GLO-файл в Excel?

При открытии GLO-файла с помощью **Microsoft Excel** следует учесть:




- если GLO-файл будет открыт обычным образом в то время, как в него записываются данные **FlowVision**, то эти данные дописаны в этот файл не будут. Таким образом, открывать GLO-файл обычным образом в процессе расчета нельзя. В этом случае его нужно открывать как внешние данные (**Данные Импорт внешних данных**).
- **FlowVision** использует в качестве разделителя целой и дробной части точку, а **Excel** – тот символ, который указан в региональных настройках **Windows**. По умолчанию это запятая. Если при импортировании в **Microsoft Excel** данные из GLO-файла не распознаются как численные, то следует заменить разделитель в региональных настройках на точку.

1.3.13 Как сделать анимацию нестационарного процесса?

Во **FlowVision** имеется возможность сохранять серии изображений как в процессе расчета, так и после завершения расчета:

- Если изображения сохраняются в процессе расчета, то таким образом можно сохранить только одну последовательность изображений рабочего окна (при этом любые изменения в рабочем окне отразятся в сохраняемых изображениях).
- Если изображения сохраняются после проведения расчета, то можно сохранить любое количество последовательностей изображений, причем выбор какие именно последовательности будут сохраняться можно проводить уже после завершения расчета. Но для того, чтобы получить такую возможность, в процессе расчета необходимо сохранять копии файла варианта.

FlowVision позволяет сохранять последовательности изображений в следующих графических форматах: **Windows bitmap** (*.bmp), **Targa** (*.tga), **Portable network graphics** (*.png). На основе сохраненных изображений можно создавать анимации нестационарных процессов. Создание анимаций может быть сделано в любом внешнем пакете, например, [GIF Movie Gear](#) (программы для создания анимаций в комплект **FlowVision** не входят).

Для сохранения серии изображений в процессе расчета воспользуйтесь следующими инструментами панели **Захват**:  Начать сохранение последовательности картинок в файлы,  Приостановить/продолжить сохранение картинок в файл,  Остановить сохранение картинок в файл. Последовательность изображений будет сохраняться в папке **RENDER** (автоматически создаваемой в месте нахождения файла варианта).

Для сохранения серии изображений для последовательности предварительно записанных вариантов необходимо выполнить следующие действия:

1. Записать последовательность вариантов **FlowVision**. Для этого нужно активизировать опцию **Общие параметры** **Время** **Создавать копии файла**, указать период сохранения вариантов и запустить задачу на расчет (см. том [Руководство пользователя](#)).
2. После того как будет проведен расчет и сохранены промежуточные результаты, необходимо в одном из записанных вариантов создать слои визуализации и сохранить их в сцены, каждая из которых будет соответствовать своей серии изображений (см. том [Руководство пользователя](#)).
3. Затем на основе сохраненных сцен с помощью кнопки  панели **Захват** создается и сохраняется файл сценария (см. том [Руководство пользователя](#)).
4. В завершении в каком-либо текстовом редакторе нужно создать исполняемый **batch**-файл и сохранить его в расширении **fvb**. Этот файл должен иметь следующий вид:

```
scenario.xml
var1_0000.fvt
var1_0001.fvt
var1_0002.fvt
```

В первой строке этого файла указан файл сценария, в последующих строках – файлы вариантов, которые необходимо обработать.
5. После выполнения всех перечисленных действий с помощью инструмента **Инструменты** **Пакетная обработка** в диалоге выбора **batch**-файла указывается созданный **fvb**-файл.

После выполнения **batch**-файла последовательность изображений будет сохранена в папке **RENDER** (автоматически создаваемой в месте нахождения файлов варианта).

2 Руководство пользователя

2.1 Интерфейс пользователя FlowVision

В этой главе рассматриваются некоторые основные понятия и терминология, используемые в системе **FlowVision**. В ней описываются следующие темы:

- [Термины интерфейса FlowVision.](#)
- [Рабочее окно препроцессора FlowVision.](#)
- [Выбор элементов варианта.](#)
- [Контекстные меню.](#)
- [Предустановки FlowVision.](#)

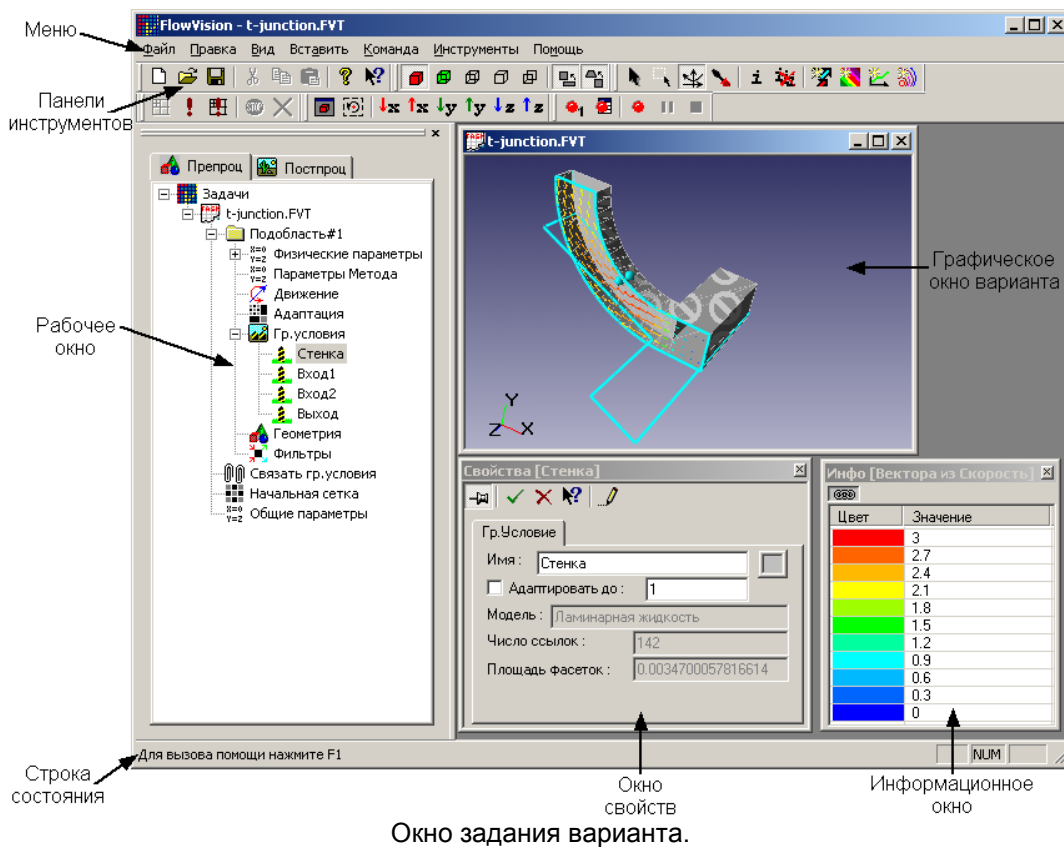
2.1.1 Термины интерфейса FlowVision

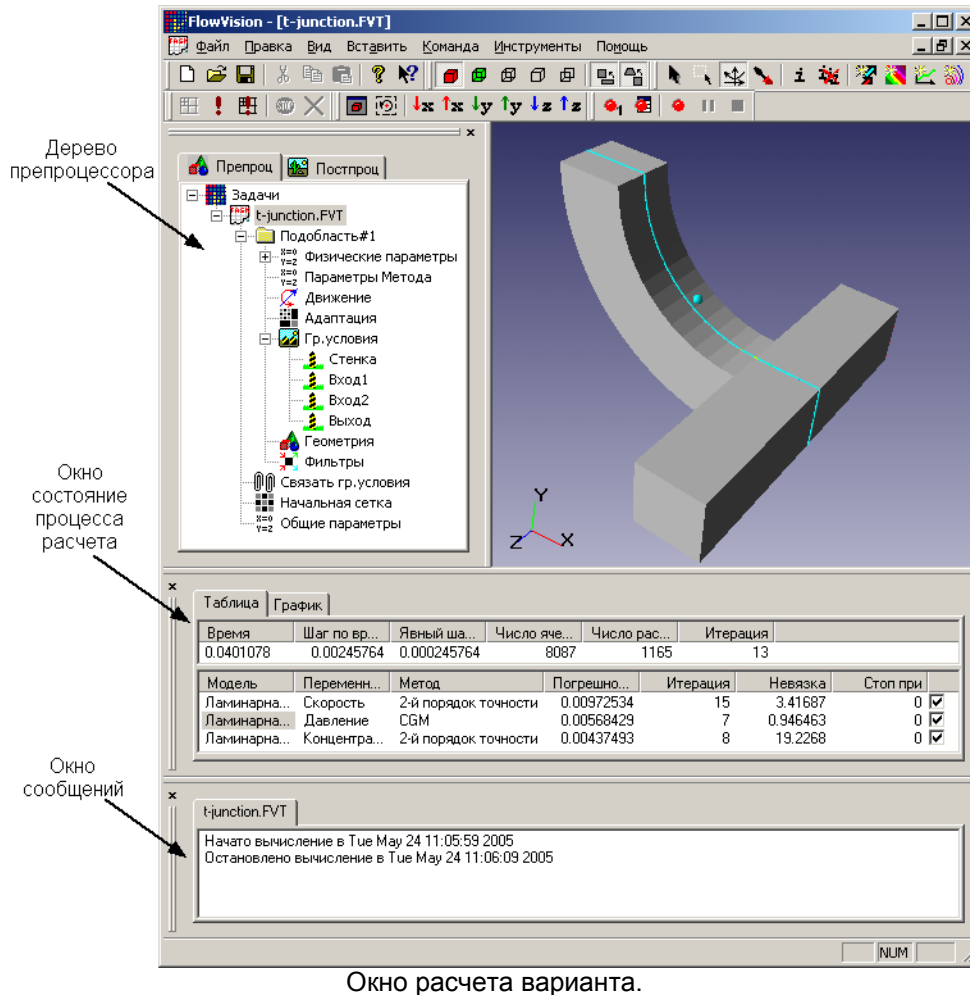
В этом разделе определяются и иллюстрируются основные термины интерфейса **FlowVision**.

Документ или файл, с которым работает **FlowVision**, называется вариантом.

Вариант включает в себя геометрическую информацию, расчетную сетку, физические модели, параметры расчета, данные расчета и информацию постпроцессора.

При создании нового варианта вначале импортируется геометрическая информация, затем задаются расчетная сетка, физические модели и параметры расчета. После этого проводится расчет, и с помощью постпроцессора анализируются полученные данные.





Окно расчета варианта.

2.1.2 Получение справки

Ответы на вопросы, возникающие при работе в **FlowVision**, могут быть получены следующими способами:

- Получение оперативной справки **FlowVision**:
 - Чтобы получить справочную информацию о конкретном активном диалоговом окне, нажмите кнопку или нажмите клавишу **F1**.
 - Нажмите кнопку в главной панели инструментов или выберите **Помощь**, **Помощь по темам** для обращения к справочной системе.
- Всплывающие подсказки предоставляют информацию о кнопках на панелях инструментов и в диалоговых окнах. Если ненадолго поместить указатель мыши над кнопкой, то появится всплывающая подсказка, отображающая название кнопки.
- При перемещении указателя мыши по значкам или выборе элемента меню, в строке состояния в нижней части окна **FlowVision** предлагается краткое описание функции кнопки или элемента меню.

2.1.3 Открытие варианта FlowVision

В этом разделе описывается открытие нового или уже существующего варианта.


2.1.3.1 Открытие нового варианта FlowVision

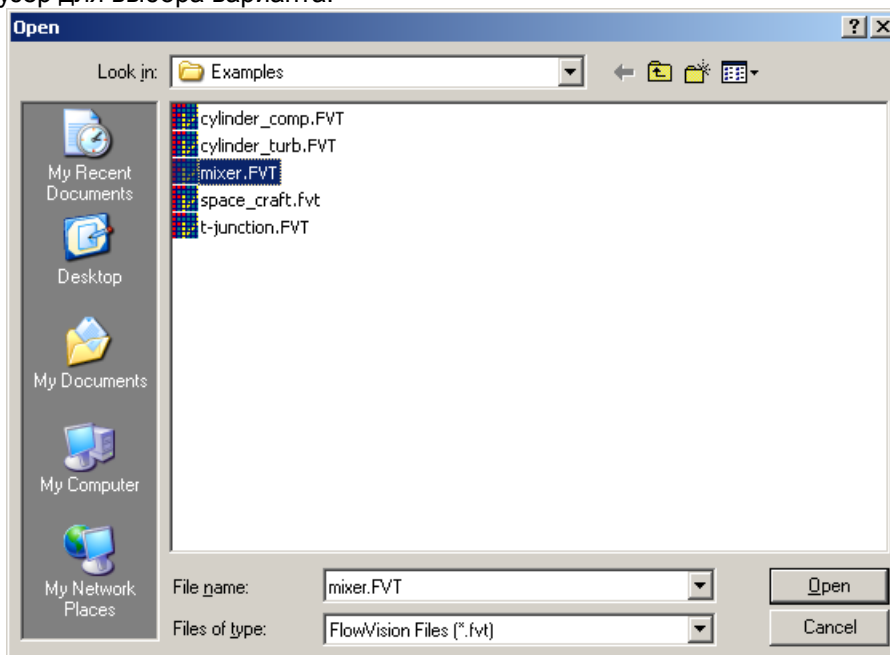
Чтобы открыть новый вариант:

В окне **FlowVision** нажмите кнопку на панели инструментов или выберите **Файл** **Создать** в меню.

2.1.3.2 Открытие существующего варианта FlowVision

Чтобы открыть существующий вариант:

В окне **FlowVision** нажмите кнопку  на панели инструментов или выберите **Файл Открыть...** в меню. Используйте браузер для выбора варианта.




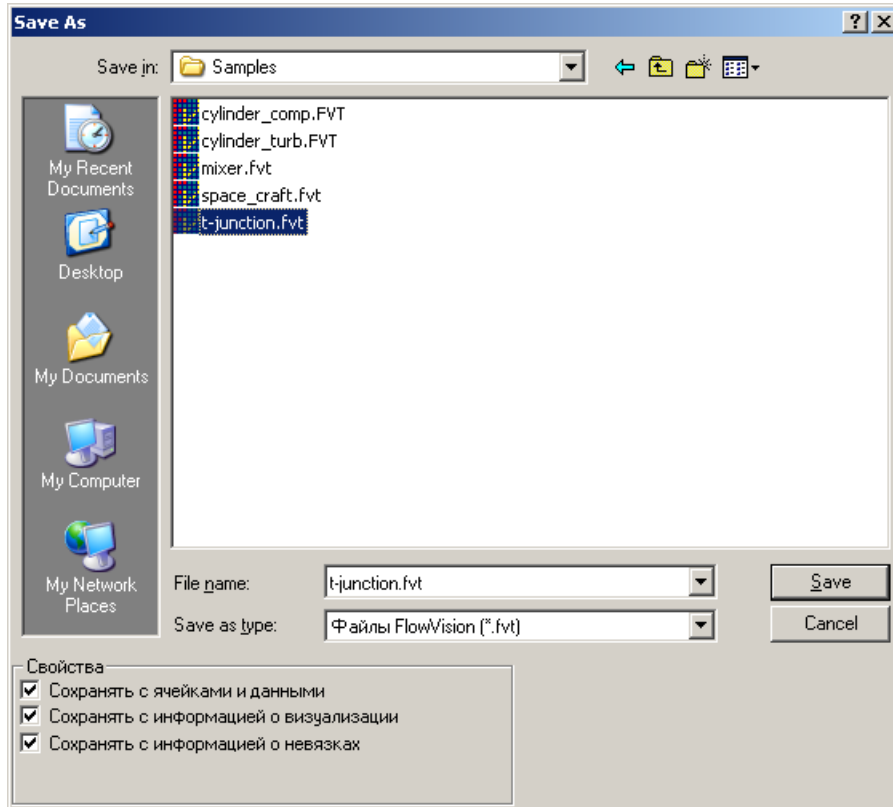
2.1.3.3 Открытие существующего варианта из Проводника

Чтобы открыть вариант **FlowVision** непосредственно из проводника **Microsoft**, выполните одно из следующих действий:

1. Дважды нажмите на имя варианта в **Проводнике**.
2. Нажмите правой кнопкой мыши на имя варианта в **Проводнике** и выберите **Открыть** в контекстном меню.
3. Перетащите любой вариант **FlowVision** из **Проводника** в пустую область окна **FlowVision**, не занятую другим окном с вариантом.

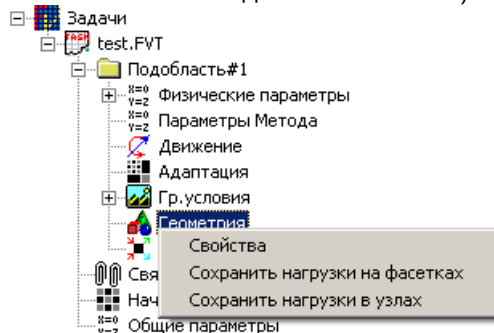
2.1.4 Сохранение варианта FlowVision

- Чтобы сохранить текущий вариант с результатами в формате **fvt**:
В окне **FlowVision** нажмите кнопку  на панели инструментов или выберите **Файл Сохранить** в меню.
- Чтобы сохранить пустой текущий вариант или вариант с результатами, но с другим именем в формате **fvt**:
Выберите **Файл Сохранить как...** в меню. Используйте браузер для выбора пути и имени варианта.

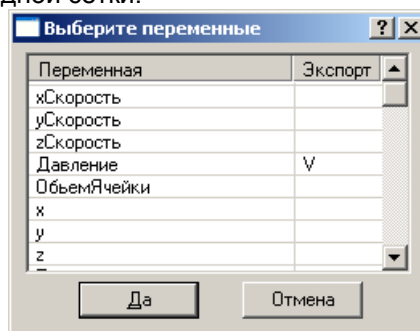


Также в браузере имеется возможность выбора, какую информацию о варианте следует сохранять:

1. **Сохранять с ячейками и данными**
 2. **Сохранять с информацией о визуализации**
 3. **Сохранять с информацией о невязках**
- Чтобы экспортировать результаты на исходную конечноэлементную сетку:
 В том случае, если основная геометрия была импортирована из файла конечно-элементной сетки, в меню, выпадающее при нажатии правой кнопки мыши на элементе **Геометрия** выбранной подобласти дерева препроцессора, добавляются пункты **Сохранить нагрузки на фасетках** – сохранение результатов на сторонах, и **Сохранить нагрузки в узлах** – сохранение результатов в узлах (в настоящий момент реализовано только для сеток **ANSYS**):



При выборе этого пункта пользователю предлагается выбрать экспортируемые переменные и задать имя сохраняемого файла, после чего осуществляется экспорт значений в этот файл в формате, соответствующем формату исходной сетки.

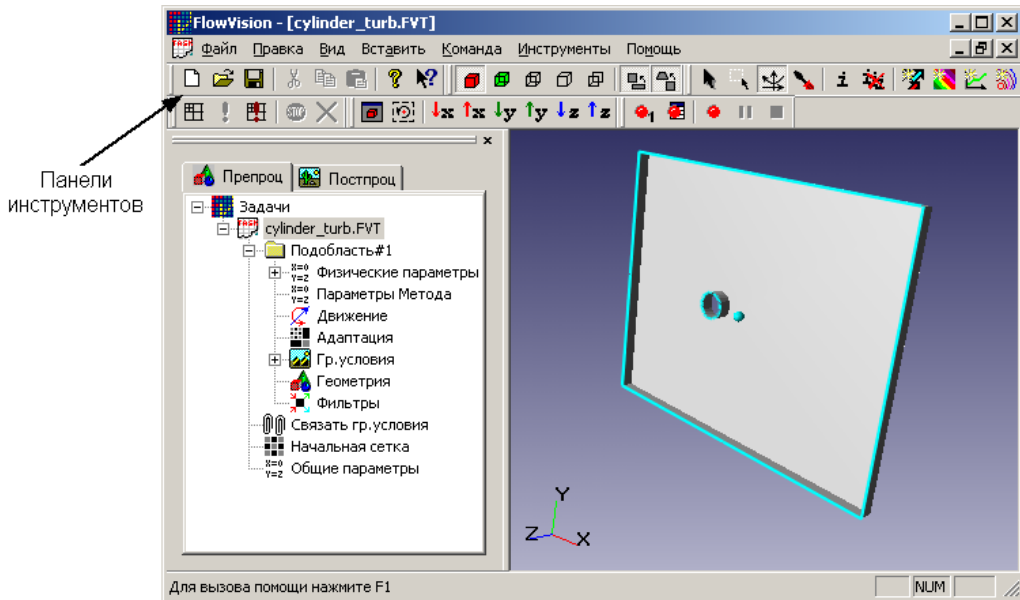


Экспорт результатов для конечноэлементных сеток осуществляется в файлы следующего содержания:

- Для сеток **ABAQUS**:
 1. Результаты в узлах: не поддерживаются
 2. Результаты на сторонах (**dld**-файл):
***DLOAD, OP=NEW**
`<elem>, P<side>, <value1>, <value2>, ... , <valueN>`
 . . .
`<elem>, P<side>, <value1>, <value2>, ... , <valueN>`
 где:
`<elem>` – номер элемента
`<side>` – номер стороны
`<value1>...<valueN>` – значения экспортируемых переменных.
- Для сеток **NASTRAN**
 1. Результаты в узлах: не поддерживаются
 2. Результаты на сторонах (**dat**-файл):
BEGIN DATA
FACE <elem><side><value1><value2>...<valueN>
 . . .
FACE <elem><side><value1><value2>...<valueN>
ENDDATA
 где:
`<elem>` – номер элемента
`<side>` – номер стороны
`<value1>...<valueN>` – значения экспортируемых переменных
 Каждое поле занимает 8 символов (включая ключевое слово **FACE**, которое таким образом дополнено справа четырьмя пробелами), поля записаны без разделителей.
- Для сеток **ANSYS**
 1. Результаты в узлах (текстовый файл):
D,<node>, VALS,<value1>,<value2>,...,<valueN>
 . . .
D,<node>, VALS,<value1>,<value2>,...,<valueN>
 где:
`<node>` – номер узла
`<value1>...<valueN>` – значения экспортируемых переменных
 2. Результаты на сторонах (текстовый файл):
ELEM,<elem>,SIDE,<side>,VALS,<value1>,<value2>,...,<valueN>
 . . .
ELEM,<elem>,SIDE,<side>,VALS,<value1>,<value2>,...,<valueN>
 где:
`<elem>` – номер элемента
`<side>` – номер стороны
`<value1>...<valueN>` – значения экспортируемых переменных.

2.1.5 Панели инструментов

Кнопки панели инструментов – это сокращенный вариант меню для часто используемых команд. На показанном ниже первоначальном экране **FlowVision** отображены все имеющиеся панели инструментов, но, возможно, что используемое окно **FlowVision** не будет организовано подобным образом. Можно разместить панели инструментов так, как это будет удобно.



Чтобы отобразить или скрыть отдельные панели инструментов, выберите **Вид Панели инструментов**. Появится список всех панелей инструментов. Панели инструментов, отмеченные галочкой, видны на экране; а те, которые не отмечены, скрыты. Нажмите на имя панели инструментов, чтобы поставить (или наоборот убрать) галочку.

2.1.5.1 Размещение панелей инструментов

Для размещения панелей инструментов нажмите на свободное пространство между кнопками и потяните мышью.

Если перетащить панель инструментов на кромку окна **FlowVision**, она установится на кромке автоматически.


Если перетащить панель инструментов подальше от кромки окна, она станет плавающей, т.е. в виде отдельного окна, свободно перемещаемого по экрану.

2.1.5.2 Панель инструментов Геометрия

Панель инструментов **Геометрия** предоставляет инструменты для изменения способа отображения варианта в графическом окне.









Непрозрачные фасетки	Твердые тела отображаются в виде набора непрозрачных раскрашенных фасеток. Каждая сторона фасетки имеет свой цвет.
Односторонне-прозрачные фасетки	Твердые тела отображаются в виде набора непрозрачных раскрашенных фасеток. В этом случае у каждой фасетки отображается только одна сторона. Твердые тела отображаются с прозрачными передними поверхностями.
Каркасное представление	Отображает все ребра фасеток, из которых состоят твердые тела.
Каркасное с невидимыми линиями	Отображает только те ребра фасеток, которые видны в режиме отображения твердых тел непрозрачными фасетками. Невидимые ребра удаляются.
Границы групп	Отображаются только границы групп фасеток.
В пропорциях или нет	Пропорции изображения на экране такие же, как у геометрических тел в пространстве объектов. При отключении этого режима пропорции зависят от отношения длины к ширине графического окна. В случае квадратного окна нажатие этой кнопки не производит никакого эффекта. Этот режим используется для отображения сильно вытянутого объекта.


 В перспективе или нет	Кнопка имеет два положения – нажатое и отжатое. В нажатом положении изображение 3D сцены в графическом окне имеет перспективную проекцию. Параметры перспективной проекции фиксированы и не могут быть изменены пользователем. В отжатом состоянии изображение 3D сцены в графическом окне имеет параллельную проекцию. По умолчанию кнопка нажата.
---	---

2.1.5.3 Панель инструментов Режимы

Панель инструментов **Режимы** предоставляет инструменты для манипулирования видом варианта в графическом окне и создания основных слоев визуализации полученных результатов.




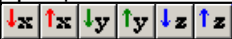


 Выбрать	<p>Режим выбора элементов геометрии с экрана.</p> <p><i>Чтобы выбрать элемент поверхности с экрана:</i> наведите на него курсор и нажмите левую кнопку мыши.</p> <p><i>Для выбора другой стороны данного объекта:</i> после выбора объекта нажмите правую кнопку мыши и выберите команду Выбрать другую сторону в контекстном меню.</p> <p><i>Для выбора скрытого элемента:</i> наведите курсор на то место изображения, под которым находится нужный вам объект. Нажмите левую кнопку мыши — при этом будет выбран ближайший объект. Нажмите правую кнопку мыши и выберите команду Выбрать следующую в контекстном меню — будет выбран следующий по порядку объект. И так до тех пор, пока не будет выбран нужный объект.</p>
 Увеличить элемент изображения / Уменьшить часть сцены, видимую в окне	<p>Увеличивает часть изображения, выбранную в рамку. Поместите курсор в то место, где должен располагаться один из углов рамки и нажмите левую кнопку мыши.</p> <p>С нажатой левой кнопкой потащите курсор по диагонали в противоположный угол ограничивающей рамки.</p> <p>Отпустите курсор. Область, захваченная рамкой, будет растянута на все окно.</p> <p>Уменьшает часть сцены варианта, видимую в его графическом окне. Щелкните правой кнопкой мыши в точку графического окна. При этом часть сцены, видимая в окне уменьшится и станут видны детали сцены, скрытые за рамкой окна. Точка щелчка станет центром нового вида.</p>
 Изменение вида	<p>Позволяет динамически настроить угол зрения и расположение сцены:</p> <p>Для изменения угла зрения нажмите левую кнопку мыши:</p> <p>Чтобы повернуть изображение относительно вертикальной оси, передвигайте мышь слева направо.</p> <p>Чтобы повернуть изображение относительно горизонтальной оси, передвигайте мышь сверху вниз.</p> <p>Чтобы повернуть изображение относительно диагонали, передвигайте мышь по диагонали.</p> <p>Для перемещения изображения нажмите правую кнопку мыши и, удерживая ее, передвигайте курсор по экрану.</p> <p>Для увеличения или уменьшения изображения нажмите правую и левую кнопки мыши одновременно:</p> <p><i>Чтобы увеличить изображение,</i> передвигайте курсор вверх по экрану, удерживая обе кнопки.</p> <p><i>Чтобы уменьшить изображение,</i> передвигайте курсор вниз по экрану, удерживая обе кнопки.</p>
 Настройка параметров слоя	<p>Динамическая настройка параметров графического слоя. Действия этого инструмента зависят от типа выбранного графического слоя. Смотрите описание для каждого слоя в отдельности (Слой визуализации).</p>
 Открытие окна Инфо для выбранного элемента	<p>Открывает окно Инфо для выбранного элемента дерева. Смотрите описание работы с окном Info в обзоре постпроцессора.</p>
 Закрыть все открытые окна Инфо	<p>Закрывает все открытые окна Инфо.</p>

 <p>Создание нового слоя Вектора</p>	<p>Позволяет быстро создать слой Вектора для визуализации векторного поля. По умолчанию в качестве базовой переменной выбрана скорость, а в качестве базового объекта предлагается выбрать плоскость. При создании нового слоя с помощью этой кнопки можно изменять базовые переменные. Подробное описание работы с этим слоем смотрите в разделе Вектора.</p>
 <p>Создание нового слоя Заливка</p>	<p>Позволяет быстро создать слой Заливка для визуализации распределения скалярной переменной на поверхности с помощью цветовых переходов. По умолчанию в качестве базовой переменной выбрана плотность, а в качестве базового объекта предлагается выбрать плоскость, на которой будет создана заливка. При создании нового слоя с помощью этой кнопки можно изменять базовые переменные. Подробное описание работы с этим слоем смотрите в разделе Заливка.</p>
 <p>Создание нового слоя Двумерный График</p>	<p>Позволяет быстро создать слой Двумерный График, который выводит на экран график скалярной переменной вдоль выбранного в трехмерном пространстве луча. По умолчанию в качестве базовой переменной выбрана плотность, а в качестве базового объекта предлагается выбрать плоскость, в которой будет лежать график. При создании нового слоя с помощью этой кнопки можно изменять базовые переменные. Подробное описание работы с этим слоем смотрите в разделе Двумерный График.</p>
 <p>Создание нового слоя Изолинии</p>	<p>Позволяет быстро создать слой Изолинии для визуализации распределения скалярной переменной на поверхности с помощью изолиний. По умолчанию в качестве базовой переменной выбрана плотность, а в качестве базового объекта предлагается выбрать плоскость, на которой будет создан слой визуализации. При создании нового слоя с помощью этой кнопки можно изменять базовые переменные. Подробное описание работы с этим слоем смотрите в разделе Изолинии.</p>





2.1.5.4 Панель инструментов Виды



Панель инструментов **Виды** содержит кнопки для управления видом.

	
 <p>Изменить в размер экрана</p>	<p>Изменяет масштаб изображения так, чтобы вариант был виден полностью.</p>
 <p>Установить центр вращения</p>	<p>Перемещает центр вращения изображения в его положение по умолчанию (центр региона).</p>
 <p>Показать вариант в одном из стандартных видов</p>	<p>Позволяет построить 3D сцену в стандартных видах навстречу/вдоль оси X, Y или Z.</p>

2.1.5.5 Панель инструментов Расчет

Панель инструментов **Расчет** содержит кнопки для управления процессом расчета.

	
 <p>Построение сетки</p>	<p>Построить сетку, провести адаптацию по геометрии и обновить геометрическую информацию в ячейках.</p>
 <p>Запуск на расчет</p>	<p>Запустить расчет варианта на уже построенной сетке.</p>
 <p>Построение сетки и запуск на расчет</p>	<p>Построить сетку, провести адаптацию по геометрии, обновить геометрическую информацию в ячейках и запустить расчет варианта.</p>






 Остановка расчета	Остановить расчет после окончания текущей итерации по времени.
 Аварийное завершение расчета	Аварийная остановка расчета, не дожидаясь окончания текущей итерации. Используется в случае, если решение расходится или становится неправдоподобным. После аварийной остановки данные этого варианта использовать не рекомендуется.

Более подробное описание приведено в разделе [Процесс расчета](#).

2.1.5.6 Панель инструментов Захват

Панель инструментов **Захват** содержит кнопки для захвата изображения.



 Сохранить изображение в файл	Сохраняет графическое окно варианта в файл в одном из следующих форматов: Windows bitmap (*.bmp), Targa (*.tga), Portable network graphics (*.png).
 Записать состояния постпроцессора в файл	Сохраняет последовательность предварительно записанных состояний постпроцессора. Можно задать количество промежуточных кадров между ними, после этого будут интерполированы параметры статусов и построены картинки промежуточных состояний. Подробное описание этого инструмента приведено в разделе Отрисовка сценария .
 Начать сохранение последовательности картинок в файл	Начинает сохранять графическое окно в файл. Сохранять можно: периодически через указанное количество итераций, периодически через указанный шаг по времени, при каждом обновлении графического окна.
 Приостановить/продолжить сохранение картинок в файл	Временно прекращает или возобновляет сохранение графического окна в файл.
 Остановить сохранение картинок в файл	Прекращает сохранение графического окна в файл.

2.1.6 Рабочее окно препроцессора FlowVision

При открытии любого варианта в рабочем окне появляется информация об этом варианте. В этом окне с помощью дерева варианта отображена вся структура варианта.

Дерево варианта упрощает:

- Выбор элементов варианта по имени.
- Определение и задание свойств элементов.
- Переименование элементов, которое можно выполнить, медленно нажав дважды на имя и введя новое имя (так же, как в **Windows**). Можно также поместив курсор на элемент нажать правую кнопку мыши, выбрать **Переименовать** из контекстного меню и ввести новое имя.

2.1.7 Контекстные меню

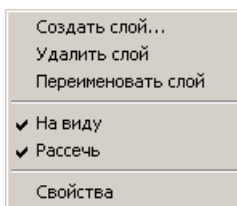
Во время работы с вариантом есть доступ к множеству различных инструментов и команд контекстного меню, появляющегося при нажатии правой кнопки мыши. Использование контекстных меню – это рациональный способ работы, при котором не нужно тратить время на перемещение курсора к основным меню или кнопкам панели инструментов.

При перемещении курсора по элементам дерева препроцессора или постпроцессора, нажатие правой кнопки мыши на каком-либо элементе вызывает меню, предназначенных ему команд.

Например, в [постпроцессоре](#) для графического слоя с помощью правой кнопки мыши можно:

- создать новый графический слой;
- удалить слой;
- изменить имя слоя;
- скрыть или отобразить слой в графическом окне;
- позволить или запретить отсечение этого слоя другими плоскостями отсечения;

- просмотреть или изменить свойства этого слоя.




2.1.8 Способы выбора

При работе с вариантом в пре- и постпроцессоре всегда требуется сначала выбрать элемент, который необходимо изменить. Выбор элемента можно производить несколькими способами:

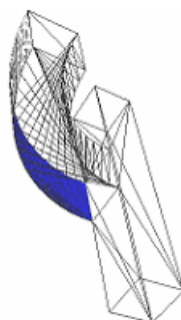
- [выбор в графическом окне](#),
- [выбор скрытых или совпадающих элементов](#),
- [выбор в дереве варианта](#).

2.1.8.1 Выбор в графическом окне

Нажмите кнопку  (инструмент выбора), затем в графическом окне нажмите на элемент, который необходимо выбрать.

Выбранный элемент геометрии выделяется как на экране, так и в дереве варианта.

Обратите внимание, что каждый элемент геометрии имеет две стороны, но при выборе выделяется только одна сторона этого элемента. Активная сторона выделена своим цветом, а невыделенная сторона показана серым цветом с наложенной текстурой.



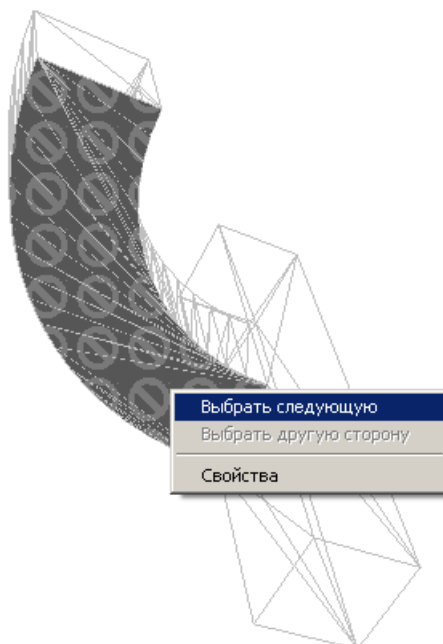
Если необходимо выбрать другую сторону этого элемента геометрии, то надо нажать правую кнопку мыши и из контекстного меню выбрать команду **Выбрать другую сторону**.

2.1.8.2 Выбор скрытых или совпадающих элементов

Иногда элемент, который необходимо выбрать, находится сзади или совпадает с другим элементом.

Для выбора скрытого элемента:

1. Нажмите левую кнопку мыши там, где необходимо сделать выбор. Выберется ближайший элемент.
2. Нажмите правую кнопку мыши. Появится контекстное меню.
3. Нажмите **Выбрать следующую** во всплывающем меню. Будет выделен следующий по порядку элемент геометрии.



4. Если нужен не этот, а один из последующих элементов, повторяйте пункты 2 и 3 до тех пор, пока не будет выделен нужный элемент геометрии.

Существует другой способ выбора скрытого элемента. Скрытый элемент можно сделать видимым с помощью отрезающей плоскости и затем выделять его как видимый. Создание и применение отрезающих плоскостей описано в разделе [Плоскость отсечения](#).

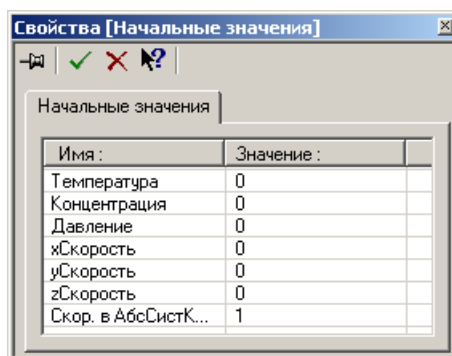
2.1.8.3 Выбор в дереве варианта

Можно выбирать элементы непосредственно в дереве, просто нажимая на их имена в дереве. Выбранный элемент будет выделен в графическом окне цветом.





2.1.9 Редактирование параметров элементов дерева



Для просмотра или изменения параметров любого элемента варианта, представленного в дереве:



- Выберите нужный элемент в дереве варианта, нажмите правую кнопку мыши и выберите пункт **Свойства** из контекстного меню.
- Появится окно **Свойства**, в котором будут присутствовать страницы с параметрами данного элемента. Свойства всех элементов дерева имеют стандартный вид: панель инструментов сверху и несколько страниц свойств ниже. Количество страниц и их содержание зависит от того, к какому параметру они относятся.



- Панель инструментов выглядит следующим образом: . Для некоторых элементов в панели могут появляться дополнительные кнопки.

	Оставить окно свойств на экране во время работы с другими окнами программы
	Немедленно применить все изменения
	Отменить все сделанные изменения
	Получить контекстную помощь

- Внесите необходимые изменения.
- Нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.
- Закройте окно **Свойства**.

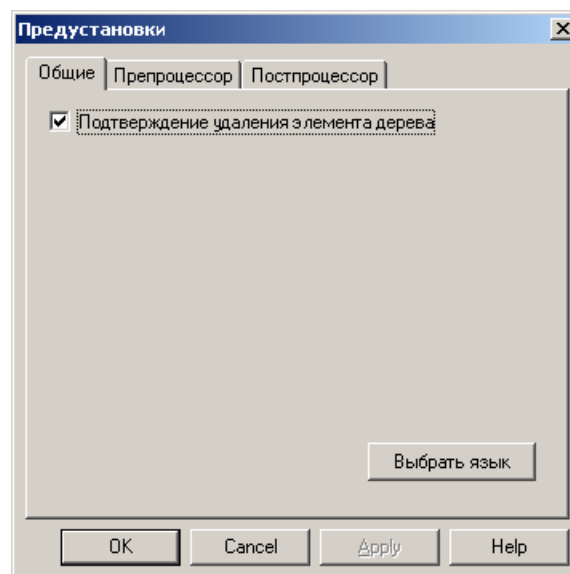
Отметим, что более удобно использовать окно свойств следующим образом. Приколите окно свойств с помощью кнопки . Затем выделяйте те элементы дерева, параметры которых надо посмотреть или изменить. При выделении каждого следующего элемента в окне свойств будут появляться страницы, относящиеся к этому элементу. Не забывайте нажимать кнопку  до выделения следующего элемента дерева. Иначе внесенные изменения будут потеряны.

2.1.10 Предустановки

FlowVision имеет ряд настроек, которые устанавливаются одинаковыми для всех вариантов. Эти настройки называются **Предустановки**. Изменение одной из предустановок воздействует на все открываемые в программе варианты. Предустановки устанавливаются в Окне **Предустановок**, вызываемом из пункта **Файл Предустановки** главного меню.

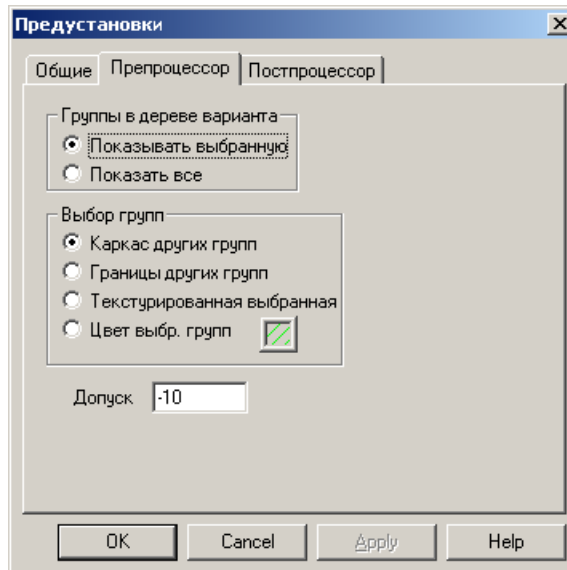
Значения предустановок запоминаются в файле **fv.ini**, который создается в директории, откуда запускается **FlowVision**, при первом запуске программы. Если при запуске **FlowVision** такой файл уже существует, то предустановки загружаются оттуда.

2.1.10.1 Общие предустановки



Общие предустановки позволяют включить или выключить требование подтверждения удаления элементов дерева и выбрать язык интерфейса. Эти установки общие для препроцессора и постпроцессора.

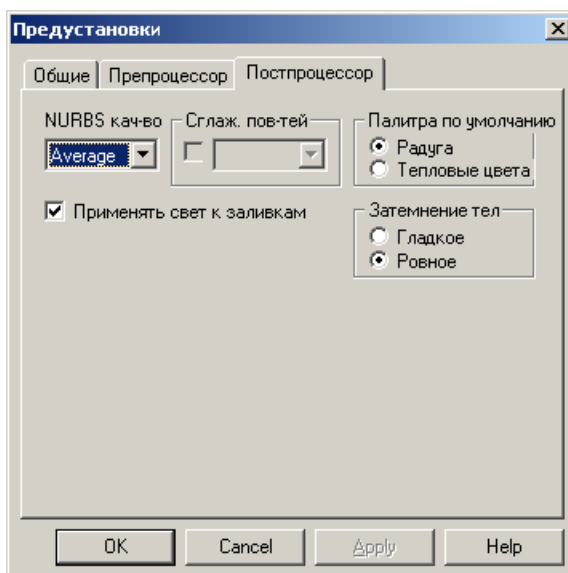
2.1.10.2 Предустановки препроцессора и процесса расчета



Препроцессор имеет следующие предустановки:

- Как будут отображаться **Группы в дереве варианта**. Элементы дерева, соответствующие группам фасеток, находятся в папке **Геометрия** подобласти.
 - Если выбран пункт **Показывать выбранную**, то в папке **Геометрия** будет один элемент в случае, если группа, принадлежащая этой подобласти, выделена в **Графическом Окне** и не будет ни одного элемента, если не выделено группы, принадлежащей этой подобласти.
 - Если выбран пункт **Показать Все**, то в папке **Геометрия** всегда будет количество элементов по числу групп данной подобласти. При выборе пункта **Показать Все** появляется возможность работы с отдельными фасетками (в папке **Геометрия** появляется список папок, соответствующих группам фасеток, каждая из которых содержит перечень отдельных фасеток). Однако, такая возможность может понадобиться крайне редко и существенно увеличивает время генерации дерева варианта.
- Как будет отображаться **Выбор групп**.
 - Если выбран пункт **Каркасные другие группы**, то фасетки выделенной группы будут непрозрачными, а фасетки остальных групп будут отрисованы только их ребрами.
 - Если выбран пункт **Границы других групп**, то фасетки выделенной группы будут непрозрачными, а фасетки остальных групп будут отрисованы только границами каждой группы фасеток.
 - Если выбран пункт **Текстурированная выбранная**, то на фасетках выделенной группы появятся наклонные черные и белые полосы, внешний вид фасеток невыделенных групп не изменится.
 - Если выбран пункт **Цвет выбр. групп**, то фасетки выделенной группы будут подкрашены указанным цветом.
- Точность отслеживания геометрических параметров **Допуск**. Определяет с какой точностью будут отслеживаться геометрические параметры (например, совпадение координат точек). Если задано -12, то точность отслеживания будет равна $1 \cdot e^{-12}$.

2.1.10.3 Предустановки постпроцессора



Постпроцессор имеет следующие предустановки:

- **NURBS кач-во** задает точность построения NURBS-кривых и NURBS-поверхностей в постпроцессоре (NURBS используются, например, при построении трубок и ленточек тока в слое **Группа Частиц**). Чем точнее вычислены NURBS, тем более гладко и красиво выглядят кривые и поверхности в постпроцессоре. С другой стороны, большая точность требует больших затрат процессорного времени. Эта предустановка позволяет выбрать качество NURBS, наиболее подходящее для целей пользователя. Предустановка может принимать значения: **Draft** – самое быстрое и наименее точное построение NURBS, **Average** – компромисс между точностью и скоростью, **Excellent** – наиболее точное и самое медленное построение NURBS.
- **Сглаж. пов-тей** – зарезервировано для использования в следующих версиях.
- **Палитра по умолчанию** определяет, какая палитра будет выбрана палитрой по умолчанию для вновь создаваемых слоев. **Палитра по умолчанию** всегда включает в себя 11 цветов.
 - Если выбран пункт **Радуга**, то палитра будет состоять из цветов радуги; от синего, соответствующему минимальному значению переменной, до красного, соответствующему максимальному значению переменной.
 - Если выбран пункт **Тепловые цвета**, то палитра будет меняться от синего до светло-желтого.
- **Затемнение тел** определяет каким образом будут отображаться фасетки геометрии.
 - Если выбран пункт **Гладкое**, то внутри каждой группы границы фасеток будут сглаженными (используется для более гладкого отображения геометрии).
 - Если выбран пункт **Ровное**, то внутри каждой группы границы фасеток будут несглаженными.
- **Применять свет к заливкам** определяет, будут ли цвета тоновых заливок полностью соответствовать цветам, выбранным в палитре слоя, независимо от того, какие источники освещения включены, или цвета будут вычисляться в зависимости от включенных источников света. В первом случае (галочка в поле отсутствует) цвета тоновой заливки будут абсолютно точны. Во втором случае (галочка в поле стоит) получится более реалистичное и объемное изображение.

2.2 Задание варианта FlowVision


Так как вариант является основным рабочим объектом в **FlowVision**, то очень важно знать все возможности работы с вариантом.

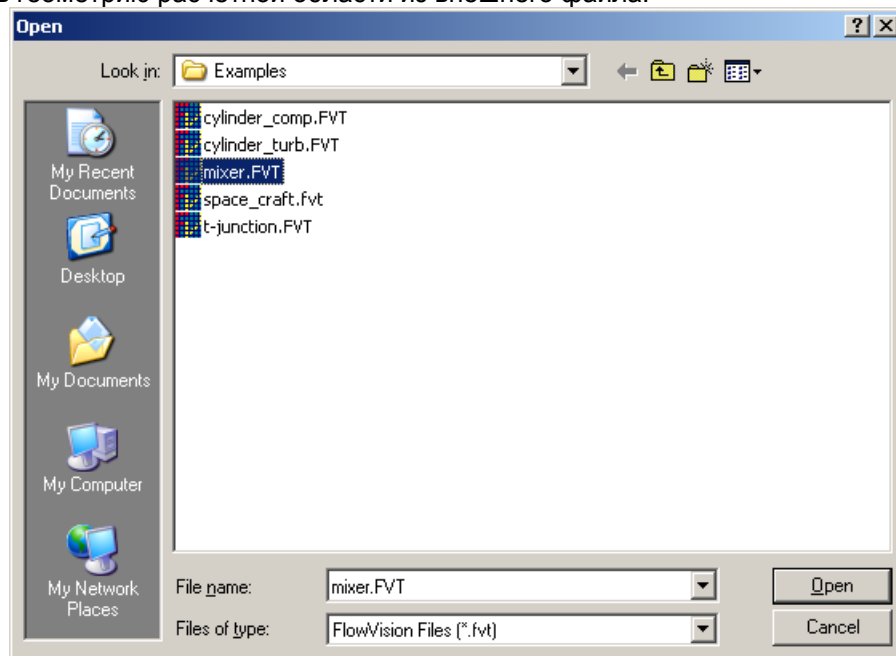
В этой главе описывается:

- [Создание нового варианта.](#)
- [Изменение геометрии в существующем варианте.](#)
- [Задание математической модели и ее параметров.](#)
- [Создание и расстановка граничных условий.](#)
- [Вспомогательные инструменты.](#)
- [Задание исходной сетки.](#)

2.2.1 Создание нового варианта

Для того, чтобы открыть новый вариант:

- В окне **FlowVision** нажмите кнопку  на панели инструментов или выберите **Файл Создать** в меню.
- Для каждого варианта необходима информация о форме расчетной области. **FlowVision** не имеет собственного геометрического процессора, поэтому геометрия расчетной области импортируется из файла, созданного в САПР. Поэтому после выбора типа варианта появится окно предлагающее импортировать геометрию расчетной области из внешнего файла.



Выбор импортируемой геометрии.

- Выберите тип импортируемого файла в списке **Files of type**. Выберите нужный файл и нажмите кнопку **Open**.

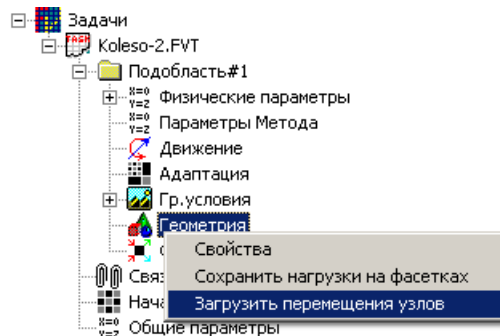
В следующей таблице перечислены типы файлов, из которых можно импортировать геометрическую информацию.

Расширение файла	Формат	Тип
wrl	VRML 1.0, VRML 2.0	Virtual Reality Modeling Language (VRML)
dat ₁	ASCII	NASTRAN data file
stl	ASCII, binary	STEREO Lithography format
geo	ASCII	DEFORM Geometry file
inp ₂	ASCII	ABAQUS input file
cdb ₃	ASCII	ANSYS Text Database
mesh ₄		внутренний формат импорта поверхностной сетки из Flow3D Vision во FlowVision

Примечания:¹ Поддерживаемые типы конечных элементов NASTRAN:

CQUAD4
 CQUAD8
 CQUADR
 CSHEAR
 CTRIA3
 CTRIA6
 TRIAR
 CTWIST
 CHEXA
 CPENTA
 CTETRA

² Для некоторых форматов конечноэлементных сеток (в настоящий момент только для сеток **ABAQUS**) появилась возможность дополнительно загружать перемещения узлов (*fil*-файл). Это осуществляется выбором пункта **Загрузить перемещения узлов**, который появляется при нажатии правой кнопки мыши на элементе **Геометрия** выбранной подобласти дерева препроцессора. Загрузка перемещений не аддитивна, то есть при загрузке новых перемещений старые отменяются.

Поддерживаемые типы конечных элементов **ABAQUS**:

C3D4
 C3D6
 C3D8

³ Поддерживаемые типы конечных элементов **ANSYS**:

Треугольные 6-узловые 2D-элементы:

PLANE2
 PLANE35
 PLANE146

Четырёхугольные 4-узловые 2D-элементы:

PLANE13
 PLANE25
 PLANE42
 PLANE55
 HYPER56
 PLANE67
 PLANE75
 VISCO106
 PLANE162
 PLANE182

Четырёхугольные 8-узловые 2D-элементы:

PLANE53
 HYPER74
 PLANE77
 PLANE78
 PLANE82
 PLANE83
 HYPER84
 VISCO88
 VISCO108
 HF118
 PLANE121
 PLANE145
 PLANE183

Шестигранные 8-узловые 3D-элементы:

SOLID5

SOLID45
SOLID46
HYPER58
SOLID62
SOLID64
SOLID65
SOLID69
SOLID70
HYPER86
SOLID96
SOLID97
VISCO107
SOLID164
SOLID185

Четырёхгранные 10-узловые 3D-элементы:

SOLID87
SOLID92
SOLID98
HF119
SOLID123
SOLID127
SOLID148
HYPER158
SOLID187

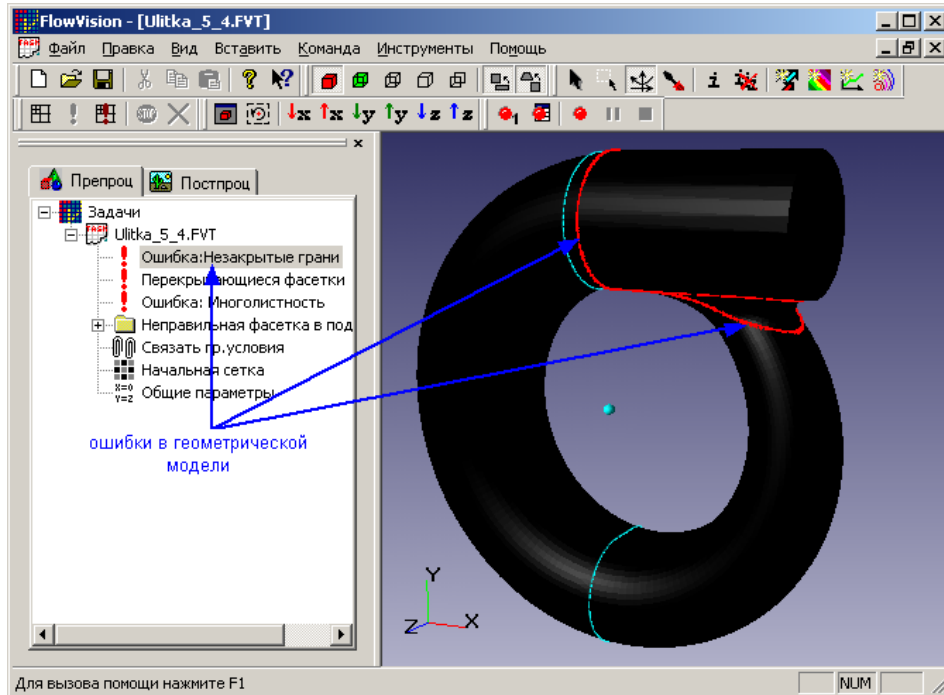
Шестигранные 20-узловые 3D-элементы:

VISCO89
SOLID90
SOLID95
SOLID117
HF120
SOLID122
SOLID128
SOLID147
SOLID186
SOLID191

⁴ Этот формат используется для импорта поверхностной сетки из **Flow3D Vision** во **FlowVision**, форматы **IGES**, **Parasolid**, а также другие, не указанные в таблице, загружаются также посредством **Flow3D Vision**.

После этого геометрия из выбранного файла будет импортирована в вариант, проанализирована, разбита на поверхности и замкнутые подобласти. Структура нового варианта появится в рабочем окне, а изображение геометрии в графическом окне.

Если в процессе импортирования были обнаружены ошибки в геометрической модели, то эти ошибки будут отображены в дереве и графическом окне варианта красным цветом.



Вариант с ошибками в геометрической модели рассчитывать нельзя. Следует поправить геометрическую модель, а затем снова провести импорт геометрии.

Ошибками в геометрической модели считается следующая ситуация: в модели присутствуют ребра, принадлежащие меньше или больше, чем двум фасеткам. Поэтому во **FlowVision** нельзя решать задачи с так называемыми Т-образными поверхностями, когда три фасетки имеют одно ребро (задачи такого рода возникают, например, при течении в трубах с толстыми стенками). Проблема загрузки геометрии в подобных задачах решается несколькими способами:

1. Задать трубу и жидкость внутри трубы как два отдельных твердых тела. Недостаток этого способа состоит в том, что таким образом вдвое увеличивается расчетная область.
2. Изменить геометрию, добавив тонкие стенки там, где были Т-образные поверхности. На границе этих фиктивных стенок задаются адиабатические граничные условия (**Симметрия**). Недостаток этого способа заключается в том, что он искажает физическую картину процесса. Если в задаче решается уравнение энергии, введение таких стенок приведет к возникновению тепловых мостов.



Задание расчетной области для течения внутри трубы с толстыми стенками:

- а) двумя отдельными твердыми телами,
- б) с помощью введения стенок в месте Т-образного соединения фасеток.

2.2.2 Изменение геометрии

Очень часто при оптимизации какого-либо устройства необходимо проводить расчет серии вариантов, не очень сильно отличающихся друг от друга по форме расчетной области. В этом случае при создании нового варианта удобно воспользоваться предыдущим вариантом и просто заменить в нем геометрию рассчитываемого устройства. При этом не придется заново задавать начальную сетку, граничные условия, параметры моделей и методы расчета, а оставить их такими, какими они были заданы в старом варианте.

Следует обратить внимание на то, что данная операция допустима **только** в тех случаях, когда варианты геометрии отличаются друг от друга несущественным образом, т.е. количество подобластей, граничных условий, параметры модели и т.д. остаются неизменными. В противном случае, если отличия между вариантами являются существенными, пользоваться вставкой геометрии не следует, т.к. это приведет к возникновению трудно устранимых ошибок.

Для того, чтобы импортировать новую геометрию в старый вариант:

- Выберите пункт главного меню **Вставить Геометрия**.
- В окне **Открыть** выберите тип импортируемого файла и сам файл и нажмите кнопку **Открыть**.

После этого новая геометрия будет импортирована в вариант, проанализирована, разбита на поверхности и замкнутые подобласти. Структура нового варианта появится в рабочем окне, а изображение геометрии в графическом окне. Расчетная сетка будет автоматически растянута или сжата так, чтобы совпадать с границами новой геометрии.

Обратите внимание, что в **Общие параметры** варианта на странице свойств **Старт** автоматически снялась галочка для элемента **Маску ячеек**.

После импортирования новой геометрии существует несколько возможностей продолжения процесса расчета:

- обновить геометрическую информацию в ячейках сетки и продолжать расчет, используя старые сетку и значения переменных;
- обновить геометрическую информацию в ячейках сетки и продолжать расчет, используя старые сетку, но не использовать значения переменных из предыдущего расчета;
- начать расчет сначала, т.е. не использовать ни сетку, ни значения переменных из предыдущего расчета.

По умолчанию после изменения геометрии устанавливается первый режим расчета. Более подробно задание глобальных параметров описано в разделе [Задание глобальных параметров](#).

2.2.3 Редактирование подобласти

При импорте геометрии в **FlowVision**, система автоматически разбивает пространство на замкнутые подобласти, ограниченные геометрическими поверхностями. Дополнительно создается еще одна подобласть, которая является внешней по отношению к геометрии.

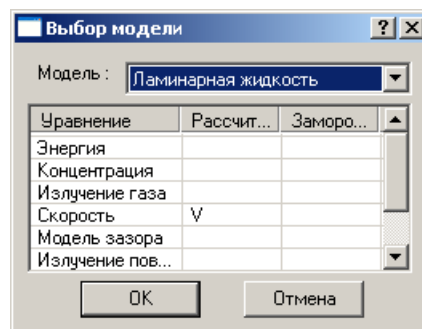
Ниже описывается, как установить расчетную модель для каждой подобласти, задать ее параметры, создать и расставить граничные условия, задать фильтры-модификаторы.

2.2.3.1 Изменение математической модели подобласти

Математическая модель может быть изменена для всех подобластей кроме внешней. Для внешней подобласти модели всегда должна быть **Нет вычисления**.

Для того, чтобы задать или изменить математическую модель для данной подобласти:

- Нажмите правую кнопку мыши над нужной **Подобласть** в дереве варианта. Граница выбранной подобласти будет показана в графическом окне варианта цветом. Все остальные подобласти станут невидимыми.
- Из появившегося контекстного меню выберите пункт **Изменить модель**.
- В окне **Выбор модели** из списка **Модель** выберите нужную математическую модель.



- В таблице ниже будут указаны уравнения, для которых возможен расчет. В колонке **Рассчитывать** проставьте галочки около тех уравнений, которые надо рассчитывать.
- Нажмите клавишу **ОК**.

В любой момент в процессе расчета можно добавить или убрать рассчитываемые уравнения. Кроме этого существует возможность «заморозки» одного или нескольких уравнений. «Заморозка»

означает следующее – уравнение, для которой установлена заморозка, не будет рассчитываться, то есть эта переменная будет зафиксирована. «Заморозка» возможна только для тех уравнений, для которых указано что они рассчитываются.

Чтобы «заморозить» или «разморозить» уравнения математической модели для данной подобласти:

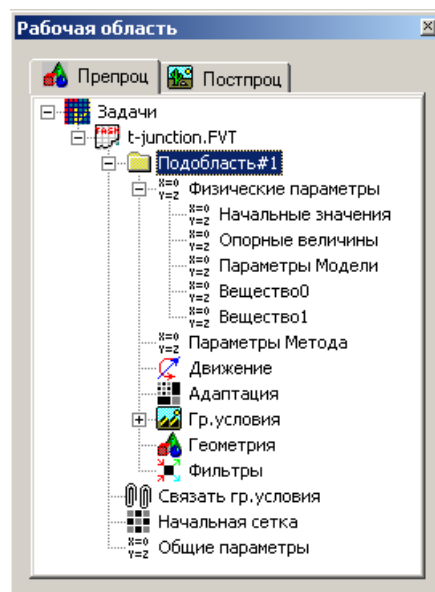
- Нажмите правую кнопку мыши над нужной подобластью в дереве варианта. Из появившегося контекстного меню выберите пункт **Изменить модель**.
- В таблице в окне **Выбор модели** будут указаны уравнения, для которых проводится расчет. В колонке **Заморозить** проставьте или снимите галочки около тех уравнений, которые надо «заморозить» или наоборот «разморозить».
- Нажмите клавишу **ОК**.

Если расчет проводился по одной модели, а затем возникла необходимость поменять модель. В этом случае после смены модели автоматически будут сделаны следующие операции:




- Значения всех параметров сохраняются, если они существовали в старой модели, и будут заданы по умолчанию, если не существовали.
- Во всех ячейках данной подобласти модель будет заменена на новую. Причем, если переменная существовала в старой модели, то ее значение будет равно значению в этой ячейке до изменения модели. Если переменная в старой модели не существовала, то ее значение будет равно значению по умолчанию.
- Все граничные условия в этой подобласти будут заменены на новые. Причем, если для переменной граничное условие существовало в старой модели, то это граничное условие сохранится. Если не существовало, то граничное условие будет задано по умолчанию.

2.2.3.2 Задание параметров модели

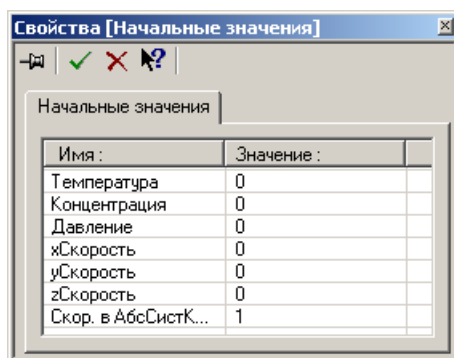
Параметры модели разделены на две группы: физические параметры модели и параметры методов расчета. В дереве они представлены элементами: **Физические параметры** и **Параметры метода**. Причем физические параметры разделены еще на 5 подгрупп: [начальные](#) и [опорные](#) значения переменных; [константы, входящие в уравнения математической модели](#); [свойства веществ](#) (для двух компонент).



Чтобы задать физические параметры модели:

- Раскройте папку **Физические параметры** и выберите нужный элемент в дереве варианта, нажмите правую кнопку мыши и выберите пункт **Свойства** из контекстного меню.
- Появится окно **Свойства**, в котором будет от одной до нескольких страниц параметров.
- Количество параметров и их названия зависят от выбранного элемента в списке свойств математической модели данной подобласти. Описание параметров смотрите в томе [Теория](#).
- Внесите необходимые изменения.
- Нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.
- Закройте окно **Свойства** или приколите его с помощью кнопки , если собираетесь редактировать свойства другого элемента.

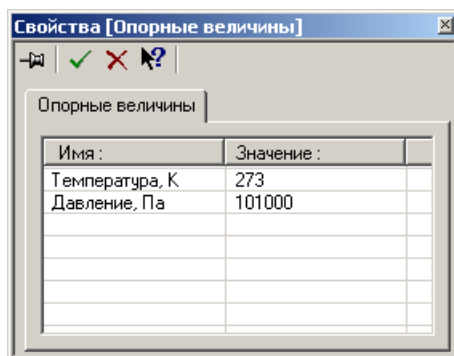
2.2.3.2.1 Начальные значения



В окне **Начальные значения** задаются начальные значения параметров для всей расчетной области, таких как температура, концентрация, давления и скорость. Причем все значения задаются в относительных величинах.

Если в решаемой задаче участвует смесь газов, то концентрация задается следующим образом: концентрация, равная 1, означает, что расчетная область заполнена веществом с номером 1, а концентрация, равная 0, означает, что область заполнена веществом с номером 0, если концентрация равна, например, 0.2, это означает, что область заполнена смесью, содержащей 2 части вещества с номером 1 и 8 частей вещества с номером 0.

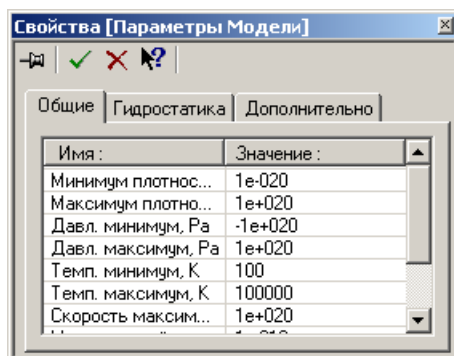
2.2.3.2.2 Опорные величины



В окне **Опорные величины** задаются опорные значения параметров, иными словами, выбирается шкала для температуры и давления.

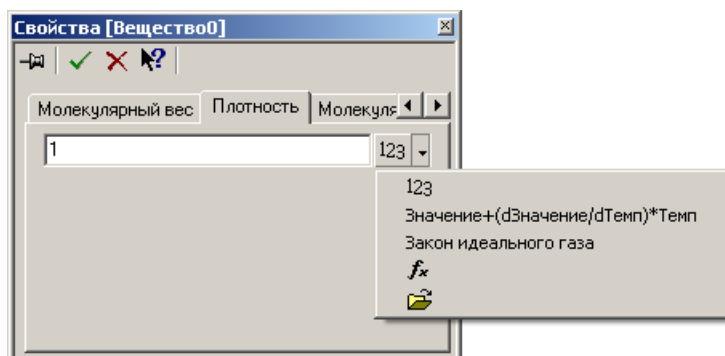
Переменные температура и давление во **FlowVision** представляются относительными значениями, абсолютные значения которых вычисляются по формуле $f_a = f + f_{ref}$ где f_a – абсолютное значение переменной, f – рассчитываемое относительное значение переменной, f_{ref} – опорная величина.

2.2.3.2.3 Параметры модели



В окне **Физические параметры** **Параметры модели** задаются параметры математической модели, количество параметров в этом окне зависит от выбранной модели. Подробное описание параметров для каждой модели приведено в томе [Теория](#).


2.2.3.2.4 Физические свойства веществ



В окне **Вещество0** и **Вещество1** задаются физические свойства рассчитываемых веществ.

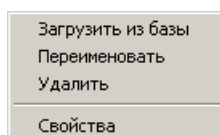
Существует несколько способов задания значения каждой величины:

- указание закона, по которому происходит изменение данного параметра:

123	Константа.
Value+(dValue/dTemp)*Temp	Линейная зависимость от температуры. Доступно для всех параметров, кроме Молекулярный вес .
Ideal gas law ¹	Закон идеального газа.
f_x	Уравнение. Позволяет ввести зависимость данной величины от других расчетных величин.
	Внешняя функция. Позволяет использовать законы изменения параметра, находящиеся во внешних dll-библиотеках.

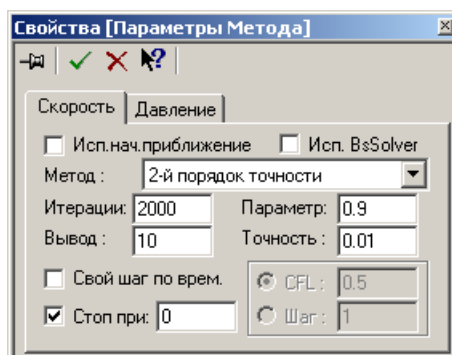
¹ Подробнее см. том [Теория](#).

- Также существует возможность загрузить свойства из базы данных веществ.
 - Нажмите правую кнопку мыши на **Вещество0** или **Вещество1**. Появится контекстное меню.
 - Нажмите **Загрузить из базы** во всплывающем меню. Выберете из базы данных вещество. Если в базе данных не оказалось нужного вещества, то имеется возможность ее редактирования и добавления пользовательских веществ. Подробное описание процедуры редактирования базы данных смотрите в описании [базы данных](#).






Контекстное меню свойств веществ.

2.2.3.2.5 Параметры метода



Для того, чтобы задать параметры методов расчета:

- Высветите свойства для элемента дерева **Параметры метода**.
- В окне свойств будут страницы параметров расчета для каждой рассчитываемой переменной. Все страницы выглядят одинаково. Их описание приведено ниже. Внесите необходимые изменения.
- Нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.
- Закройте окно **Свойства** или приколите его с помощью кнопки , если собираетесь

редактировать свойства другого элемента.

Страница свойств параметров метода имеет следующие окна:

Исп. нач. приближение	Использовать начальное приближение или нет. Если в окошке Использовать начальное приближение стоит галочка, то при запуске на расчет для данной переменной значение будет обнулено.
Исп. BsSolver ¹	Использовать итерационные методы IC2-CG и ILU2-Lanczos . Для всех уравнений, кроме Скорость , по достижении указанного количества итераций происходит автоматическое переключение итерационных методов на IC2-CG и ILU2-Lanczos . Итерационный процесс продолжается новыми методами до сходимости или указанного количества итерации. При этом решение, полученное с помощью методов, заданных по умолчанию, используется в качестве начального приближения.
Метод	Определяет итерационный метод решения системы линейных уравнений для давления (IC-CG) или схему аппроксимации при конвективном переносе для всех других переменных (1-й порядок точности , 2-й порядок точности и Ступенчатая функция 0..1³).
Итерации	Задаёт максимально допустимое количество итераций N_{\max} для решения системы линейных уравнений для данной переменной на текущем временном шаге.
Параметр	Задаёт параметр релаксации для итерационного метода расчета.
Вывод	Задаёт количество итераций в процессе решения системы линейных уравнений, через которое будет обновляться информация в окне состояния процесса расчета.
Точность ²	Определяет точность сходимости ϵ , по достижении которой итерационный процесс решения системы линейных уравнений (на текущем временном шаге) для данной переменной будет остановлен.
Использовать собственный шаг по времени	Определяет, будет эта переменная рассчитываться с общим шагом по времени или с ее собственным шагом.
Стоп при	Если отмечен пункт Стоп при , то активируется критерий останова по относительной невязке , заданной справа от надписи Стоп при .
CFL	Если отмечен пункт CFL , то собственный шаг по времени определяется по числу Куранта, заданному справа от надписи CFL .
Шаг	Если отмечен пункт Шаг , то собственный шаг по времени равен числу, заданному справа от надписи Шаг .

Примечания:

¹ Описание итерационных методов приведено в томе [Теория](#).

Использование методов **IC2-CG** и **ILU2-Lanczos** для уравнений **Скорость** может быть связано с большими затратами памяти, поэтому автоматическое переключение на них в случае, если за указанное количество итераций сходимости не достигнута, не производится.

При использовании опции **Исп. BsSolver** служебная информация о ходе итерационного процесса записывается в файл **NAME.bss** (где NAME – имя варианта).

² Следует обратить внимание на то, что параметр точности сходимости итераций по давлению определяет и точность вычисления такой часто используемой интегральной характеристики как расход. По умолчанию точность сходимости везде установлена равной 0.01. Т.е. при заданном значении параметра расход в разных сечениях расчетной области будет сохраняться с точностью 1%.

³ Метод **Ступенчатая функция 0..1** предназначен для описания решений, в которых искомая функция может иметь разрыв. При этом предполагается, что значение функции лежит в диапазоне от 0 до 1. Этот метод используется:

- при решении уравнения для VoF;
- при решении уравнения для Концентрации (в случаях несмешиваемых компонентов, когда плотности двух веществ могут отличаться на порядки).

2.2.3.3 Задание движения подобласти

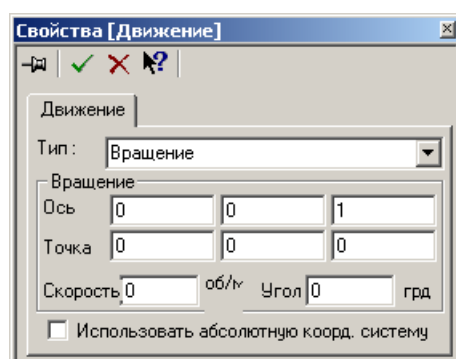
Для каждой подобласти можно задать движение этой подобласти относительно абсолютной системы координат. Параметры движения представлены в дереве элементом: **Движение**.

Задавать параметры движения подобласти необходимо в том случае если мы хотим рассчитать течение вокруг или внутри движущегося тела.

Для подобласти можно задать или прямолинейное поступательное движение с постоянной скоростью или вращение с постоянной угловой скоростью.

Чтобы задать движение подобласти:

- Выберите элемент **Движение** в дереве варианта, нажмите правую кнопку мыши и выберите пункт **Свойства** из контекстного меню.
- Появится окно **Свойства**. Выберите тип движения: **Вращение**. Задайте необходимые параметры.
- Нажмите кнопку для подтверждения изменений или для их отмены.
- Закройте окно **Свойства** или приколите его с помощью кнопки , если собираетесь редактировать свойства другого элемента.



Окна свойств параметров движения.

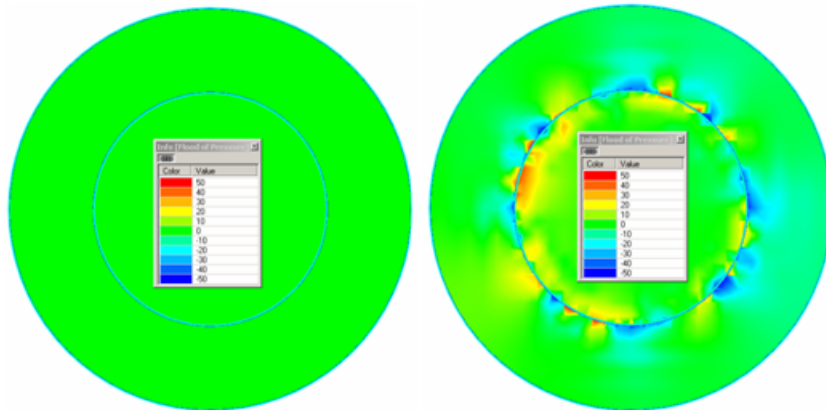
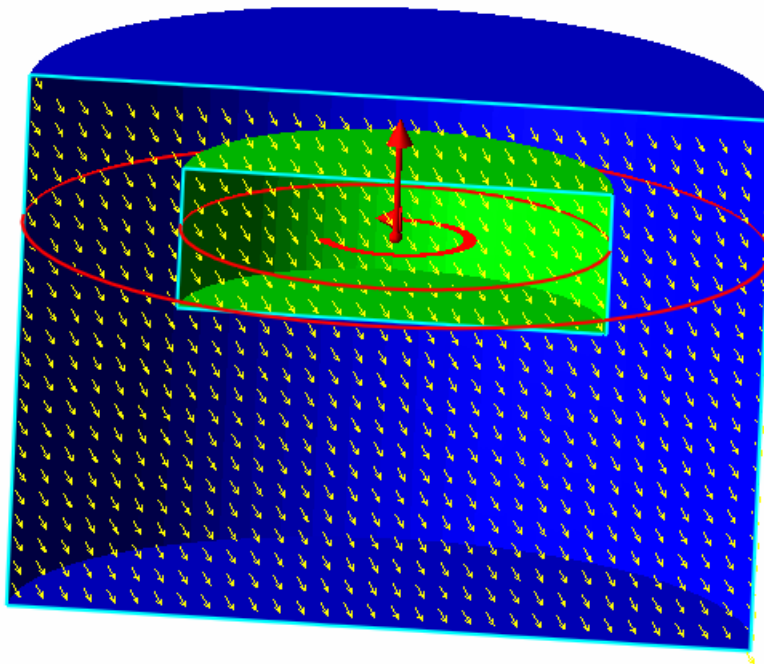
Страница свойств параметров движения имеет следующие окна:

Тип	Определяет тип движения. Возможны два типа: Нет движения и Вращение – вращение с постоянной угловой скоростью.
Ось	Задаёт направление оси вокруг которой происходит вращение или вдоль которой происходит сдвиг.
Точка	Определяет точку через которую проходит ось вращения.
Скорость	Определяет угловую скорость вращения в оборотах в минуту или линейную скорость сдвига в метрах в секунду.
Угол	Задаёт начальный угол поворота (для скользящей сетки).
Использовать абсолютную коорд. систему*	Используется только в задачах вращения. Определяет систему координат, в которой заданы скорости и соответствующие им граничные условия. Если эта опция активна, то скорости и граничные условия заданы в неподвижной системе координат. В противном случае скорости и граничные условия заданы в движущейся системе координат. При использовании этой опции на стенках необходимо задавать граничные условия Вращающаяся стенка или Вращающаяся стенка, логарифмический закон (в зависимости от используемой модели), остальные граничные условия задаются обычным образом.

Примечания:

* В задачах, где присутствуют «скользящие» поверхности, рекомендуется использовать эту опцию, в противном случае могут быть получены возмущения на «скользящей» поверхности.

Возникновение возмущений на «скользящей» поверхности без использования опции **Использовать абсолютную коорд. систему** можно посмотреть на следующем примере: возьмем два вложенных друг в друга цилиндра, на поверхности внешнего цилиндра зададим набегающий поток, а внутренний цилиндр заставим вращаться с заданной скоростью. При такой постановке задачи вращение внутреннего цилиндра не должно оказывать влияние на набегающий поток.



В абсолютной системе координат

В относительной системе координат

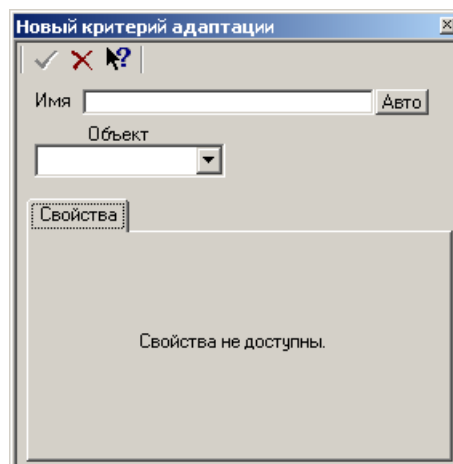
Распределение давления в плоскости, перпендикулярной оси цилиндров.

2.2.3.4 Задание критериев адаптации сетки

Критерии адаптации сетки задаются для каждой подобласти отдельно. В дереве они представлены элементом **Адаптация**.

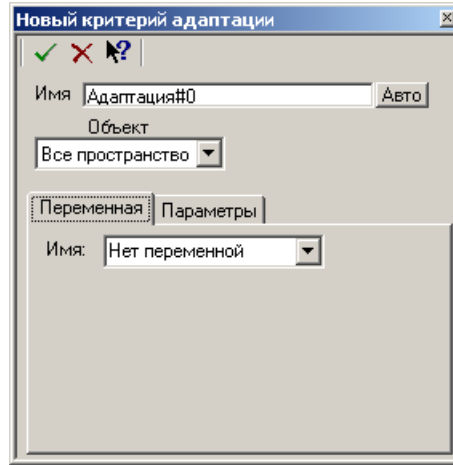
Чтобы задать критерии адаптации:

- Выберите элемент **Адаптация** в дереве варианта, нажмите правую кнопку мыши и выберите пункт **Создать** из контекстного меню.
- Появится диалоговое окно **Новый критерий адаптации**, в котором предлагается выбрать объект для проведения адаптации. Область, в которой будет проведена адаптация, задается с помощью следующих объектов: **Плоскость**, **Всё пространство**, **Параллелепипед**, **Конус**.



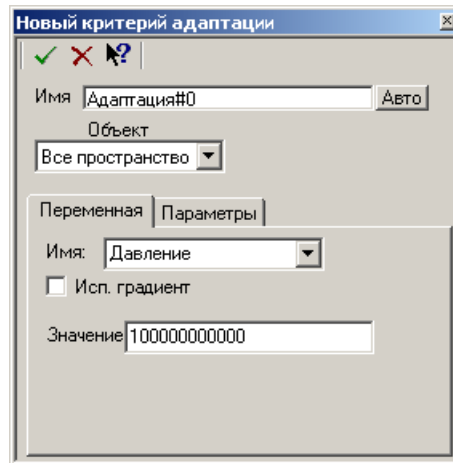
Окно создания критерия адаптации.

- После выбора объекта адаптации будут доступны две страницы свойств. На первой можно выбрать переменную, по которой будет проводится адаптация, на второй странице задаются ограничения на адаптацию. Переменную, по которой будет проводится адаптация, выбирать необязательно, если она не указана, то адаптация будет проведена до заданного уровня, а все остальные ограничения действовать не будут.



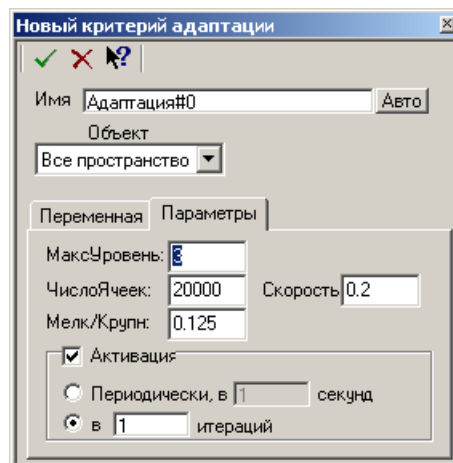
Окно создания критерия адаптации (переменная не выбрана).

- При выборе переменной, по которой будет проводится адаптация, активизируются окна свойств, позволяющие указать значение переменной, к которому будет проведено сгущение расчетной сетки, или значение градиента этой переменной, если будет активизирован параметр **Исп. градиент**.



Окно создания критерия адаптации (переменная выбрана).




- На странице **Параметры** имеются следующие ограничения на адаптацию:



Окно создания критерия адаптации (ограничения на адаптацию).

МаксУровень	Определяет максимальный уровень ячеек для критерия адаптации. Если не будет выбрана переменная, то адаптация будет проведена только с этим одним ограничением, остальные ограничения действовать не будут.
ЧислоЯчеек	Определяет количество ячеек, которое будет добавлено этим критерием адаптации. Это условие будет выполнено с точностью до 10%.
Скорость	Определяет количество ячеек, добавляемых критерием адаптации на каждой итерации. Это количество задается в долях от величины ЧислоЯчеек (в рассматриваемом примере на каждом последующем шаге по времени к сетке будет добавляться 4000 ячеек разных уровней до тех пор, пока не исчерпается ресурс из 20000 ячеек). Значение Скорость = 1 соответствует автоматическому выбору скорости роста сетки в соответствии с правилом 'соседние ячейки не могут отличаться уровнем больше, чем на 1.
Мелк/Крупн	Позволяет динамически перестраивать сетку, оставаясь в рамках заданных ограничений: по мере развития течения крупные ячейки, где надо, дробятся, мелкие – сливаются. Если данный критерий уже добавил N ЧислоЯчеек ячеек, на следующем временном шаге N- Мелк/Крупн ячеек будет слито, столько же новых ячеек появится в результате дробления.

Также в этом окне имеется возможность включить или отключить использование критерия адаптации (**Активация**) и задать периодичность его работы (с заданным шагом по времени или через заданное число итераций).

- После установки всех необходимых параметров нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.
- В дальнейшем этот критерий можно редактировать, выбирая его в дереве варианта, с помощью правой кнопки мыши (пункт **Свойства** из контекстного меню). Окно **Свойства** можно приколоть с помощью кнопки , если собираетесь редактировать свойства другого элемента.



2.2.3.5 Задание граничных условий

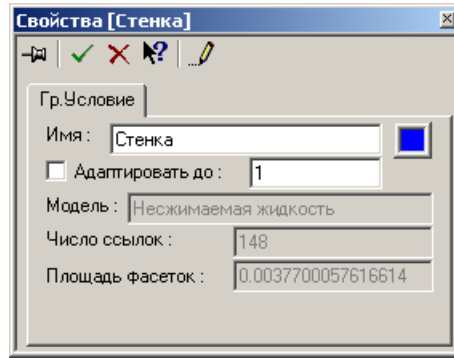
Каждая подобласть имеет свой набор граничных условий, которые показаны в дереве в папке **Гр.условия**. После создания варианта в каждой подобласти существует как минимум одно граничное условие, которое проставлено на всех фасетках данной подобласти.

Для того, чтобы создать новое граничное условие:

- Выделить папку **Гр.условия**, нажать правую кнопку мыши и выбрать пункт **Создать** в контекстном меню.



- Появится окно свойств со страницей, показывающей параметры нового граничного условия. Поменяйте необходимые параметры.
- Нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.
- Закройте окно **Свойства**. В дереве появится новый элемент, соответствующий вновь созданному граничному условию.



Страница параметров граничного условия имеет следующие окна:

Name	Имя граничного условия.
	Цвет граничного условия.
Адаптировать до	Если в окошке стоит галочка, то по данному граничному условию будет проводиться адаптация сетки. Справа от надписи указан уровень, до которого проводится адаптация.
Модель	Математическая модель граничного условия (совпадает с моделью подобласти).
Число ссылок	Количество фасеток, на которых проставлено это граничное условие.
Площадь фасеток	Суммарная площадь фасеток, на которых стоит граничное условие.

Существует другой способ создания граничного условия: граничное условие можно скопировать. Копирование граничного условия:

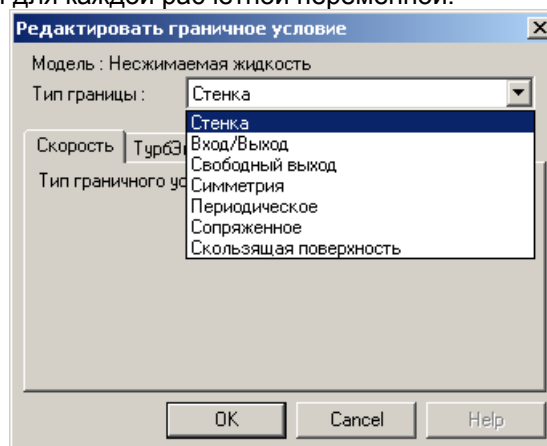
- Выделите граничное условие, с которого надо сделать копию, нажмите правую кнопку мыши и выберите **Копировать** в контекстном меню.
- Появится окно свойств со страницей показывающей параметры нового граничного условия. Поменяйте необходимые параметры.
- Нажмите кнопку для подтверждения изменений или для их отмены.
- Закройте окно **Свойства**. В дереве появится новый элемент соответствующий вновь созданному граничному условию.

Параметры граничного условия, которые являются общими для всех математических моделей, редактируются в свойствах граничного условия. Редактирование параметров граничного условия, определяющих граничные условия для каждой переменной:

- Выделите граничное условие, нажмите правую кнопку мыши и выберите **Редактировать** в контекстном меню.

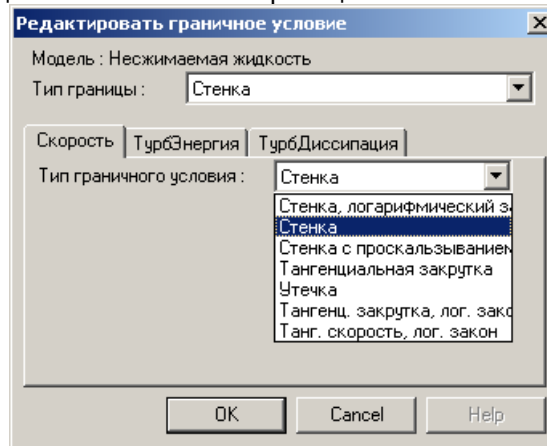
Или

- Выделите граничное условие, нажмите правую кнопку мыши и выберите **Свойства** в контекстном меню. Появится окно свойств. В панели инструментов нажмите кнопку .
- Появится окно **Редактировать граничное условие**. В этом окне указаны **Модель**, **Тип границы** и страницы свойств границы для каждой расчетной переменной.

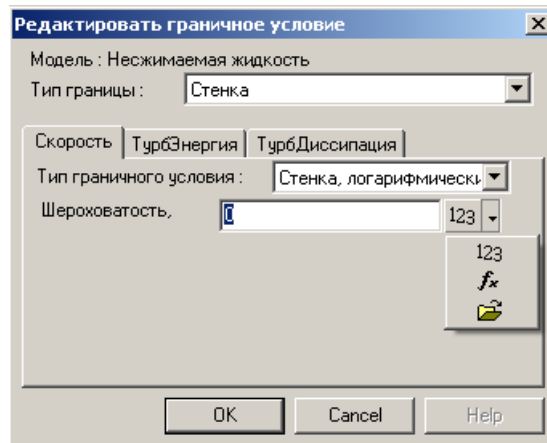


- На каждой странице указаны конкретный **Тип граничного условия** и параметры его характеризующие. При изменении типа границы меняются типы граничных условий для каждой

переменной. Описания типов границы, соответствующих им граничных условий и их параметров приведены в описании моделей. Измените тип границы.



- Поменяйте, если необходимо, типы граничных условий для переменных.
- Задайте параметры граничного условия. Параметры граничного условия приведены на каждой странице свойств в виде поля расположенного ниже окошка **Тип граничного условия**. Параметры граничных условий могут задаваться в виде констант, уравнения и с помощью пользовательской внешней функции.



- Нажмите кнопку **OK** для подтверждения изменений или **Cancel** для их отмены.

Для задания периодики на двух поверхностях следует создать два **Периодических** граничных условия и расставить их: первое на одной периодической поверхности, а второе на ее образе (второй поверхности). Затем следует связать эти два периодических условия. Процедура связывания описана в разделе [Связывание граничных условий](#).

Кроме периодических граничных условий также необходимо связывать граничные условия следующих типов:

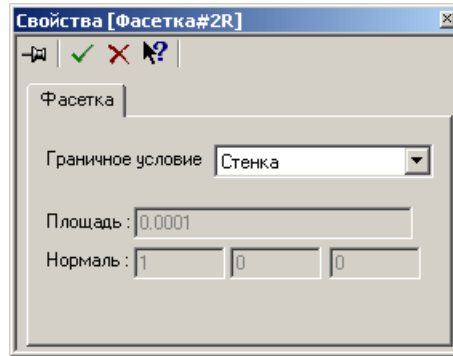
- **Сопряженное** используется для задания взаимодействия между двумя подобластями. Например, для расчета сопряженного теплообмена между областью с жидкостью и областью с твердым телом.
- **Скользящая поверхность** используется для задания границы взаимодействия между двумя подвижными подобластями. Более подробно смотри в томе [Введение](#).



2.2.3.6 Расстановка граничных условий

После создания граничных условий их надо расставить на фасетках данной подобласти. Граничное условие можно поставить на отдельную фасетку, на группу фасеток, на все фасетки данной подобласти. Так как на фасетках всегда стоит какое-то граничное условие, то расстановка граничного условия заключается в замене одного граничного условия на другое.

Изменение граничного условия на фасетке:

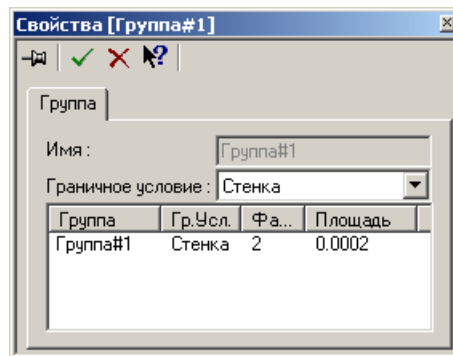
- В меню **Файл** **Предустановки** **Препроцессор** поставьте флаг у **Показать все**.
- Выделите фасетку в папке **Геометрия** Препроцессора, нажмите правую кнопку мыши и выберите **Свойства** в контекстном меню.
- Появится окно свойств данной фасетки. На странице свойств фасетки приведены текущее **Граничное условие**, **Площадь** и **Нормаль**. В списке граничных условий **Граничное условие** выберите нужное условие.





- Нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.

Изменение граничного условия на группе фасеток:

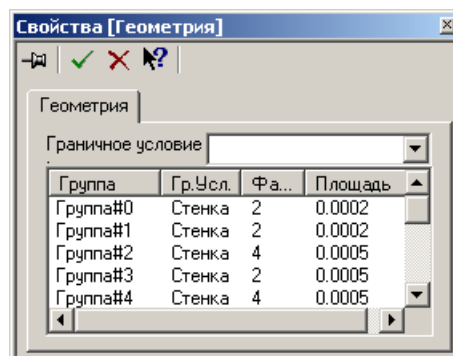
- Выделите группу фасеток, нажмите правую кнопку мыши и выберите **Свойства** в контекстном меню.
- Появится окно свойств группы фасетки. На странице свойств приведены имя группы фасеток **Имя**, список граничных условий **Граничное условие** данной подобласти, таблица в которой указаны имя группы **Группа**, граничные условия на ней **Гр.усл.**, количество **Фасетки** и площадь **Площадь** фасеток, на которых они проставлены. В списке граничных условий **Граничное условие** выберите нужное условие. Это условие будет установлено на всех фасетках данной группы.




- Нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.

Изменение граничного условия на всех фасетках данной подобласти:

- Выделите элемент дерева **Геометрия**, нажмите правую кнопку мыши и выберите **Свойства** в контекстном меню.
- Появится окно свойств геометрии данной подобласти. На странице свойств приведены список граничных условий **Граничное условие** данной подобласти, таблица в которой указаны имена групп **Группа**, граничные условия на них **Гр.Усл.**, количество **Фасетки** и площадь **Площадь** фасеток. В списке граничных условий **Граничное условие** выберите нужное условие. Это условие будет установлено на всех фасетках данной подобласти.



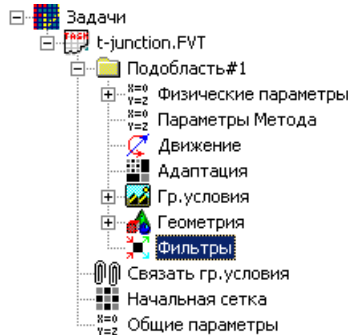
- Нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.

Если граничное условие было изменено, то в графическом окне выделенный элемент изменит свой цвет на цвет вновь проставленного граничного условия.

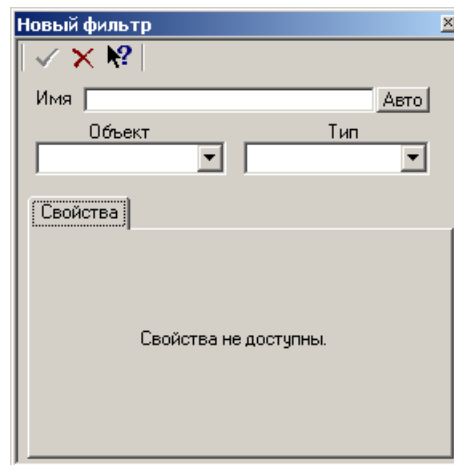
2.2.3.7 Фильтры

В каждой подобласти можно задать дополнительные объекты, которые будут как-то воздействовать либо на данные, либо на сетку в данной подобласти. Такие объекты называются фильтрами-модификаторами. Каждый фильтр состоит из двух частей: объекта внутри которого он действует и способа воздействия. Для того, чтобы создать новый фильтр:

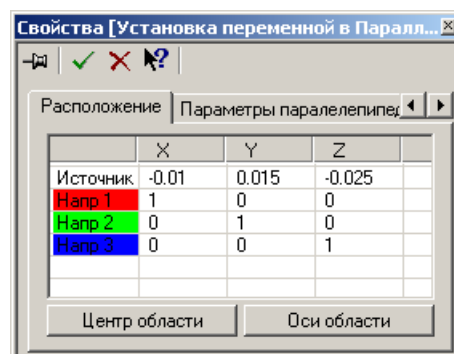
- Выделить папку **Фильтры**, нажать правую кнопку мыши и выбрать пункт **Создать** в контекстном меню.





- Появится окно создания фильтра. В окошке **Объект** следует выбрать тип объекта, в котором будет работать фильтр. В окошке **Тип** – тип фильтра (способ воздействия).

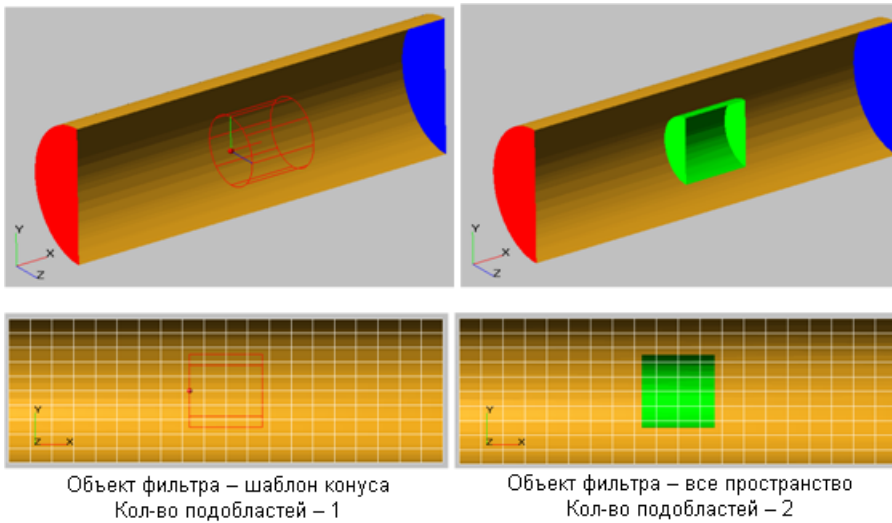


- В окне создания фильтра появятся страницы свойств для выбранного типа объекта и типа фильтра. Параметры объектов описаны в разделе [Геометрические объекты](#). Типы и параметры объектов описаны ниже. Поменяйте необходимые параметры.
- Нажмите кнопку для подтверждения изменений или для их отмены.
- Закройте окно **Новый фильтр**. В дереве появится новый элемент, соответствующий вновь созданному фильтру.
- После создания фильтра объект, в котором он работает, и его тип изменить нельзя. Изменить можно только их параметры.
- Для редактирования параметров фильтра:
- Выделить нужный фильтр, нажать правую кнопку мыши и выбрать пункт **Свойства** в контекстном меню.
- Появится окно свойств фильтра. Поменяйте необходимые параметры.



- Нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.

- *Внимание:** при выборе объекта, на котором будет задан фильтр следует обратить внимание на следующие особенности:
- если фильтр задан с помощью шаблонов, то он обрабатывает только в тех ячейках, в которых он занимает больше половины объема ячейки, если он занимает меньше половины объема ячейки, то в этой ячейке он не обработает.
 - если фильтр задан на объекте **Все пространство**, то он обработает во всех ячейках этой подобласти.
 - если нужно задать фильтр сложной формы или быть уверенным, что фильтр обработает во всем заданном объеме вне зависимости от того, как проходят сеточные линии, то в этом случае следует поступить таким образом:
 - при задании геометрии задать отдельную подобласть, в которой потом будет задан фильтр по всему пространству;
 - во **FlowVision** эта подобласть должна быть связана с другими подобластями через граничное условие **Скользкая поверхность**.



Для всех типов фильтров имеется возможность просмотра информации в окне Info (в нем выводится объем ячеек, в которых отработал фильтр, и для фильтра **Анизотропное сопротивление с источником тепла** – мощность источника тепловыделения).

Название типа	Действие	Параметр
Для всех фильтров		Время действия фильтра. Может принимать три значения: Постоянный – фильтр действует постоянно; Одноразовый – фильтр одноразового действия. После воздействия фильтр автоматически переходит в состояние Неактивный ; Неактивный – бездействующий.
Зажигание	Производит поджигание смеси в указанной области. Работает только в моделях с горением.	Параметров нет.
Остановка зажигания	Производит тушение пламени в указанной области. Работает только в моделях с горением.	Параметров нет.

Название типа	Действие	Параметр
Изотропное сопротивление	Задаёт изотропную силу сопротивления.	Коэффициенты линейной и квадратичной зависимости градиента давления от скорости.
Анизотропное сопротивление с источником тепла	Задаёт анизотропную силу сопротивления и источник тепловыделения.	Коэффициенты линейной и квадратичной зависимости градиента давления от скорости, коэффициенты степенной зависимости тепловыделения от скорости.
Установка переменной	Задаёт значение расчетной переменной.	Переменная – имя переменной, значение которой устанавливается фильтром; Значение – значение переменной.
Начальное распределение частиц	Размещает модельные частицы с заданным шагом в указанном объёме. Имеет смысл только когда Частицы отмечены в окне Изменить Модель .	См. том Теория

Кроме создания фильтров их можно импортировать.

Для того, чтобы импортировать фильтр:



- Выделить папку **Фильтры**, нажать правую кнопку мыши и выбрать пункт **Загрузить** в контекстном меню.
- Появится диалог открытия файла. В окошке **Тип файла** следует выбрать тип файла, из которого будет импортироваться фильтр. Все типы файлов можно разбить на две группы:

Расширение файла ¹	Описание	Использование
wrl	Virtual Reality Modeling Language (VRML)	Используется для загрузки геометрии из файла и для представления ее в качестве поверхности твердого тела, которое может двигаться в расчетной области. Автоматически создается фильтр типа Движущееся тело .
stl	STereo Lithography format (STL)	
geo	DEFORM Geometry file	
dat ²	NASTRAN data file	
cdb ²	ANSYS Text Database	
mesh	Flow3D Vision поверхностная сетка	
inp	ABAQUS input file	Если при загрузке использовался входной файл ABAQUS, то существует возможность установить связь с ABAQUS и решать совместную задачу обтекания тела с учетом его деформации под действием гидродинамических нагрузок. В этом случае может автоматически создаваться фильтр типа Движущееся тело, связанное с ABAQUS .

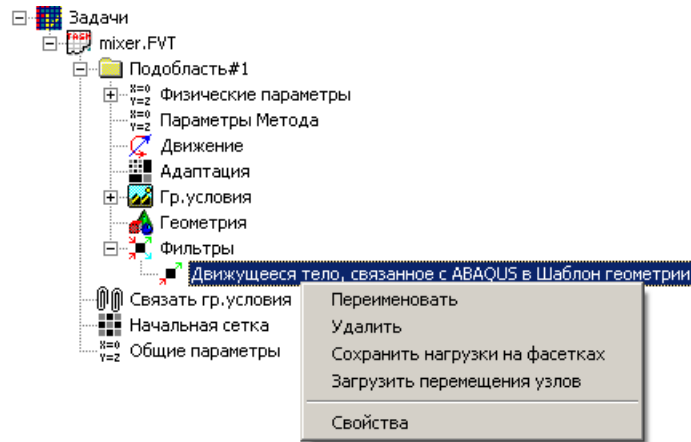
Примечания:

¹ Для загрузки IGES и Parasolid файлов используется модуль импорта 3D Vision.

² Поддерживаемые типы конечных элементов NASTRAN, ABAQUS и ANSYS описаны в разделе [Создание нового варианта](#).

- Выберите файл, из которого вы хотите импортировать фильтр, и нажмите **Открыть**. В дереве появится новый элемент, соответствующий вновь созданному фильтру, а его параметры высветятся в окне **Свойства**. Параметры этих фильтров описаны ниже. Поменяйте необходимые параметры.
- Нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.

- В случае импорта подвижного тела из файла конечноэлементной сетки имеется возможность сохранения гидродинамических нагрузок в файл. Эти пункты добавляются в меню, выпадающее при нажатии правой кнопки мыши на соответствующем фильтре:

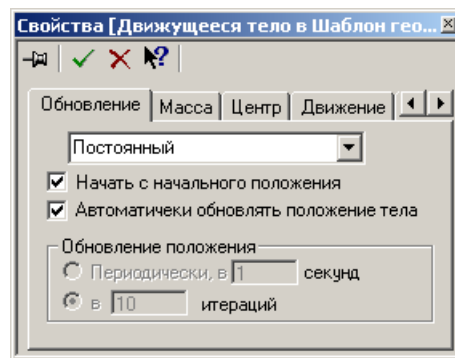


Сохранение нагрузок происходит таким же образом, как и в случае, когда из файла конечно-элементной сетки была загружена [основная геометрия](#).

2.2.3.7.1 Фильтр подвижного тела

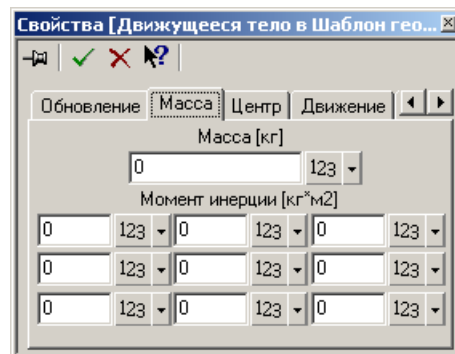
Как было описано в разделе [Фильтры](#) этот фильтр (**Движущееся тело**) образуется при импортировании геометрического файла. Ниже описаны все страницы свойств данного фильтра.

На первой странице свойств **Обновление** приведены параметры отвечающие за частоту обновления текущего положения тела:




- **Начать с начального положения** – перемещает тело в исходное положение.
- **Автоматически обновлять положение тела** – текущее положение тела будет обновляться на каждом шаге по времени.
- **Периодически в ... секунд** – положение тела будет обновляться через указанное количество секунд.
- **В ... итераций** – положение тела будет обновляться через указанное количество итераций.

На второй странице свойств **Масса** приведены параметры характеризующие инерционные свойства движущегося тела:

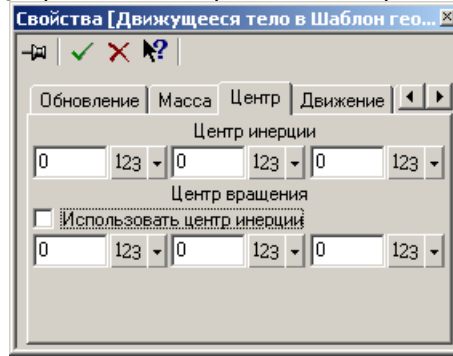


- **Масса [кг]** – масса твердого тела в килограммах.
- **Момент инерции [кг*м2]** – тензор моментов инерции относительно осей в системы координат связанной с телом.

Все параметры на этой и последующих страницах, рядом с которыми стоит значок , могут

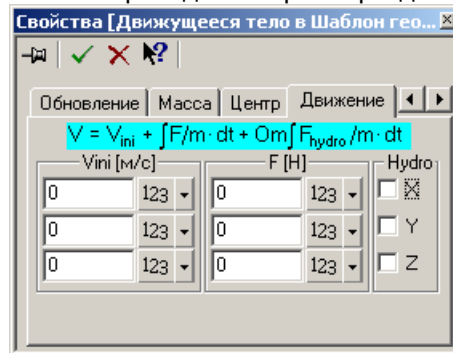
задаваться тремя способами: константой (123), уравнением (f_x) и внешней функцией ().

На третьей странице свойств **Центр** приведены координаты центра инерции и вращения:



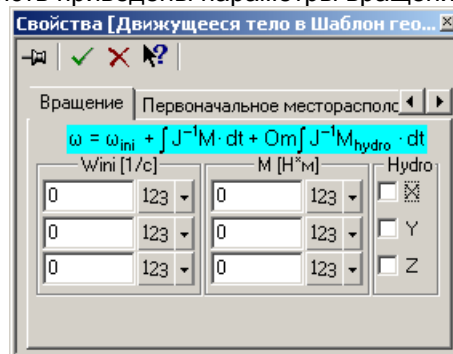
- **Центр инерции** – координаты центра инерции в системе координат связанной с телом.
- **Центр вращения** – координаты центра вращения в системе координат связанной с телом.
- **Использовать центр инерции** – если отметить это окошко, то координаты центра вращения будут совпадать с координатами центра инерции.

На четвертой странице **Движение** свойств приведены параметры движения тела:



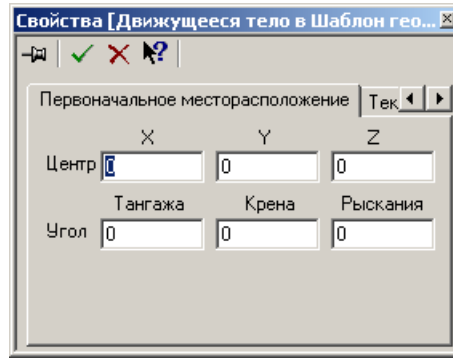
- **Vini [m/c]** – значения компонент линейной скорости в абсолютной системе координат.
- **F [H]** – значения компонент произвольной внешней силы.
- **Hydro** – если окно отмечено, то значение соответствующей компоненты линейной скорости определяется автоматически, исходя из гидродинамических сил, действующих на тело, и силы тяжести. При этом на нижней панели появляется дополнительное окно **Om**. Введите значение $Om < 1$, если хотите уменьшить эффект этих сил (см. формулу на рисунке).

На пятой странице **Вращение** свойств приведены параметры вращения тела:

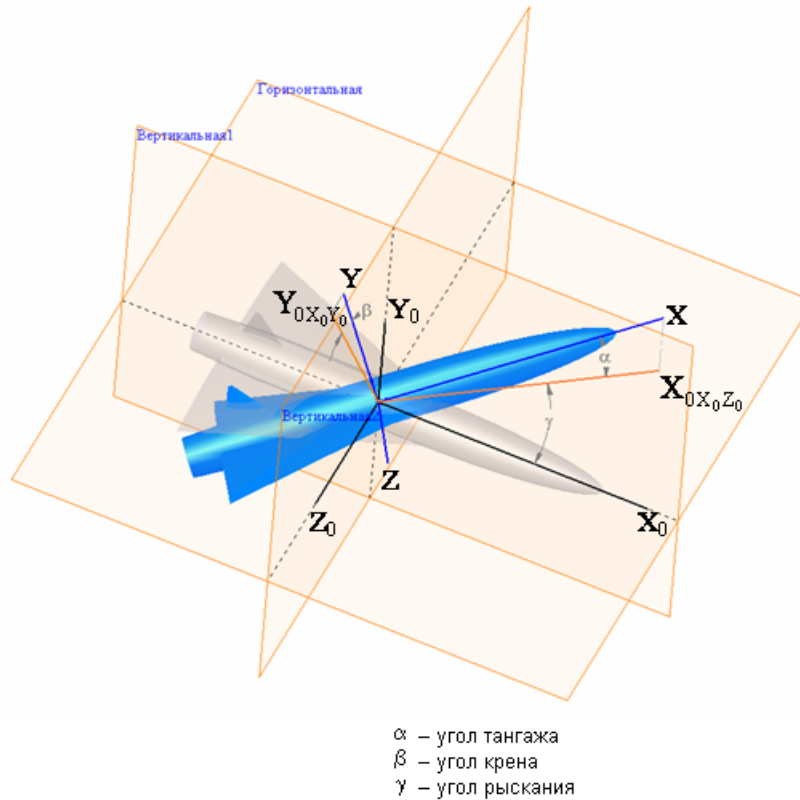


- **Wini [1/c]** – значения компонент угловой скорости в абсолютной системе координат.
- **M [H·m]** – значения компонент момента произвольной внешней силы.
- **Hydro** – если окно отмечено, то значение соответствующей компоненты угловой скорости определяется автоматически, исходя из гидродинамических сил, действующих на тело, и силы тяжести. При этом на нижней панели появляется дополнительное окно **Om**. Введите значение $Om < 1$, если хотите уменьшить эффект этих сил (см. формулу на рисунке).

На шестой странице свойств **Первоначальное месторасположение** задается начальное положение тела:



- **Центр** – начальное положение центра вращения тела в абсолютной системе координат.
- **Угол** – начальные углы поворота тела в самолетной нормальной системе координат: **Тангажа**, **Крена**, **Рыскания**.



Поворот определяется следующим образом:

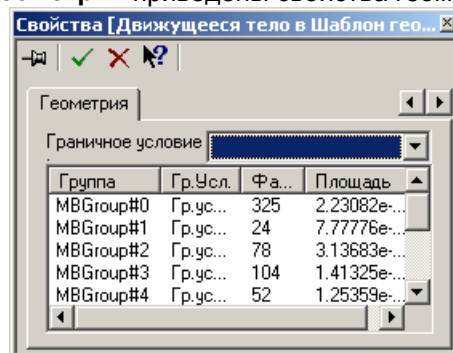
$$\vec{X} = (\cos \gamma \cos \alpha; \sin \alpha; -\sin \gamma \cos \alpha)$$

$$\vec{Y} = (\sin \beta \sin \gamma - \cos \beta \cos \gamma \sin \alpha; \cos \alpha \cos \beta; \sin \beta \cos \gamma + \cos \beta \sin \gamma \sin \alpha)$$

$$\vec{Z} = (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \beta \sin \gamma; -\cos \alpha \sin \beta; \cos \beta \cos \gamma - \sin \beta \sin \gamma \sin \alpha)$$

На следующей седьмой странице **Текущее месторасположение** приведено текущее положение тела в той же системе обозначений.

На последней восьмой странице **Геометрия** приведены свойства геометрии данного тела:



- **Граничное условие** – список граничных условий данной подобласти. Выберите в списке нужное условие. Это условие будет установлено на всех фасетках данного тела.
- Таблица в которой указаны имена групп **Группа**, граничные условия на них **Гр.Усл.**, количество **Фасетки** и площадь **Площадь** фасеток.

2.2.3.7.2 Фильтр подвижного тела, связанный с ABAQUS

Как было описано в разделе [Фильтры](#), этот фильтр (**Движущееся тело, связанное с ABAQUS**) образуется при импортировании геометрического файла из входного файла **ABAQUS** и сохранении связи с ним.

При импортировании из конечно-элементной сетки, записанной в inp-файле, создается поверхностная сетка, которая будет исходной геометрией фильтра для расчета в **FlowVision**. Кроме этого, определяются внешние грани конечно-элементной сетки, на которые будет экспортироваться давление из **FlowVision**. Функционально этот фильтр идентичен фильтру просто подвижного тела с небольшими ограничениями и дополнениями.

Это тело не может двигаться. Поэтому оно характеризуется меньшим количеством параметров. Для него необходимо определить только текущее положение (страница свойств **Текущее месторасположение** предыдущего фильтра) и свойства геометрии (страница свойств **Геометрия** предыдущего фильтра).

Этот фильтр имеет те же команды, что и обычный фильтр подвижного тела, геометрия которого была импортирована из конечно-элементной сетки **ABAQUS**:

- **Save Side Loadings in File** – выполняет запись в файл гидродинамических нагрузок на грани конечных элементов, образующие внешнюю поверхность данного тела. Можно также записывать локальные значения других расчетных переменных. Образуется обычный **include**-файл для **ABAQUS**, который содержит распределенное давление и другие характеристики на всех внешних гранях конечно-элементной сетки. Файл имеет расширение **dld** и имя совпадающее с именем файла, из которого проводилось импортирование сетки;
- **Load Displacements from File** – считывает из файла перемещения узлов конечно-элементной сетки, возникшие под действием приложенных сил, и изменяет форму поверхности тела в соответствии со считанными перемещениями. Перемещения считываются из файла результатов **ABAQUS** (**fil**-файл), имя которого совпадает с именем файла, из которого проводилось импортирование сетки.

2.2.3.7.3 Фильтр изотропной силы сопротивления

Сила сопротивления в уравнениях Навье-Стокса задается следующим образом:

$$(1) \quad \mathbf{R} = -B_{\mu} \mathbf{V} - C_{\rho} \frac{V|\mathbf{V}|}{2} - \frac{\lambda}{D_h} \rho \frac{V|\mathbf{V}|}{2}$$

где

$$D_h = \frac{4F}{U} \text{ – гидравлический диаметр (для канала произвольного сечения), [M],}$$

где F , m^2 и U , m , соответственно, площадь и периметр сечения канала.

B , C – коэффициенты сопротивления (константы).

Размерность этих констант равна соответственно: $[B] = m^{-2}$, $[C] = m^{-1}$.

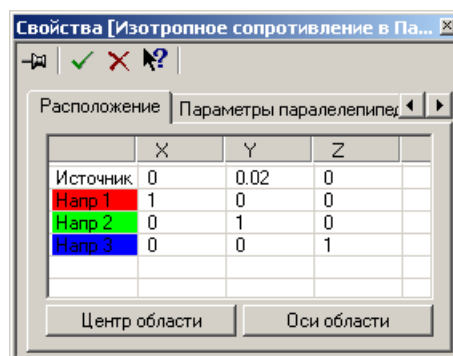
Следовательно, перепад давления определяется таким образом:

$$(2) \quad \Delta P = -R \cdot L,$$

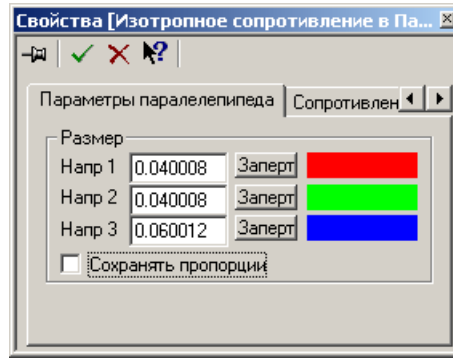
где L – линейный размер фильтра сопротивления в направлении течения.

Ниже описаны все страницы свойств данного фильтра.

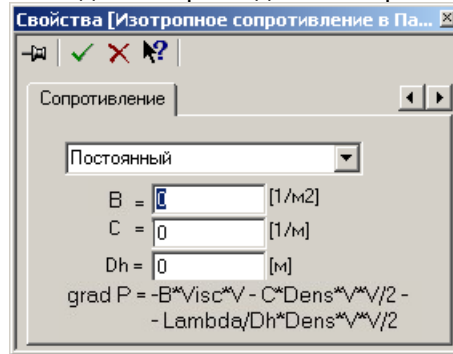
На странице свойств **Расположение** задается положение геометрического объекта, на котором базируется этот фильтр:



На странице свойств **Параметры параллелепипеда** задаются размеры геометрического объекта, на котором базируется этот фильтр:



На странице свойств **Сопротивление** задается время действия фильтра:



- **Постоянный** – фильтр действует постоянно;
- **Одноразовый** – фильтр одноразового действия. После воздействия фильтр автоматически переходит в состояние **Неактивный**;
- **Неактивный** – бездействующий.

На этой же странице задаются коэффициенты B , C , D_h уравнения (1).

2.2.3.7.4 Фильтр анизотропной силы сопротивления и источника тепловыделения

Данный фильтр устанавливает анизотропную силу сопротивления и источник тепловыделения. Сила сопротивления в уравнениях Навье-Стокса равна:

$$(1) \quad \mathbf{R} = -\mu \mathbf{D} \mathbf{V} - \rho \mathbf{E} \frac{|\mathbf{V}|}{2}$$

где ρ и μ – плотность и молекулярная вязкость жидкости соответственно, \mathbf{D} и \mathbf{E} – симметрические матрицы 3×3 , которые задают силу сопротивления течению жидкости. Размерность коэффициентов этих матриц равна соответственно: $[\mathbf{D}] = \text{м}^{-2}$, $[\mathbf{E}] = \text{м}^{-1}$.

Тепловыделение в уравнении энергии ($\text{Вт}/\text{м}^3$) Q задается в виде:

$$(2) \quad Q = Q_0 + b \cdot |\mathbf{V}|^n,$$

где Q_0 и b – коэффициенты, n – показатель степени.

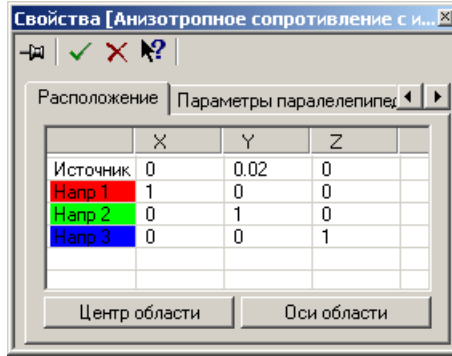
Таким образом, нужно вводить числа:

\mathbf{D} и \mathbf{E} – каждая матрица задается шестью числами,
 Q_0 , b и n – три вещественных числа.

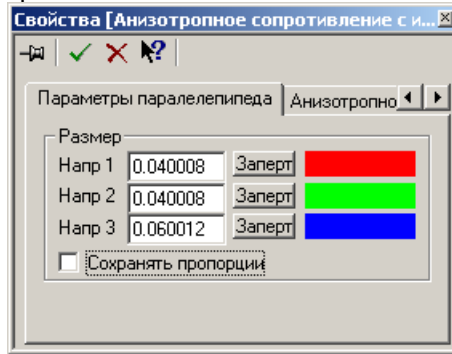
"Уравнение" вводится для всех параметров, кроме показателя степени n .

Ниже описаны все страницы свойств данного фильтра.

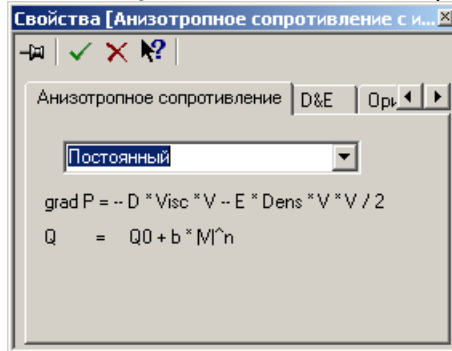
- На странице свойств **Расположение** задается положение геометрического объекта, на котором базируется этот фильтр:



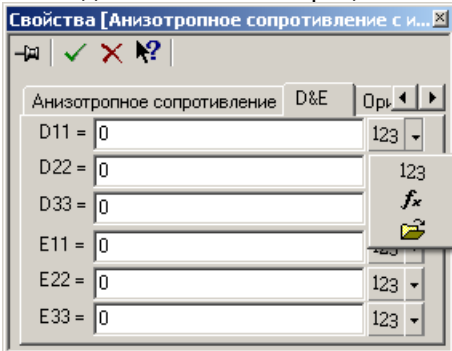
- На странице свойств **Параметры параллелепипеда** задаются размеры геометрического объекта, на котором базируется этот фильтр:



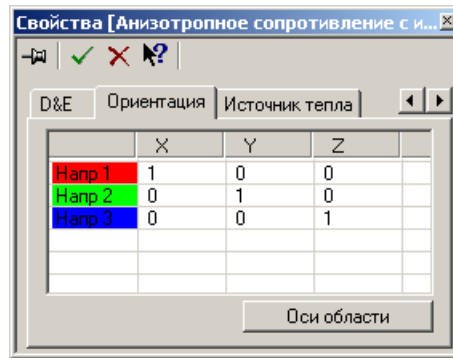
- На странице свойств **Анизотропное сопротивление** задается время действия фильтра:



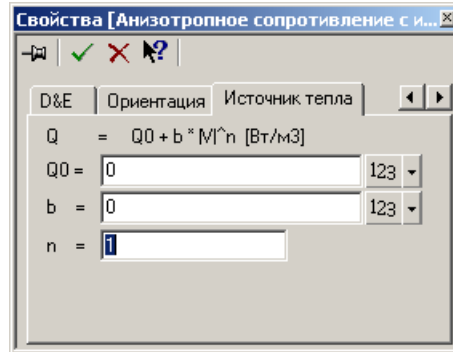
- **Постоянный** — фильтр действует постоянно;
- **Одноразовый** — фильтр одноразового действия. После воздействия фильтр автоматически переходит в состояние **Неактивный**;
- **Неактивный** — бездействующий.
- На странице свойств **D&E** задаются диагональные матрицы 3x3 из уравнения (1):



- Поскольку матрицы являются диагональными, то они задаются только тремя коэффициентами. Значения коэффициентов могут задаваться: константами, с помощью уравнений или с помощью dll.
- На странице свойств **Ориентация** задается направление, в котором действует заданное сопротивление:



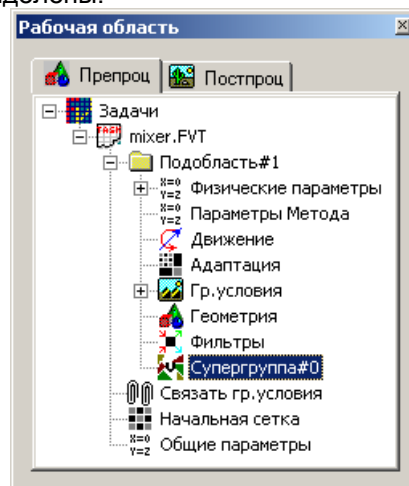
- На странице свойств **Источник тепла** задается источник тепловыделения:



Здесь задаются коэффициенты для уравнения (2). Значения коэффициентов могут задаваться, как константами, так и уравнениями аналогично заданию коэффициентов матриц D и E.

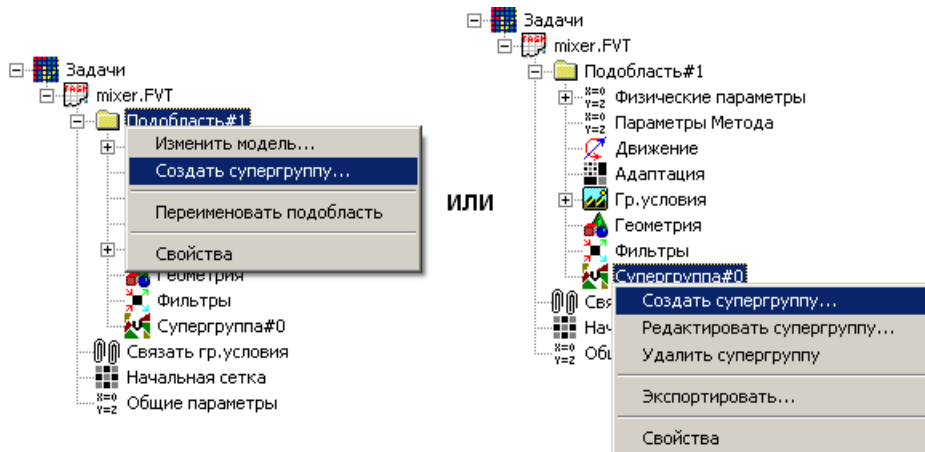
2.2.3.8 Супергруппы

Для более детальной работы с подобластью существует набор средств, объединенных в элементе дерева, называемом **супергруппа**. Супергруппа – это подмножество множества групп подобласти, которой супергруппа принадлежит. Супергруппа располагается в папке подобласти. Подобласть может иметь сколько угодно супергрупп. В процессе работы пользователь имеет возможность создавать новые супергруппы, изменять уже существующие (т.е. менять список групп, из которых состоит супергруппа), а также устанавливать граничные условия на супергруппах. Кроме того, супергруппа может быть экспортирована в постпроцессор как сложный фасеточный объект и на этом объекте могут быть построены слои визуализации (например, **Заливка**, **Изолинии** или **Характеристики**). Для того, чтобы увидеть супергруппу в графическом окне, нужно выделить ее элемент в дереве препроцессора. При этом фасетки групп супергруппы будут выделены.



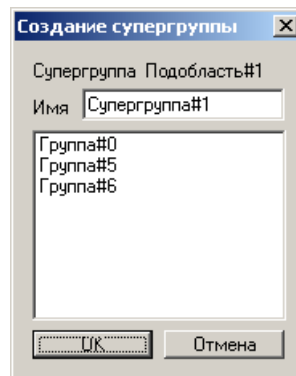
2.2.3.8.1 Создание супергруппы

Новая супергруппа может быть создана или из пункта контекстного меню подобласти, или из пункта контекстного меню уже существующей супергруппы.



В первом случае новая супергруппа будет принадлежать подобласти, меню которой было вызвано. Во втором случае новая супергруппа будет принадлежать той же подобласти, что и та, меню которой было вызвано. В обоих случаях после выбора пункта меню **Создать супергруппу...** появится окно редактирования супергруппы.

В окне редактирования супергруппы отображаются (сверху вниз): название подобласти, которой принадлежит супергруппа, название супергруппы, которое можно редактировать, список групп подобласти, из которых состоит супергруппа.



В список можно добавлять новые группы и удалять из него существующие.

Для того, чтобы добавить группу в список, препроцессор должен находиться в режиме выбора геометрии (кнопка нажата). Тогда выбор группы в графическом окне приводит к добавлению группы в список, если ее там не было и к удалению группы из списка, если она там уже была. Выбор одной и той же группы два раза подряд оставляет список без изменений.

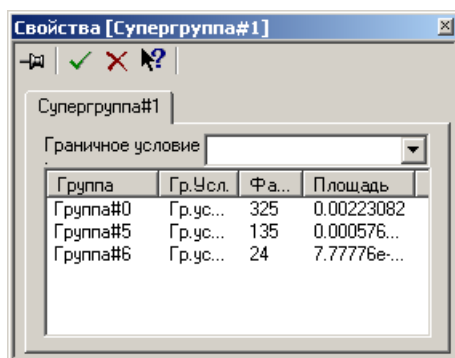
Группу можно также удалить из списка, если выделить в списке строку с ее именем и нажать клавишу **Del** на клавиатуре.

Для того, чтобы начать редактирование существующей супергруппы, нужно выбрать из ее контекстного меню пункт **Редактировать супергруппу...**

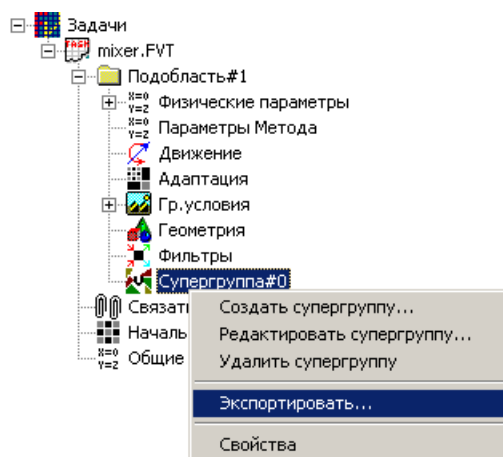
Для того, чтобы удалить существующую супергруппу, нужно выбрать из ее контекстного меню пункт **Удалить супергруппу**.

2.2.3.8.2 Установка граничных условий на супергруппе

В окне свойств супергруппы отображена информация о группах, ее составляющих: названия групп, граничные условия, стоящие на группах, количество фасеток в каждой из групп, а также площади поверхности групп. В этом же окне можно установить на всех группах супергруппы одно граничное условие, любое из граничных условий подобласти. Для этого нужно выбрать граничное условие из выпадающего списка **Граничное условие** и нажать для внесения изменений.



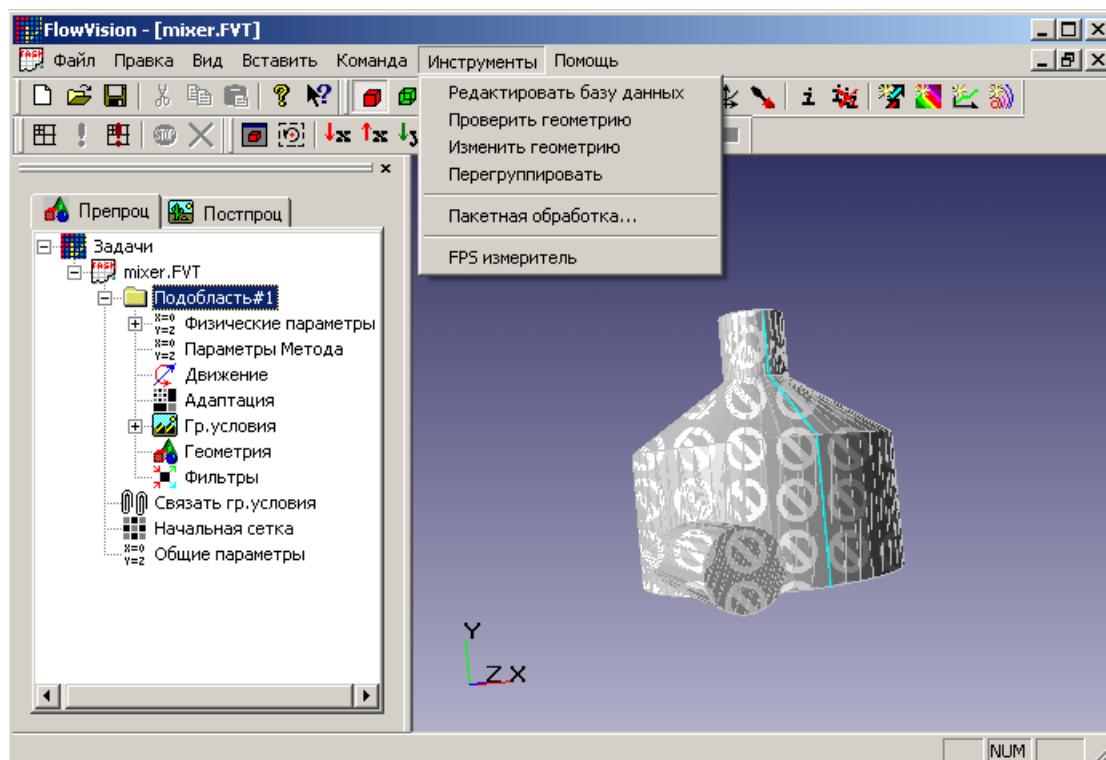
2.2.3.8.3 Экспорт геометрического объекта



Супергруппа состоит из групп, каждая из которых состоит в свою очередь из фасеток. Поэтому супергруппа может быть представлена как набор фасеток. Существует возможность создания нового сложного геометрического объекта на основе супергруппы. Для того, чтобы создать объект, нужно выбрать из контекстного меню супергруппы пункт **Экспортировать...**. При этом в папке **Объекты** дерева постпроцессора появится новый объект с именем "**От #####**", где **#####** – имя супергруппы-экспортера. На этом объекте можно построить любой слой, который имеет в качестве базового объекта **объект, полученный из супергруппы**. После экспортирования связь между супергруппой и объектом разрывается, и, таким образом, изменение списка групп супергруппы не приводит к изменению набора фасеток экспортированного объекта. Если супергруппа изменилась, объект нужно экспортировать заново.

2.2.4 Вспомогательные инструменты FlowVision

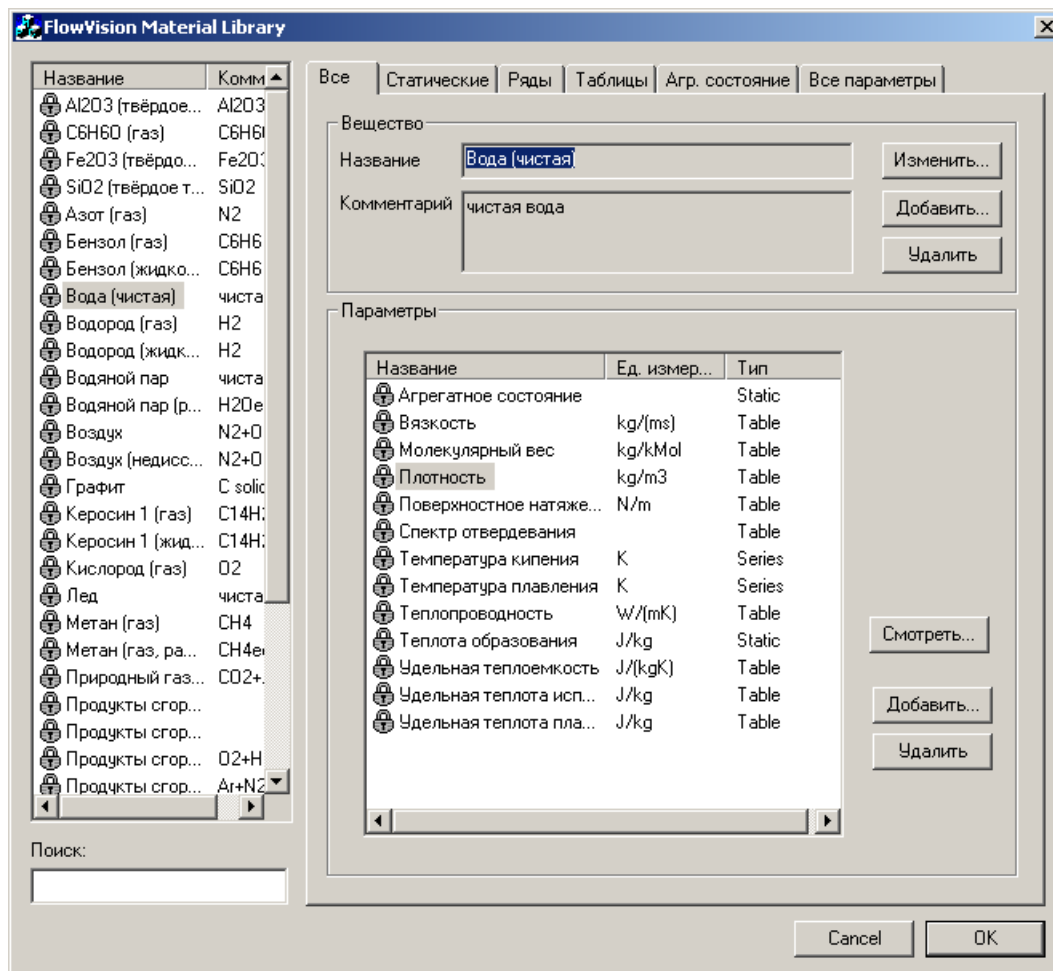
При необходимости можно воспользоваться вспомогательными инструментами **FlowVision**. Они включают в себя редактирование базы данных веществ и загружаемой геометрии. Вспомогательные инструменты находятся в пункте меню **Инструменты**.



2.2.4.1 Редактирование базы данных

Библиотека состоит из двух частей – стандартной и пользовательской. Стандартная (базовая) библиотека заполняется производителем **FlowVision** и доступна пользователю в режиме "только для чтения". Вторая часть предназначена для заполнения пользователем. Имеется возможность добавлять как новые вещества со стандартными параметрами, так и новые параметры. Вещества и параметры, введенные пользователем, могут быть в дальнейшем изменены или удалены.

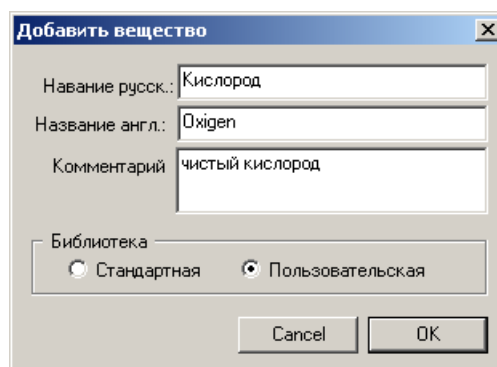
Для внесения изменения в базу данных выберите в меню пункт **Инструменты Редактировать базу данных**. Появится окно редактора базы данных.



Слева находится список всех веществ, находящихся в базе данных. Под ним поле ввода для быстрого поиска вещества. Стандартные вещества и параметры отмечены специальным значком, показывающим, что редактирование и удаление запрещено. На странице **Все** отображается список всех параметров данного вещества. Следующие три страницы группируют параметры по типам и позволяют просматривать их значения. Страница **Статические** отображает информацию об агрегатном состоянии вещества. Страница **Все параметры** позволяет работать с параметрами в базе данных безотносительно к веществам.

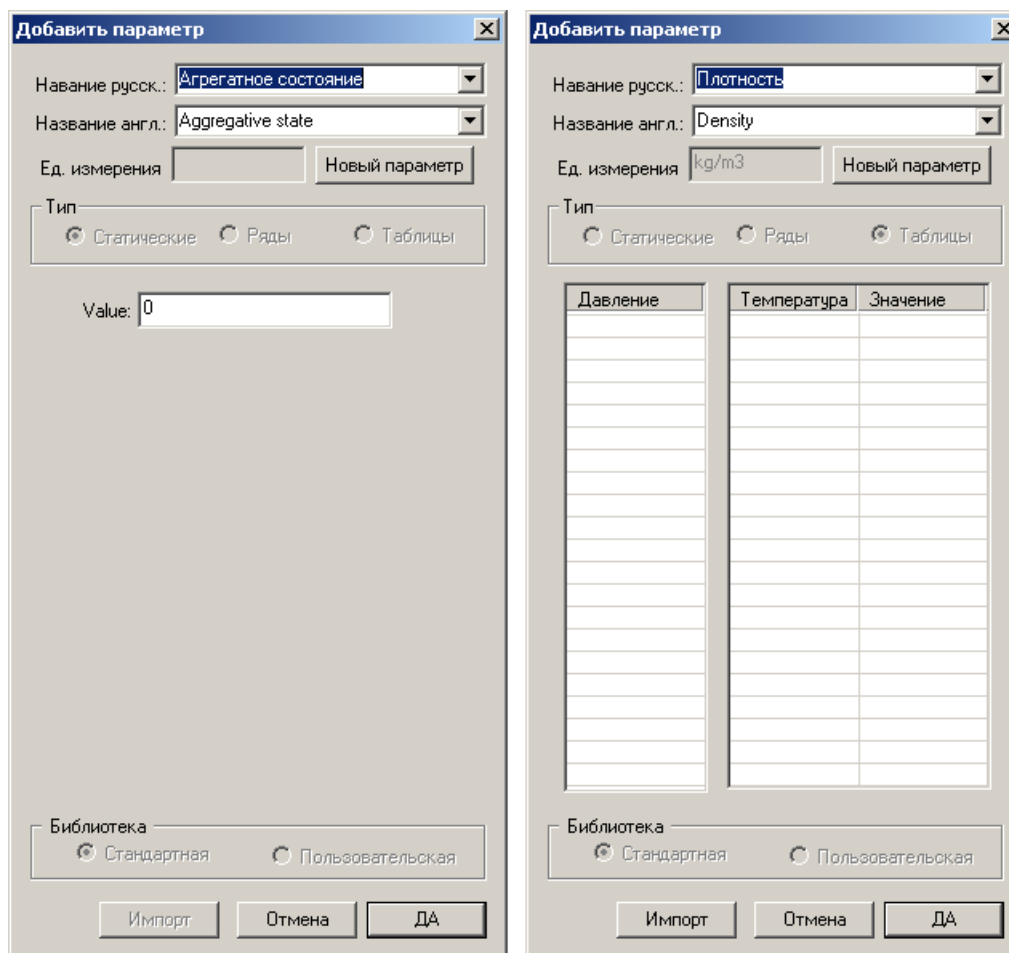
2.2.4.1.1 Добавление вещества

Для добавления нового вещества нажмите кнопку **Добавить** на панели вещества **Вещество**, после этого открывается диалоговое окно.



2.2.4.1.2 Добавление параметра

Для добавления параметра к веществу нажмите кнопку **Добавить** на панели параметров. При этом открывается диалоговое окно:



Первоначально, диалог находится в режиме ввода нового параметра (кнопка **Новый параметр** нажата). Выберите тип параметра и в поля ввода введите данные.

Параметры вещества могут быть одного из трех типов:

- **Статические** – значением параметра является число.
- **Ряды** – для них в базе данных хранятся последовательности пар чисел, характеризующие зависимость значения параметра от давления.
- **Таблицы** – табличные параметры, значения которых зависят как от давления, так и от температуры. Для каждого значения давления в библиотеке веществ хранится массив пар чисел (температура-значение).

Для добавления к веществу уже существующего в базе данных параметра выберите в ниспадающем списке название этого параметра. Произойдет автоматическое переключение типа параметра и заполнение полей ввода. Введите или импортируйте значения параметра.

Импорт осуществляется из текстовых файлов следующего формата:

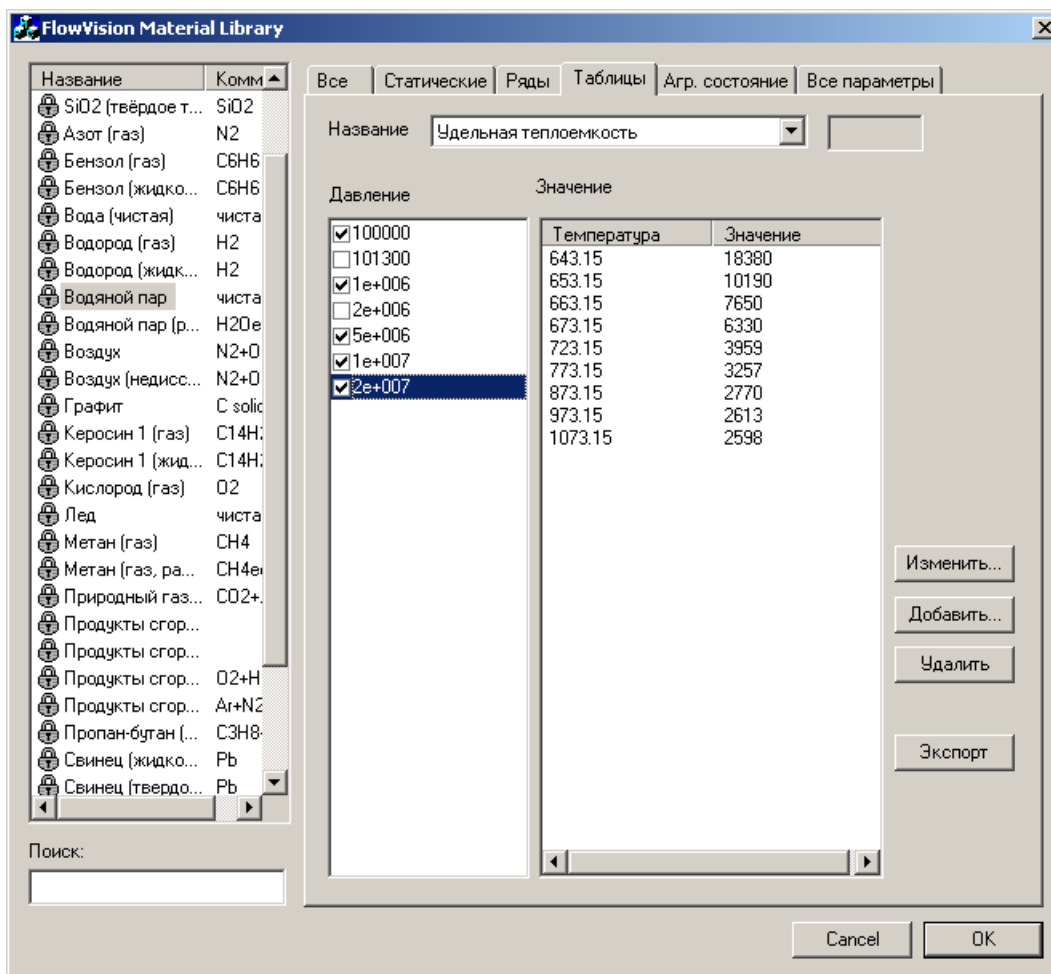
- для параметра типа **Ряды** первая колонка значений в файле является значениями давления, вторая – значения параметра.
- для параметра типа **Таблицы** первая колонка – значения давления, вторая колонка – значения температуры, третья колонка – значения параметра.

Аналогично выполняется добавление информации об агрегатном состоянии вещества (страница **Статические**).

Удаление параметра происходит по нажатию на кнопку **Delete**. При этом удаляются связь параметра с текущим веществом и ассоциированные с веществом значения параметра. Сам параметр остается в библиотеке и в других веществах. Полное удаление параметра возможно на последней странице [Все параметры](#).

2.2.4.1.3 Графическое отображение данных

В библиотеке материалов **FlowVision** предусмотрена возможность визуализации хранимой информации - значений параметров типа **Ряды** и **Таблицы**, а также сведений об агрегатном состоянии вещества. Для показа графика отметьте соответствующее поле в списке давлений (страница **Ряды** или **Таблицы**).



Поля значений на странице **Таблицы**.

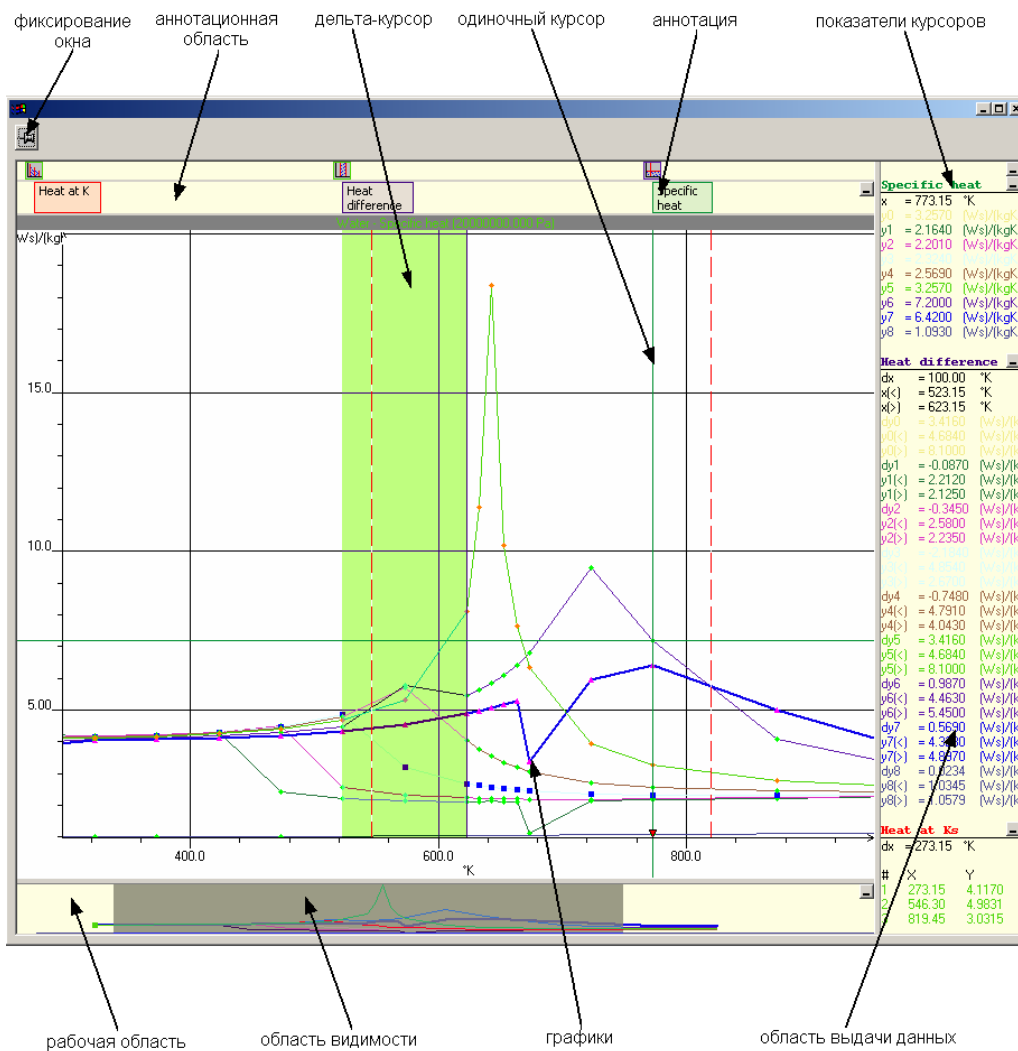
В процессе просмотра графиков пользователю доступен следующий инструментарий:

- масштабируемые оси координат

- увеличение части графика – (Ctrl+mouse)

- различные типы курсоров для анализа данных (правая кнопка мыши)

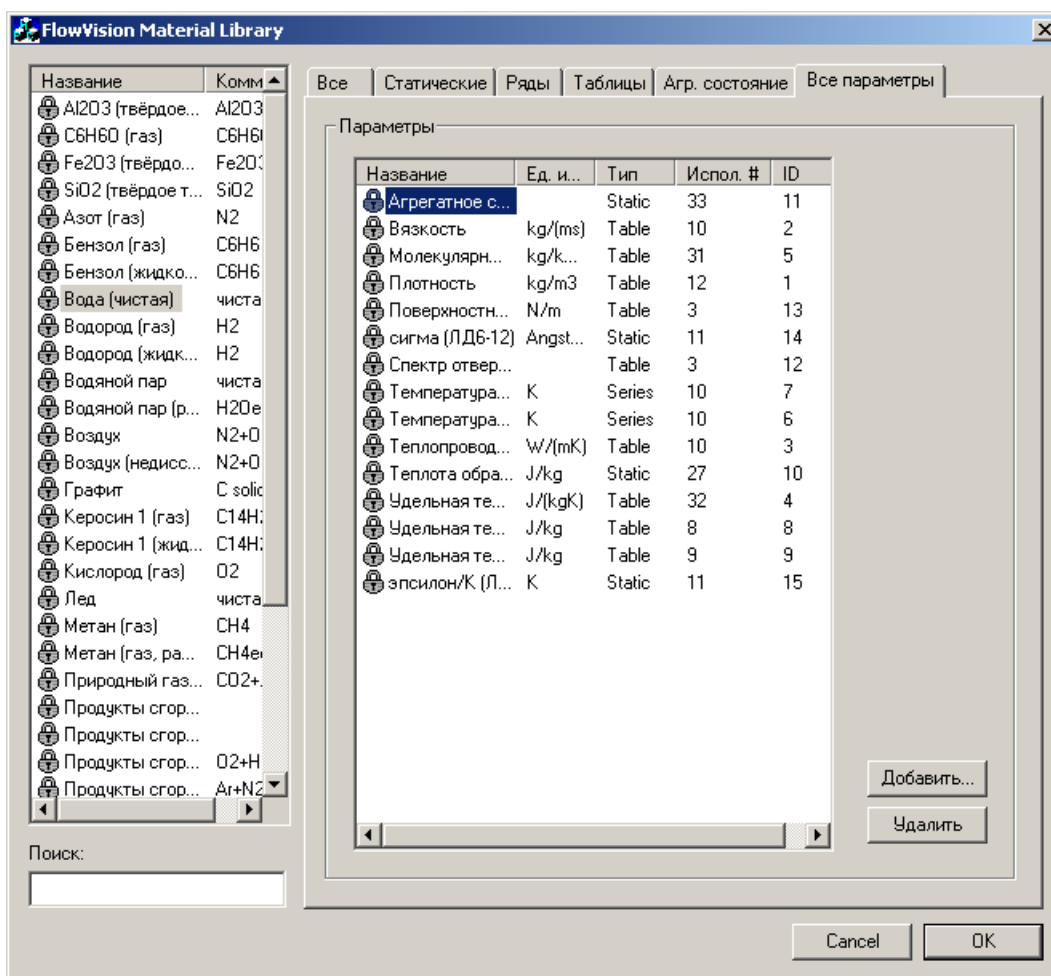
При нажатии правой кнопки мыши над различными элементами графика появляется контекстное всплывающее меню, позволяющее проводить настройку отображения и управлять активными элементами (оси, графики, курсоры).



Окно графического отображения данных.

2.2.4.1.4 Все параметры в библиотеке

Последняя страница окна редактора базы данных (**Все параметры**) содержит все свойства веществ, поддерживаемые **FlowVision**. Занятость свойств в веществах представлена в колонке **Испол.#**.



2.2.4.2 Дополнительные инструменты для работы с геометрией

Пункт меню **Инструменты** также содержит некоторые дополнительные инструменты для работы с геометрией, которые позволяют решать проблемы, возникающие при загрузке:

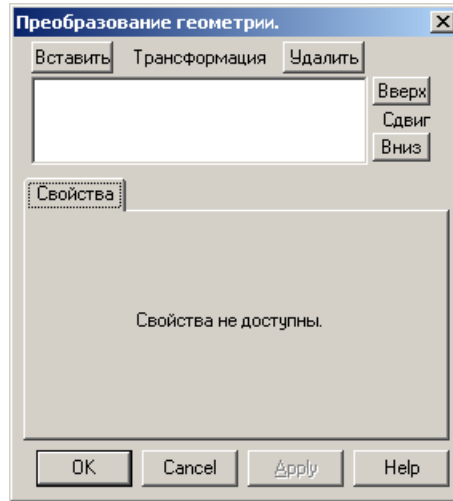
- [преобразование загруженной геометрии \(масштабирование, сдвиг и вращение\)](#),
- [переразбиение загруженной геометрии на группы](#).

2.2.4.2.1 Преобразование геометрии

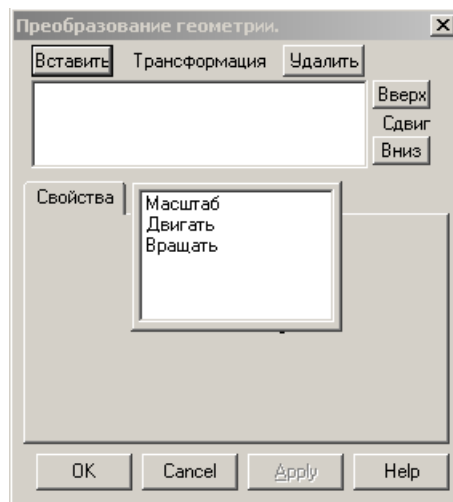
Меню **Инструменты** содержит инструмент **Изменить геометрию** для преобразования геометрии, позволяющий масштабировать, сдвигать и вращать загруженную геометрию.

Для того, чтобы осуществить преобразование геометрии:

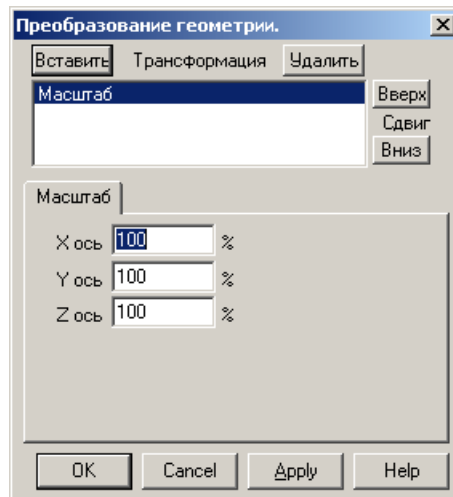
- Выберите в меню **Инструменты** пункт **Изменить геометрию**.
- Появится окно преобразования геометрии.



- При нажатии на кнопку **Вставить** появится возможность выбора вида преобразования: **Масштаб**, **Двигать**, **Вращать**.

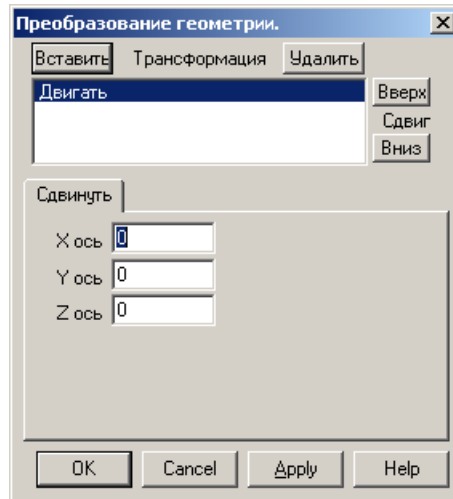


- При выборе вида преобразования активизируется окно свойств. Вид окна свойств зависит от типа преобразования.
- В окне свойств для преобразования **Масштаб** предлагается выбрать коэффициент масштабирования загруженной геометрии по каждой из осей. Может применяться в случае, когда загружена геометрия, построенная не в международной системе единиц. Иными словами, если, например, расчетная область была построена в какой-либо САПР в миллиметрах, во **FlowVision** эти же значения размеров будут соответствовать метрам, и для того чтобы учесть соотношение между этими единицами, необходимо использовать этот инструмент преобразования геометрии.

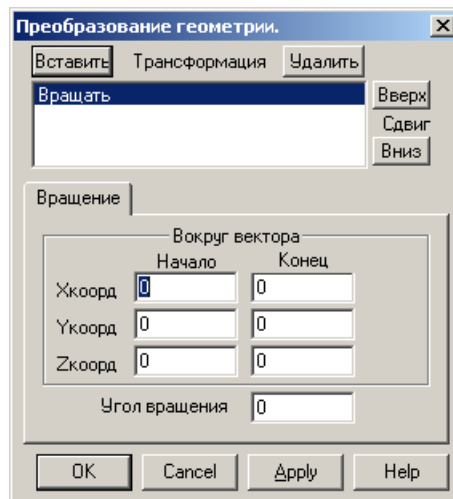


- В окне свойств для преобразования **Двигать** предлагается выбрать перемещение загруженной

геометрии по каждой из осей. Таким образом изменяется положение центра системы координат.



- В окне свойств для преобразования **Вращать** предлагается выбрать координаты вектора, вокруг которого осуществляется поворот загруженной геометрии, и угол поворота.



- Можно выбрать несколько различных преобразований. Тогда после выбора набора преобразований в окне появится их список. Последовательность применения действий над исходной геометрией устанавливается кнопками **Вверх** и **Вниз**.
- После добавления каждое преобразование может быть удалено из списка кнопкой **Удалить**.
- Для того чтобы применить выбранные преобразования, нажмите кнопку **Apply** и закройте окно.

2.2.4.2.2 Перегруппировка геометрии

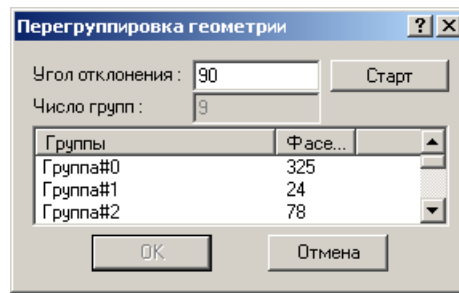
При создании геометрии в САПР происходит автоматическое разбиение геометрии на фасетки в зависимости от точности выбранного геометрического представления. При загрузке исходной геометрии во **FlowVision** из САПР происходит автоматическое объединение полученных фасеток в группы. При работе с геометрией во **FlowVision** пользователь имеет возможность работать как с группами фасеток, так и с отдельными фасетками. Возможность работы с отдельными фасетками описана в разделе [Предустановки препроцессора](#).

В случае, когда имеется довольно сложная геометрия с большим количеством фасеток, гораздо удобнее работать с группами фасеток. Во **FlowVision** возможна автоматическая расстановка граничных условий для геометрии, загружаемой из файлов, форматы которых сохраняют информацию о цветах граней. В этом случае присвоение фасеткам граничных условий происходит по цвету. Расстановку граничных условий, в случае, когда они не присваиваются автоматически, обычно осуществляют на группах. Разбиение на группы происходит автоматически при загрузке геометрии из САПР. Как правило, автоматическое разбиение на группы оказывается наиболее удобным. Но в случае, когда автоматическое разбиение на группы не позволяет расставить граничные условия желаемым образом, можно осуществить переразбиение геометрии на группы фасеток.

Для того, чтобы осуществить переразбиение геометрии на группы:

- Выберите в меню **Инструменты** пункт **Перегруппировать**.

- Появится окно разбиения геометрии на группы.



- В этом окне показаны следующие параметры геометрии:
 - **Угол отклонения** – угол между нормальными соседних фасеток, принадлежащих разным группам. Например, в случае, когда загруженная геометрия представляет из себя кубик, угол отклонения, равный 90°, означает, что одна группа фасеток соответствует одной грани кубика. Таким образом, чем угол отклонения меньше, тем мельче разбиение на группы, и наоборот, чем этот угол больше, тем крупнее разбиение. Изменение данного параметра позволяет осуществлять различные разбиения фасеток на группы. По умолчанию показан угол, выбранный при автоматическом разбиении.
 - **Число групп** – количество групп фасеток при заданном угле отклонения.
 - В списке показаны все существующие группы и количество фасеток в каждой из них.
- Для того чтобы задать новое разбиение, измените значение **Угол отклонения**.
- После этого нажмите кнопку **Старт**.
- Когда процесс разбиения будет закончен, в окне появится обновленное количество групп и их список.
- Чтобы принять полученное разбиение, нажмите кнопку **ОК**, в противном случае нажмите кнопку **Cancel**.

2.2.4.3 Пакетная обработка результатов

Во **FlowVision** имеется вспомогательный инструмент **Пакетная обработка**, осуществляющий пакетную обработку файлов результатов.

Этот инструмент позволяет сохранять серии изображений для последовательности записанных вариантов. На основе сохраненных таким образом изображений можно создавать анимации нестационарных процессов (создание анимаций может быть сделано в любом внешнем пакете, например, [GIF Movie Gear](#)).

Для сохранения серии изображений необходимо выполнить следующие действия:

1. Записать последовательность вариантов **FlowVision**. Для этого нужно активизировать опцию **Общие параметры Время Создавать копии файла**, указать интервал сохранения вариантов и запустить задачу на расчет (см. раздел [Время расчета и сохранения варианта](#)).
2. После того как будет проведен расчет и сохранены промежуточные результаты, необходимо в одном из записанных вариантов создать слои визуализации и сохранить их в сцены, каждая из которых будет соответствовать своей серии изображений (см. раздел [Сохранение и загрузка состояния постпроцессора](#)).
3. Затем на основе сохраненных сцен создается и сохраняется файл сценария (см. раздел [Отрисовка сценария](#)).
4. В завершении в каком-либо текстовом редакторе нужно создать исполняемый **batch**-файл и сохранить его в кодировке ANSI с расширением **fvb**. Этот файл должен иметь следующий вид:


```
scenario.xml
var1_0000.fvt
var1_0001.fvt
var1_0002.fvt
```

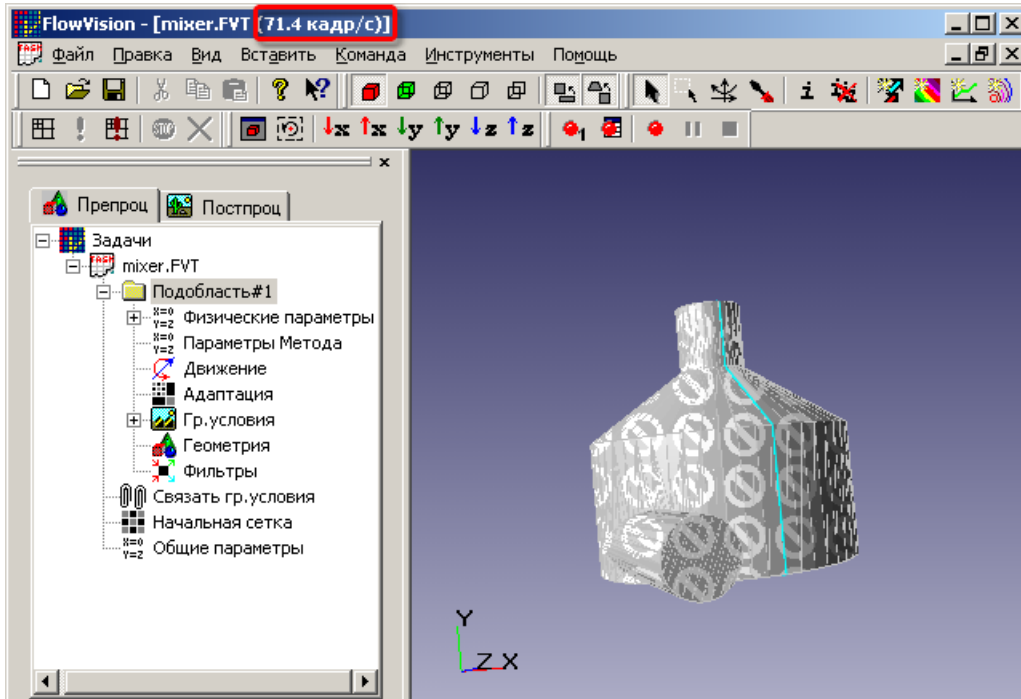
В первой строке этого файла указан файл сценария, в последующих строках – файлы вариантов, которые необходимо обработать.
5. После выполнения всех перечисленных действий с помощью инструмента **Пакетная обработка** в диалоге выбора **batch**-файла указывается созданный **fvb**-файл.

После выполнения **batch**-файла последовательность изображений будет сохранена в папке **RENDER** (автоматически создаваемой в месте нахождения **batch**-файла).

2.2.4.4 Справочный инструмент FPS Meter

Во **FlowVision** имеется вспомогательный инструмент **FPS измеритель**, помогающий контролировать производительность видеоподсистемы персонального компьютера.

При активизации данного инструмента в пункте меню **Инструменты** в самой верхней строке окна **FlowVision** после названия варианта появляется информация о количестве кадров, воспроизводимых видеоподсистемой компьютера, в секунду. Этот инструмент помогает оценить распределение ресурсов системы. Подробнее описание работы этого инструмента смотрите в описании средства постпроцессора [Счетчик кадров](#).



2.2.5 Связывание граничных условий

Для задания периодики на двух поверхностях следует связать эти две поверхности при помощи граничных условий. Каждая пара периодических граничных условий может быть связана только в пределах одной подобласти.

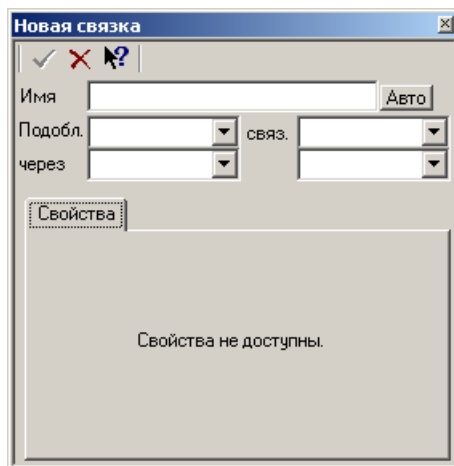
Кроме периодических граничных условий также необходимо связывать граничные условия следующих типов:

- **Сопряженное** используется для задания взаимодействия между двумя подобластями. Например, для расчета сопряженного теплообмена между областью с жидкостью и областью с твердым телом.
- **Скользкая поверхность** используется для задания границы взаимодействия между двумя подвижными подобластями. Более подробно смотри в томе [Введение](#).

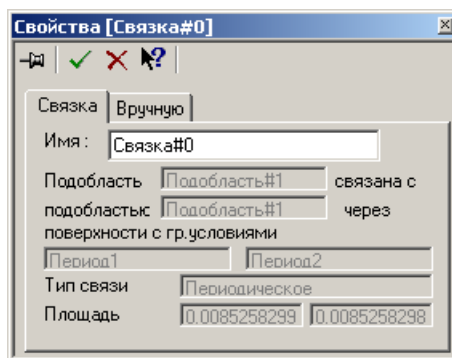
Все связанные граничные условия отображаются в дереве в папке **Связать гр.условия**.

Для того, чтобы связать два граничных условия:

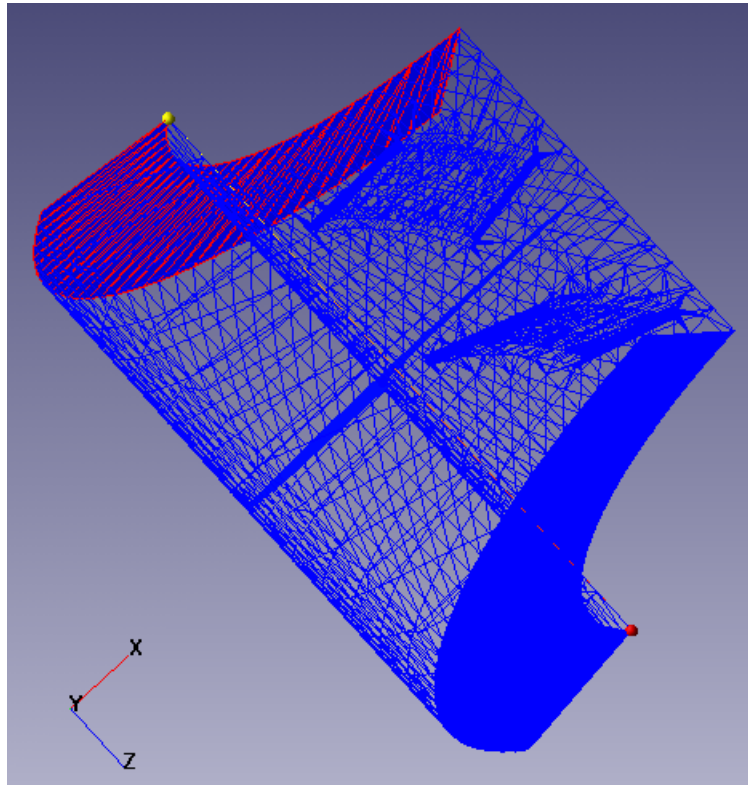
- Выделить папку **Связать гр.условия**, нажать правую кнопку мыши и выбрать пункт **Создать** в контекстном меню.
- Появится окно создания связи. В окошке **Имя** следует указать название данной связи. Если ничего не указывать, то имя будет создано по умолчанию.



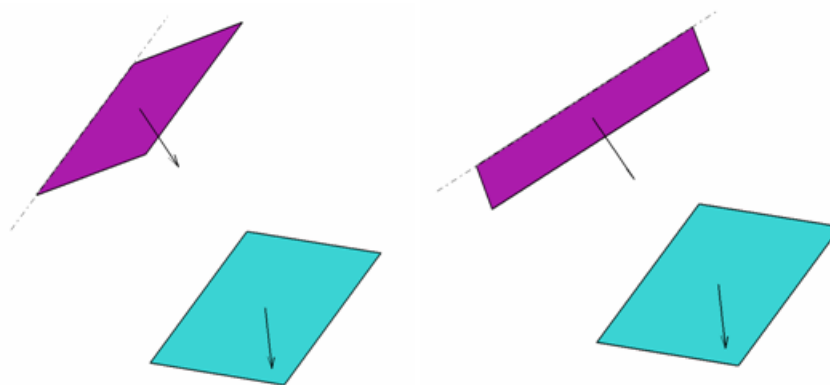
- В окнах **Подобл.** и **связ.** необходимо указать какие подобласти будут связываться. При связывании периодических границ в обоих окнах указывается одна и та же подобласть.
- В следующих окнах необходимо указать через какие граничные условия будет осуществляться связь. При связывании периодических границ в обоих окнах указывается одна и даже подобласть.
- Нажмите кнопку для подтверждения изменений или для их отмены.
- Закройте окно **Новая связка**. В дереве появится новый элемент, соответствующий вновь созданной связи. Его свойства будут выглядеть следующим образом:



А в рабочем окне будет выделена пара связанных граничных условий и красной штриховкой будет показана проекция одного граничного условия на другое. Если связывание осуществлено правильно, то эта проекция должна совпасть со связываемым граничным условием:

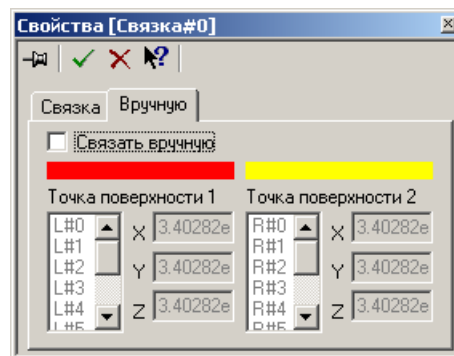


Описанная выше процедура позволяет производить связывание граничных условий в автоматическом режиме. Однако, иногда программа не может найти преобразование, которое бы проецировало поверхность одного граничного условия на поверхность другого – см. рисунок ниже. Для этого случая существует возможность ручной корректировки связывания.



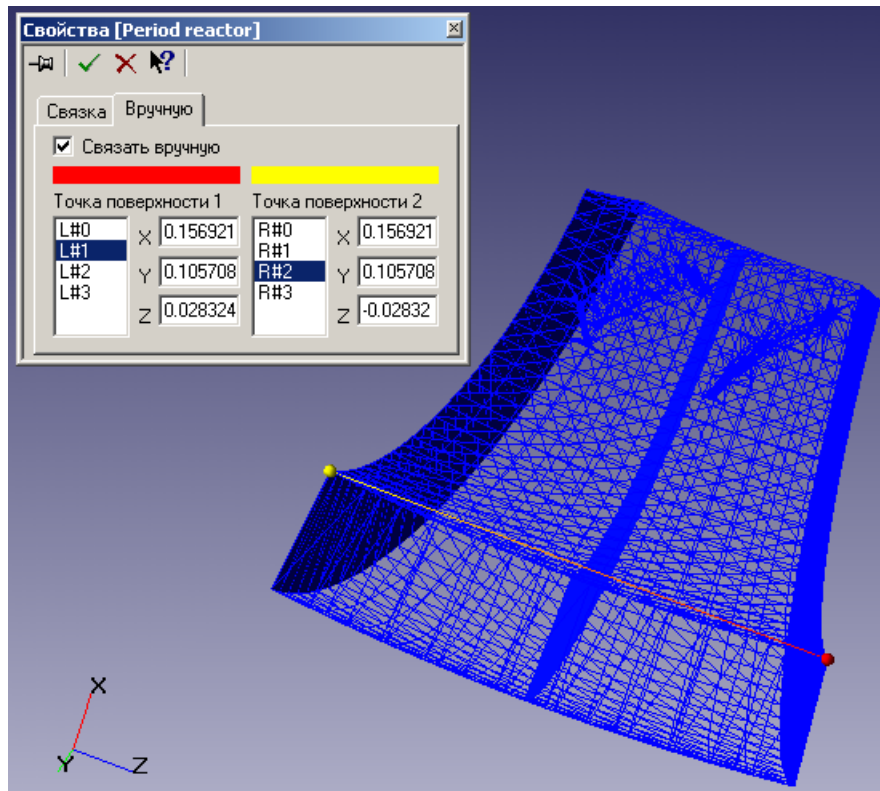
а) возможно автоматическое связывание б) невозможно автоматическое связывание

Задать связывание вручную можно на второй странице свойств:



- Включение флага **Связать вручную** позволяет перейти в ручной режим связывания граничных условий.
- В списках **Точка поверхности 1** и **Точка поверхности 2** находятся точки контуров связываемых поверхностей.

- Вы можете выбрать одну точку из левого списка и одну – из правого. Эти две точки зададут отображение поверхностей. Кроме того, справа от каждого списка находятся поля для координат точек. Координаты можно ввести вручную. Точное задание координат не требуется – программа выберет ближайшую точку на соответствующем контуре. Точки, задающие отображение поверхностей, будут показаны в рабочем окне.

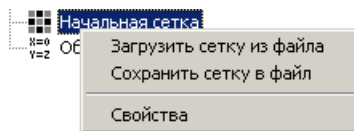


2.2.6 Задание начальной сетки

Для проведения расчета необходимо задать сетку нулевого уровня (начальную сетку).

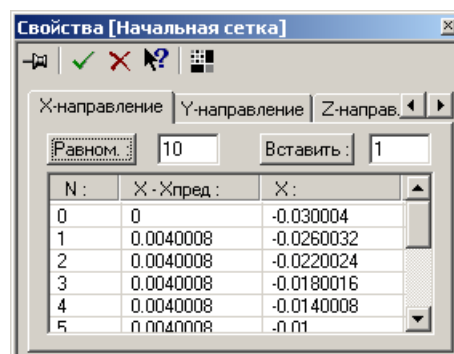
Задание сетки нулевого уровня:

Выделите элемент дерева **Начальная сетка**, нажмите правую кнопку мыши, появится контекстное меню, состоящее из трех пунктов: **Загрузить сетку из файла**, **Сохранить сетку в файл** и **Свойства**.



1) Задание сетки нулевого уровня в окне свойств начальной сетки:


- Выберите пункт **Свойства** в контекстном меню элемента дерева **Начальная сетка**.
- Появится окно свойств начальной сетки. В этом окне три страницы, которые определяют начальную сетку по X-, Y- и Z-направлениям соответственно. Отредактируйте начальную сетку. Возможности редактирования описаны ниже.



- Нажмите кнопку для подтверждения изменений или для их отмены.

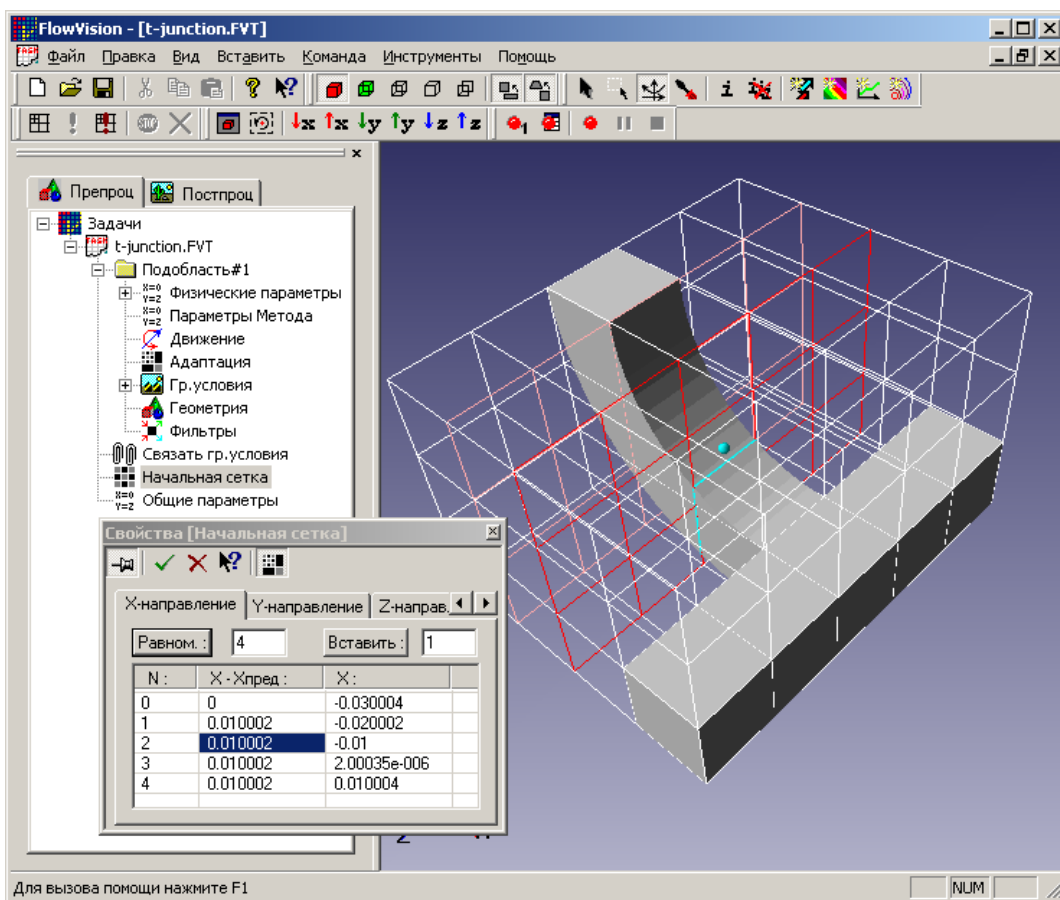
На странице свойств сетки присутствуют следующие элементы:

- таблица сеточных линий – показывает информацию о всех линиях начальной сетки. В таблице указаны: номер, расстояние до предыдущей линии и координата линии;
- кнопка **Равном.** – позволяет разбить весь диапазон координат с постоянным шагом. В окне справа от этой кнопки приведено количество шагов сетки;
- кнопка **Вставить** – позволяет вставить перед выделенной линией столько линий, сколько указано в окне справа от кнопки.

Если во время вызова свойств начальной сетки в графическом окне присутствовал слой **Расчетная сетка** (см. раздел [Расчетная сетка](#)), то при редактировании сетки активная линия будет отображаться в графическом окне красным цветом. Если такого слоя не было, то его можно создать прямо из окна свойств, нажав на кнопку  в панели инструментов.

Существуют следующие операции редактирования начальной сетки по данному направлению системы координат:

- задать равномерную сетку по всей области;
- изменить координаты линии сетки;
- удалить линию сетки;
- вставить одну или несколько сеточных линий.



Равномерная сетка нулевого уровня.

Задание равномерной сетки по всей расчетной области:

- введите количество сеточных интервалов в окошко, расположенное справа от кнопки **Равном.**;
- нажмите на кнопку **Равном.** Вся область расчета будет разбита на указанное число интервалов постоянной длины.

Изменение координаты сеточной линии:

- выделите нужную линию сетки, щелкнув левой кнопкой мыши по ее координате или расстоянию до предыдущей линии в таблице сеточных линий. В графическом окне выделенная сеточная плоскость будет подсвечена красным цветом;
- нажмите на левую кнопку мыши еще раз. Появится окно редактирования значения;
- введите новое значение координаты сеточной линии или расстояния до предыдущей линии.

Удаление линии сетки:

- выделите нужную линию сетки, щелкнув левой кнопкой мыши по строке в таблице сеточных линий;
- нажмите клавишу **Delete** на клавиатуре. Линия будет удалена.

Вставка одной или нескольких линий сетки:

- выделите линию сетки, перед которой надо вставить линии, щелкнув левой кнопкой мыши по строке в таблице сеточных линий;
- в окошко справа от кнопки **Вставить** введите количество вставляемых линий;
- нажмите кнопку **Вставить**. Перед выделенной линией будет вставлено указанное количество линий с постоянным шагом между ними.

Вставка одной линии сетки:

- выделите линию сетки, перед которой надо вставить линии, щелкнув левой кнопкой мыши по строке в таблице сеточных линий;
- нажмите клавишу **Вставить** на клавиатуре. Перед выделенной линией будет вставлена одна линия.

2) Сохранение сетки нулевого уровня в файл:

- Выберите пункт **Сохранить сетку в файл** в контекстном меню элемента дерева **Начальная сетка**.
- Появится окно с предложением сохранить начальную сетку в текстовый файл.
- После задания имени файла и нажатия кнопки **Сохранить** будет создан текстовый файл в следующем формате:

```
;INITIAL GRID
;Grid size (x, y, z)
<N>, <N>, <N>
;X
<coord>
...
<coord>
;Y
<coord>
...
<coord>
;Z
<coord>
...
<coord>
```

где:

<N> – количество сеточных линий по данному направлению
<coord> – координата сеточной линии.

3) Загрузка сетки нулевого уровня из файла:

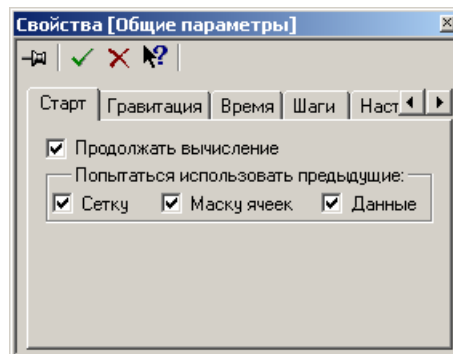
- Выберите пункт **Загрузить сетку из файла** в контекстном меню элемента дерева **Начальная сетка**.
- Выберите текстовый файл, содержащий начальную сетку.



2.2.7 Задание глобальных параметров

К глобальным параметрам (элемент дерева **Общие параметры**) относятся параметры, которые влияют на всю задачу в целом.

Редактирование и просмотр глобальных параметров:

- Выделите элемент дерева **Общие параметры**, нажмите правую кнопку мыши и выберите **Свойства** в контекстном меню.
- Появится окно свойств. В этом окне четыре страницы, которые определяют параметры начала расчета, силу гравитации, времена расчета и сохранения варианта, некоторые параметры метода расчета. Ниже приведено подробное описание каждой страницы. Измените нужные параметры.



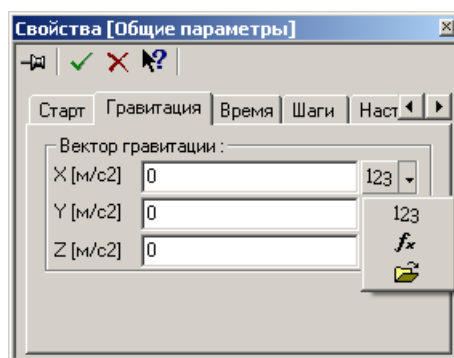
- Нажмите кнопку  для подтверждения изменений или  для их отмены.

2.2.7.1 Исходные данные для начала процесса (Старт)

На странице свойств глобальных параметров **Старт** задается, с каких исходных данных начнется процесс расчета. Возможны следующие варианты:

Продолжать вычисление	Сетку	Маску ячеек	Данные	Описание
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Расчет начнется сначала. Если сетка и поля переменных существовали, то они будут удалены. Будет создана новая сетка, построена геометрическая информация в ячейках, обнулены поля переменных. Этот режим является режимом по умолчанию для новых вариантов.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Полностью аналогично предыдущему пункту.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Расчет начнется на существующей сетке. Будет обновлена геометрическая информация в ячейках и обнулены поля переменных.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Расчет начнется на существующей сетке. Геометрическая информация в ячейках также берется из предыдущего расчета. Обнуляются только поля переменных.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Расчет начнется на существующей сетке. Геометрическая информация в ячейках будет обновлена. Поля переменных берутся из предыдущего расчета. Этот режим автоматически устанавливается для вариантов, в которых была заменена геометрия.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Расчет начнется на существующей сетке. Геометрическая информация в ячейках и поля переменных берутся из предыдущего расчета. Это простое продолжение прерванного расчета и является режимом по умолчанию для уже рассчитывавшихся вариантов.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Старая сетка будет удалена. Будет создана новая сетка, построена геометрическая информация в ячейках. Поля переменных интерполируются из предыдущего расчета.

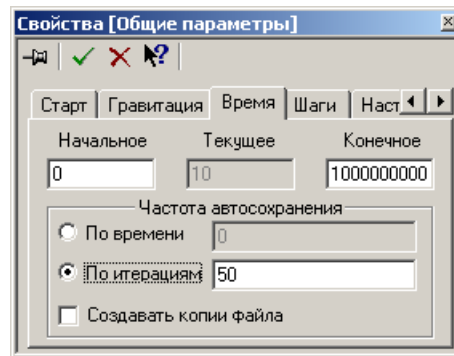
2.2.7.2 Направление и размер вектора гравитации (Гравитация)



На странице свойств **Гравитация** задаются направление и размер вектора гравитации для всей задачи. В окошках, расположенных справа от надписей **X[m/c2]**, **Y[m/c2]**, **Z[m/c2]**, задаются значения компонент вектора гравитации. Значения могут задаваться как константа, уравнение (позволяет ввести зависимость данной величины от других расчетных величин) или внешняя функция (позволяет использовать законы изменения параметра, находящиеся во внешних dll-библиотеках). Единицей измерения является m/c^2 .

2.2.7.3 Время расчета и сохранения варианта (Время)

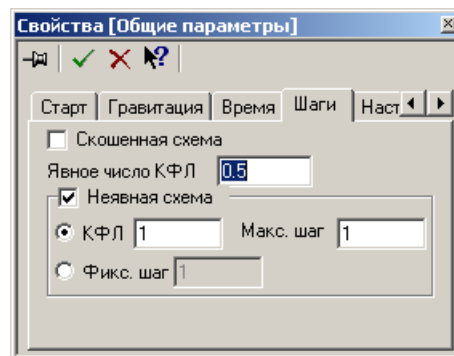
На странице свойств **Время** задаются времена расчета и сохранения варианта. Все времена задаются в секундах времени задачи. На этой странице присутствуют следующие элементы:



- **Начальное** – время начала расчета.
- **Текущее** – текущее время.
- **Конечное** – время окончания расчета. По достижении этого времени расчет будет остановлен, т.е. если **Текущее** больше или равно **Конечное**.
- **По времени** – если отмечен этот пункт, то в процессе расчета вариант будет автоматически сохраняться в файл через времена, указанное в окошке справа от этого элемента.
- **По итерациям** – если отмечен этот пункт, то сохранение в файл будет осуществляться через количество итераций по времени, указанное в окошке справа от этого элемента.
- **Создавать копии файла** – если отмечен этот пункт, то через заданный промежуток времени (заданное количество итераций) будут создаваться копии файла варианта, содержащие данные расчета, соответствующие указанному моменту времени (шагу итерации).

2.2.7.4 Параметры метода расчета и выбора шага по времени (Шаги)

На странице свойств **Шаги** задаются параметры, определяющие метод расчета и способ выбора шага по времени. На этой странице присутствуют следующие элементы:



- **Скошенная схема** – если отмечен этот пункт, то при расчете конвективного переноса будет использоваться скошенная схема аппроксимации.
- **Явное число КФЛ** – число Куранта для явного метода расчета.
- **Неявная схема** – если отмечен этот пункт, то расчет будет проводиться неявным методом.
- **КФЛ** – если отмечен этот элемент, то шаг интегрирования по времени при неявном методе расчета будет определяться исходя из числа Куранта для неявного метода расчета, указанного в окошке справа от этого элемента, и не должен превышать значения, указанного в **Макс. шаг**.
- **Макс. шаг** – максимальный шаг интегрирования по времени для неявного метода расчета.
- **Фикс. шаг** – если отмечен этот элемент, то шаг интегрирования по времени при неявном методе расчета будет равен значению, указанному в окошке справа от этого элемента.

При выборе шага по времени следует исходить в первую очередь из того, какие математические модели используются в данной задаче. Для большинства используемых моделей можно дать следующие общие рекомендации:

- Для модели **Твердый материал** шаг по времени может быть оценен, исходя из оценки времени прогрева неравномерно прогретого тела:

(1) $\tau = \frac{l^2}{\chi}$, где l – характерный размер тела, $\chi = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ – коэффициент температуропроводности [Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика.* – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. Ред. Физ-мат. Лит., 1986].

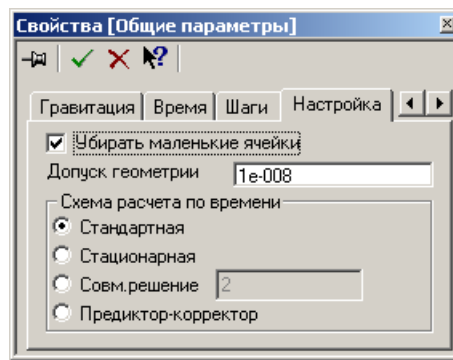
Так, например, для стали толщиной 0.1 м характерное время прогрева составит примерно 800 с (13 мин).

- Для моделей **Ламинарная жидкость**, **Несжимаемая жидкость**, **Слабосжимаемая жидкость** и **Модель горения** шаг по времени можно задать равным одной десятой пролетного времени. Пролетным временем называется то время, которое потребуется частице, выпущенной из входа в расчетную область, чтобы достигнуть выхода расчетной области.
- Для моделей **Свободная поверхность** и **Многофазная модель** шаг по времени следует задавать исходя из Куранта равного 1.
- Для модели **Полностью сжимаемая жидкость** шаг по времени зависит от сходимости уравнений по давлению. Первоначальный шаг по времени следует задавать аналогично моделям **Ламинарная жидкость**, **Несжимаемая жидкость** и т.д. Если при таком шаге сходимости по давлению нет, то шаг нужно уменьшать.

Если в задаче присутствуют несколько подобластей с разными моделями, и характерные времена процессов по каждой из моделей существенно отличаются друг от друга, то рекомендуется воспользоваться такой возможностью **FlowVision**, как расчет с собственным шагом по времени (см. [Параметры метода](#)).

2.2.7.5 Опции процесса расчета (Настройка)

На странице свойств **Настройка** задаются параметры, определяющие опции процесса расчета. На этой странице присутствуют следующие элементы:



- **Убирать маленькие ячейки** – если отмечен этот элемент, то происходит удаление «маленьких» ячеек. При разбиении области на расчетные ячейки, т.е. при формировании сетки, часть ячеек попадает на границу твердого тела и жидкости (газа). При этом ячейки делятся поверхностью твердого тела на принадлежащие жидкости и принадлежащие твердому телу. «Маленькие» ячейки, принадлежащие жидкости, удаляются, а их объем, граничные условия на осколках фасеток, и содержащиеся в ячейках массы компонентов, импульс и энергия добавляются к соответствующим величинам одной из соседних «больших» ячеек. На рисунке красным цветом показаны ячейки жидкости, участвующие в расчете после удаления «маленьких» ячеек.



«Маленькими» считаются те ячейки, объем которых меньше 20% исходного объема ячейки. При удалении «маленьких» ячеек могут образовываться так называемые «плохие маленькие» ячейки (**Плохие маленькие ячейки**). Такими ячейками являются «маленькие» ячейки, окруженные такими же маленькими ячейками. При удалении «маленьких» ячеек «плохие маленькие» ячейки просто удаляются, и их характеристики не раздаются соседним ячейкам и в расчете они никак не учитываются.

По умолчанию опция удаления «маленьких» ячеек включена, т.к. существует спектр задач, в которых учет таких ячеек может приводить к локальным нефизическим явлениям (например, к возникновению возвратных зон).

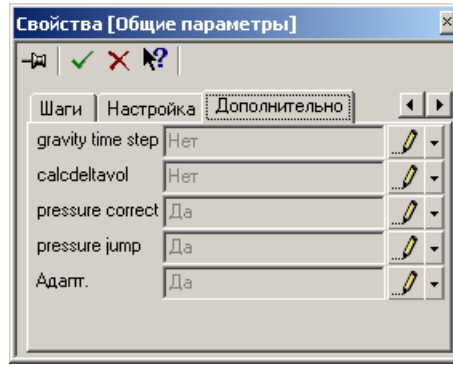
Однако следует обратить внимание на то, что в некоторых задачах удаление маленьких ячеек может приводить к тому, что в расчете не будут учитываться некоторые области, которые состоят целиком из «плохих маленьких» ячеек. Возникновение таких случаев можно контролировать с помощью слоя визуализации [Набор ячеек](#).

- **Допуск геометрии** – точность отслеживания геометрических параметров. Выполняет те же функции, что и параметр **Допуск** в [предустановках препроцессора](#). При этом при загрузке геометрии используется значение, указанное в предустановках, далее оно по умолчанию передается в глобальные параметры. В дальнейшем оно может быть изменено и в процессе расчета будет использоваться уже значение, указанное в глобальных параметрах.
- **Схема расчета по времени**
 - **Стандартная** – если отмечен этот пункт, то используется разностная схема, описанная в разделе [Теория](#).
 - **Стационарная** – если отмечен этот пункт, то в задачах, в которых заведомо существует стационарное решение, ускоряется нахождение этого решения. Если задача не имеет стационарного решения, то включение этой опции будет приводить к нефизическому решению. Рекомендуется использовать эту опцию в *стационарных* задачах, где есть подвижные тела, для которых учитывается действие гидродинамических сил.
 - **Совм.решение** – если отмечен этот пункт, то скорости в уравнении конвективно-диффузионного переноса подправляются на каждой внутренней итерации. Количество таких итераций указывается в окошке справа от этого элемента. Следует иметь в виду, что использование этой опции существенно замедляет расчет, но в некоторых задачах позволяет избежать нефизических итераций. Рекомендуется использовать эту опцию в задачах с кавитацией. Подробнее см. том [Теория](#).
 - **Предиктор-Корректор** – этот метод предназначен для увеличения точности расчета уравнений Навье-Стокса при ускоренном движении тел в расчетной области. Рекомендуется использовать эту опцию при расчете движения тел, для которых включен учет действия гидродинамических сил. Подробнее см. том [Теория](#).

2.2.7.6 Дополнительные параметры

На странице свойств **Дополнительно** задаются параметры, управляющие тонкими настройками методов расчета. Для большинства задач используются установки по умолчанию. Изменения этих параметров следует производить СТРОГО по рекомендации службы поддержки.

На этой странице присутствуют следующие элементы:

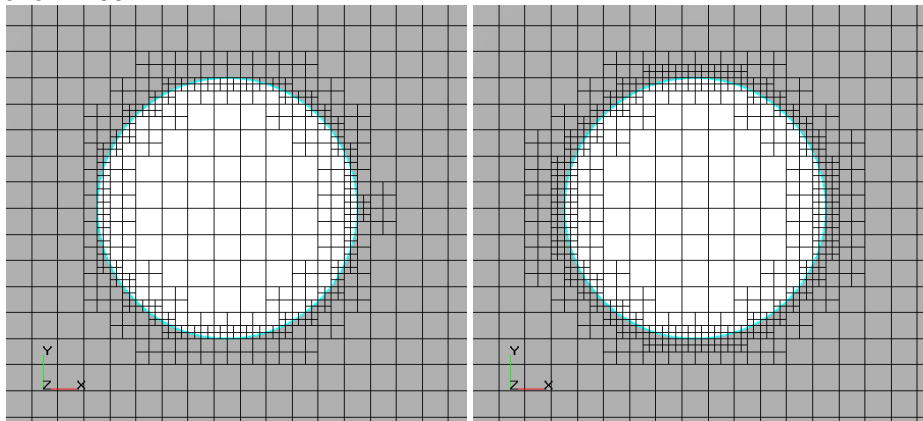


- **gravity time step** – включение/выключение ограничения явного шага по времени. Явный шаг по времени ограничен пролетом жидкой частицы с ускорением свободного падения g ,

$$\tau_{\text{expl}} < \sqrt{\frac{2h_{\text{min}}}{g}}$$

если этот параметр включен, то $\tau_{\text{expl}} < \sqrt{\frac{2h_{\text{min}}}{g}}$. Следует снимать ограничение при расчете стационарных задач, где имеет значение сила тяжести.

- **calcdeltavol** – этот параметр предназначен для разработчиков.
- **pressure correct** – включение/выключение коррекции Рие-Шоу для уравнения давления для избежания осцилляций давления.
- **pressure jump** – включение/выключение учета скачка давления на границе подобластей с разной пористостью (имеет смысл только в модели **Пористая среда**).
- **Адапт.** – включение/выключение режима адаптации в наружном слое ячеек. Включение адаптации в наружном слое ячеек приводит к тому, что при адаптации по граничному условию адаптируются не только ячейки, непосредственно пересекающие границу расчетной области, но и следующий за ними слой ячеек.



Адапт.=Нет

Адапт.=Да


2.3 Процесс расчета

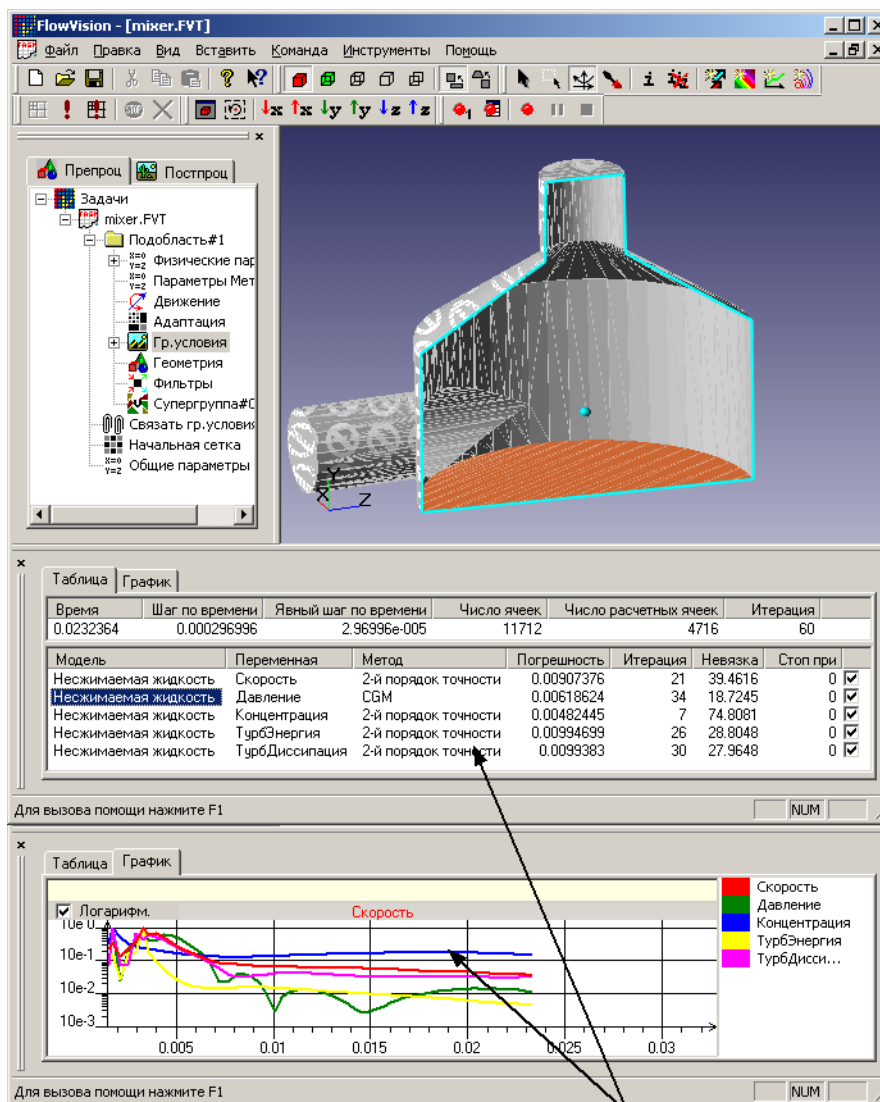
В этой главе описываются процедуры:

- [запуска процесса расчета](#),
- [остановки процесса расчета](#),
- [аварийной остановки процесса расчета](#).

2.3.1 Запуск расчета

Для запуска вариант на расчет:

- Выберите пункт меню **Команда Сетка & Вычисление** или нажмите кнопку  в панели инструментов.
- Вариант запустится на расчет.
- В зависимости от параметров, установленных в **Общие параметры** на странице **Старт** будут выполнены операции, описанные в разделе [Задание глобальных параметров](#).
- В окне программы появится окно состояния процесса расчета.



Окно состояния процесса расчета

Время	Шаг по времени	Явный шаг по времени	Число ячеек	Число расчетных ячеек	Итерация
0.0232364	0.000296996	2.96996e-005	11712	4716	60

Модель	Переменная	Метод	Погрешность	Итерация	Невязка	Стоп при
Несжимаемая жидкость	Скорость	2-й порядок точности	0.00907376	21	39.4616	0
Несжимаемая жидкость	Давление	CGM	0.00618624	34	18.7245	0
Несжимаемая жидкость	Концентрация	2-й порядок точности	0.00482445	7	74.8081	0
Несжимаемая жидкость	ТурбЭнергия	2-й порядок точности	0.00994639	26	28.8048	0
Несжимаемая жидкость	ТурбДиссипация	2-й порядок точности	0.0099383	30	27.9648	0

Для вызова помощи нажмите F1

NUM

График

Логарифм.

Скорость

Давление

Концентрация

ТурбЭнергия

ТурбДисси...

Для вызова помощи нажмите F1

NUM

- В этом окне присутствуют две закладки: **Таблица** и **График**.
- На первой закладке **Таблица** присутствуют две таблицы.
- В первой таблице приведены характеристики для текущего временного шага:
 - **Время** – текущее время задачи;
 - **Шаг по времени** – текущее значение шага интегрирования по времени;
 - **Явный шаг по времени** – текущее значение явного шага интегрирования по времени;
 - **Число ячеек** – общее количество ячеек;
 - **Число расчетных ячеек** – количество расчетных ячеек;
 - **Итерация** – номер текущей итерации по времени.

Во второй таблице приведены характеристики линейных систем уравнений, решаемых на текущем временном шаге. Каждой рассчитываемой переменной соответствует своя система линейных уравнений и своя строка в таблице.

Для каждой переменной (системы линейных уравнений) приведены следующие характеристики:

- **Модель** – модель, к которой относится переменная;
- **Переменная** – название переменной, для которой решается система линейных уравнений;
- **Метод** – метод расчета, которой используется для решения системы линейных уравнений;
- **Погрешность** – реальная точность решения системы линейных уравнений (должна быть меньше точности, указанной в [Параметрах метода](#));
- **Итерация** – количество итераций в решении системы линейных уравнений для данной переменной;
- **Невязка** – это изменение решения во времени. Или иными словами средняя по объему скорость


$$\left\| \frac{\partial f}{\partial t} \right\| = \frac{\int \frac{\partial f}{\partial t} dV}{\int dV} = \frac{\int \left| \frac{f^n - f^{n-1}}{t^n - t^{n-1}} \right| dV}{\int dV}$$

изменения искомой величины по времени: $\left\| \frac{\partial f}{\partial t} \right\|$, где f – искомая переменная, n – номер текущего шага по времени.

- колонка **Стоп при** с полем ввода критерия останова по относительной невязке и флаговая кнопка активации/деактивации критерия (также эти элементы добавлены и на страницу свойств [Параметры метода](#)).

Примечание: **относительная невязка** вычисляется как отношение абсолютной невязки к максимуму абсолютных невязок, который, вообще говоря, может изменяться в ходе расчёта, поэтому могут изменяться и значения относительных невязок.


В процессе расчета во второй таблице строка, соответствующая рассчитываемой в данный момент переменной, выделяется цветом.

- На второй закладке **График** в окне графика отображаются графики **относительных невязок** тех переменных, для которых критерий останова помечен как активный. Справа от окна графиков отображается список этих переменных, с указанием цветов соответствующих графиков. Один из графиков всегда считается "текущим", название соответствующей переменной отображается в заголовке окна графиков, и значение соответствующего критерия останова отображается пунктирной линией, если этот критерий ненулевой. Выбор "текущего" графика осуществляется двойным щелчком мыши на соответствующей переменной в списке справа. Ось X (время) линейна, ось Y (относительная невязка, нормированная от 0 до 1) может быть линейной или логарифмической, для переключения типа оси предусмотрена флаговая кнопка. Во время расчёта происходит автоматическое масштабирование осей. Ось X масштабируется только в случае выхода графика за правую границу, ручное масштабирование этой оси осуществляется нажатием и протягиванием мыши в поле оси (в середине – для сдвига, с краев – для масштабирования). Максимум оси Y устанавливается таким образом, чтобы ни один график не вылезал за верхнюю границу, минимум же устанавливается в ноль в случае линейной оси и в минимальный активный ненулевой критерий останова минус один порядок (или 10^{-3} , если нет активных критериев останова) в случае логарифмической оси.
- В процессе расчета иногда возникают сообщения о предупреждениях и ошибках. Эти сообщения записываются в текстовый файл, который можно просмотреть в любом текстовом редакторе. Этот файл имеет имя, совпадающее с именем варианта и расширение – **log**. Кроме этого файла все сообщения можно просмотреть в окне сообщений. Если в процессе расчета возникло сообщение об ошибке, то окно сообщений автоматически появится на экране. Окно сообщений можно высветить с помощью пункта меню **Вид** **Окно ЛогФайла**.
- При запуске на расчет с помощью пункта меню **Команда** **Сетка & Вычисление** или кнопки  программа все делает автоматически: сначала строит сетку (если необходимо), а затем запускает расчет. Но иногда возникают ситуации, когда эти два этапа надо сделать по отдельности.

Для построения сетки без запуска процесса расчета:


- Выберите пункт меню **Команда** **Построить сетку** или нажмите кнопку  в панели инструментов.
- Для варианта построится сетка.

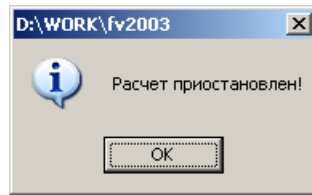
Для запуска процесса расчета без построения сетки:

- Выберите пункт меню **Команда** **Начать вычисление** или нажмите кнопку  в панели инструментов.
- Вариант запустится на расчет.

2.3.2 Остановка расчета

Для остановки расчета:

- Выберите пункт меню **Команда Остановить вычисление** или нажмите кнопку  в панели инструментов.
- Расчет данного вариант будет остановлен после завершения текущей итерации по времени. После остановки появится информационное диалоговое окно. Нажмите клавишу **ОК**.




- Закрывается окно состояния процесса расчета.

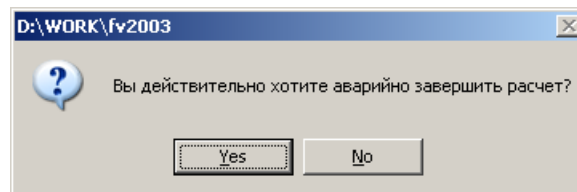
После остановки возможно продолжения расчета этого варианта.

2.3.3 Аварийная остановка расчета

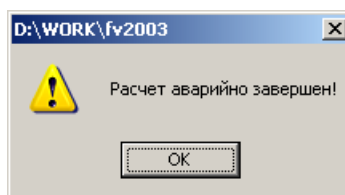
В процессе расчета иногда возникают ситуации, когда необходимо аварийно завершить расчет и не имеет смысла дожидаться окончания текущей итерации по времени. Например, итерационный процесс расходится или обнаружена ошибка в задании исходных данных. Для этих ситуаций существует аварийная остановка расчета.

Для аварийной остановки расчета:

- Выберите пункт меню **Команда Прервать вычисление** или нажмите кнопку  в панели инструментов.
- Появится диалоговое окно подтверждения аварийной остановки. Нажмите клавишу **YES**.



- Расчет данного вариант будет остановлен, не дожидаясь завершения текущей итерации по времени. После остановки появится информационное диалоговое окно. Нажмите клавишу **ОК**.



- Закрывается окно состояния процесса расчета.

После аварийной остановки продолжение расчета этого варианта невозможно. Этот вариант можно начать рассчитывать только с начала.

2.4 Постпроцессор

Постпроцессор **FlowVision** предназначен для визуального анализа сложных трехмерных течений жидкости. Постпроцессор имеет общий с препроцессором и блоком расчета интерфейс. Постпроцессор работает с файлами в собственном формате **Flow Vision**. Кроме того, с его помощью можно просматривать **VRML**-файлы. Блок 3D графики реализован с помощью библиотеки **OpenGL**.

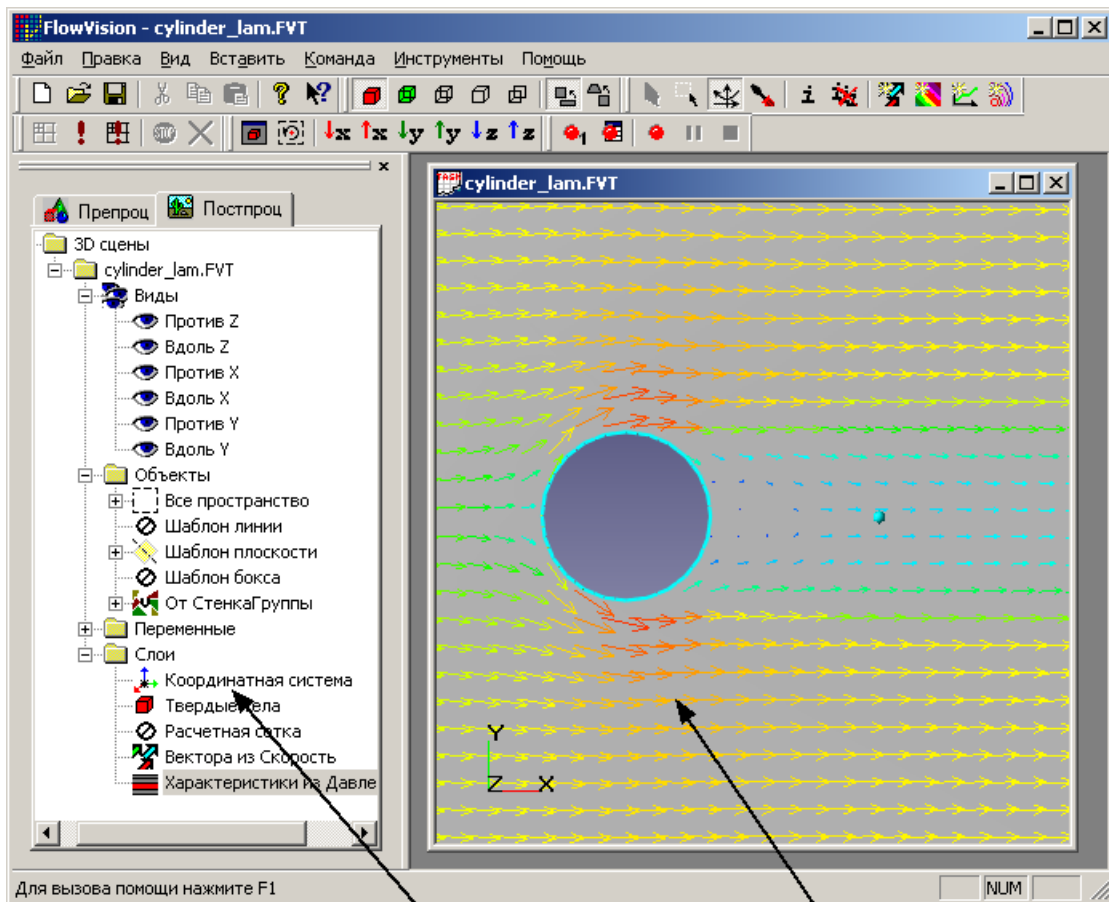
Постпроцессор **FlowVision** предоставляет следующие возможности отображения исходной геометрии:

- Трехмерное изображение модели в параллельной и перспективной проекциях.
- Высокоскоростная отрисовка сцены с помощью функций **OpenGL**.
- Возможность ускорения отрисовки с помощью аппаратных **OpenGL**-ускорителей.
- Различные модели освещения 3D сцены.
- Интерактивная настройка проекции 3D сцены (положения и параметров камеры).
- Плоскости отсечения. Интерактивная настройка их положения в пространстве.
- Визуализация движущихся частей геометрии.

Постпроцессор **FlowVision** предоставляет следующие возможности визуального анализа течения жидкости:

- Полный набор стандартных методов визуализации течений (изолинии, тоновая заливка, различные графики одной переменной, вектора, изоповерхность).
- Визуализация расчетной сетки с локальным измельчением.
- Возможность получения характеристик течения в точке, интегральных характеристик течения на плоскости и поверхности.
- Анимационные методы визуализации векторного поля.
- Возможность интерактивной настройки параметров методов визуализации.
- Отображение легенды метода отрисовки в отдельном окне.

2.4.1 Окна постпроцессора и его элементы управления



Рабочее окно.
Дерево постпроцессора

Графическое окно варианта

Программный комплекс **FlowVision** реализован на платформе **MSWindows** и удовлетворяет соглашениям

относительно интерфейса, принятыми в ОС. **FlowVision** использует только стандартные органы управления, в редких случаях расширенные новыми возможностями для удобства пользователя. В каждом таком случае эти возможности детально описаны.

Постпроцессор состоит из рабочего окна (левая часть главного окна), в котором размещено дерево постпроцессора, графических окон вариантов (правая часть главного окна) для вывода графического представления вариантов, а также различных элементов управления (главного меню, панелей инструментов и проч.).

2.4.1.1 Дерево постпроцессора в рабочем окне FlowVision

Все доступные пользователю объекты постпроцессора объединены в древовидную структуру. Первым уровнем дерева (считая от корня) является уровень папок открытых вариантов. Второй уровень дерева – папки, содержащие объекты постпроцессора. Каждый вариант содержит в себе 4 папки: виды 3D сцены (**Виды**), геометрические объекты (**Объекты**), расчетные переменные (**Переменные**) и слои визуализации (**Слои**). Все элементы дерева имеют контекстные меню, которые вызываются при нажатии правой кнопки мыши на соответствующем элементе дерева. Элементы дерева разных типов имеют разные контекстные меню, общим элементом которых является пункт **Свойства**, открывающий доступ к редактированию свойств этого элемента. Подробно пункты контекстных меню описаны в разделах: [3D сцена](#), [Геометрические объекты](#) и [Слои визуализации](#).

В дереве можно выделять элементы. У разных элементов дерева различная реакция на выделение:

- Выделение вида (**Виды**) в дереве влечет за собой установление в графическом окне варианта тех параметров сцены и параметров камеры, которые были сохранены в этом виде.
- Выделение геометрического объекта или слоя визуализации делает его активным. В этом случае при выборе режима редактирования слоя параметры слоя могут настраиваться интерактивно. Кроме того, выделенный слой или объект делается видимым в том случае, если он был невидим.

2.4.1.2 Графическое окно варианта




Графическое окно варианта служит для визуализации 3D сцены варианта. 3D сцена включает в себя твердые тела, расчетную сетку, а также визуальное представление расчетных данных варианта. Вся визуальная информация, необходимая для анализа задачи, находится в нем. Графическое окно ассоциировано каждому открытому варианту. Закрытие графического окна автоматически означает закрытие варианта.

Графическое окно варианта имеет одноцветный фон или фон с цветовым переходом. Цвета фона редактируются в окне свойств открытого варианта в дереве постпроцессора. По умолчанию окно имеет фон с цветовым переходом.



Для большей реалистичности изображения в 3D сцену может быть добавлен туман, скрывающий удаленные детали сцены. Туман включается с окне свойств открытого варианта в дереве постпроцессора. В 3D сцене каждого варианта размещены 4 источника света с разными свойствами. Каждый из них может быть включен и выключен независимо от остальных из пункта главного меню **Вид Свет**. Параметры источников света не могут быть изменены и новые источники не могут быть добавлены.

Графическое окно варианта принимает ввод с помощью мыши.

Существует три режима ввода:

- режим выбора путем выделения прямоугольной области ;
- режим настройки вида сцены ;
- режим настройки параметров выделенного элемента дерева .

1. В режиме настройки вида сцены пользователь имеет возможность с помощью мыши выбрать желаемую проекцию 3D сцены на двумерный экран.

При нажатой левой кнопке мыши движение курсора мыши вращает сцену относительно центра вращения. По умолчанию центр вращения совпадает с центром расчетной области. Слои и геометрические объекты, у которых в панели инструментов окна свойств есть кнопка , могут изменять центр вращения. Чтобы вернуть центр вращения в центр расчетной области, нужно нажать кнопку  панели инструментов главного окна программы.

При нажатой правой кнопке движение курсора мыши смещает сцену в плоскости экрана.

При обоих нажатых кнопках движение курсора мыши вверх-вниз соответственно удаляет и приближает сцену к наблюдателю, а движение вправо-влево вращает сцену вокруг оси, перпендикулярной экрану.


С помощью трех этих действий можно подобрать любой угол наблюдения сцены и любое расстояние от наблюдателя. Если есть необходимость заглянуть внутрь геометрии, можно воспользоваться механизмом плоскостей отсечения.

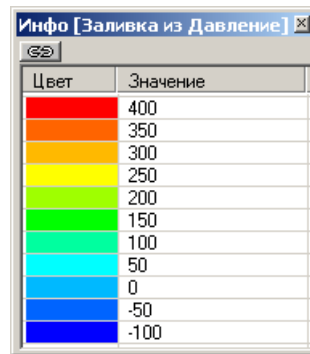
Настройку проекции 3D сцены можно также рассматривать как выбор положения камеры в трехмерном пространстве. Это положение может быть запомнено и впоследствии воспроизведено

(см. раздел [Сохранение и загрузка состояния постпроцессора](#)).


- Выбор путем выделения области растягивает выделенную прямоугольной рамкой часть графического окна на все окно.
 - Режим настройки параметров выделенного элемента дерева работает только в том случае, если в рабочем окне открыто дерево постпроцессора и выбран какой-нибудь геометрический объект или слой. В этом случае с помощью мыши возможна интерактивная настройка некоторых (для каждого случая своих) параметров из окна свойств. Примером является выбор положения плоскости в пространстве. В режиме настройки параметров плоскость можно вращать, а также двигать вдоль нормали. При этом остальные объекты 3D сцены не подвергнутся никаким изменениям. Этот механизм дублирует задание значений параметров слоя вручную, из окна свойств. Однако, если нет необходимости в высокой точности значений параметров, интерактивная настройка параметров может быть выполнена существенно быстрее.
- Рассмотрение поведения геометрических объектов в режиме настройки параметров см. в разделе [Геометрические объекты](#), слоев – см. в разделе [Слой визуализации](#).

2.4.1.3 Окна Инфо

Окна **Инфо** открываются из пункта главного меню **Вид Открыть инфо окно**. Или кнопкой  панели инструментов. Служат для отображения информации о выбранном узле дерева. Например, для слоев с палитрой (изолинии, заливка) в окно **Инфо** выводится палитра с ассоциированными значениями расчетной переменной.



Цвет	Значение
Red	400
Orange	350
Yellow	300
Light Green	250
Green	200
Light Blue	150
Cyan	100
Blue	50
Dark Blue	0
Very Dark Blue	-50
Black	-100

Окно **Инфо** может быть в двух состояниях – прикрепленном и свободном. В первом случае (кнопка в левом верхнем углу окна нажата) окно **Инфо** закреплено за одним элементом дерева постпроцессора. Прикрепленных окон может быть сколько угодно. Во втором случае (кнопка в левом верхнем углу окна отжата) окно **Инфо** отображает информацию о текущем узле дерева. При смене текущего узла содержимое окна меняется. Свободное окно может быть только одно. Для того, чтобы закрыть все открытые окна **Инфо**, нужно выбрать пункт главного меню **Вид Закрыть все инфо окна** или кнопкой  панели инструментов.

2.4.2 Панели инструментов постпроцессора





Панели инструментов постпроцессора имеют вид






и вызываются из меню **Вид Панели инструментов**.



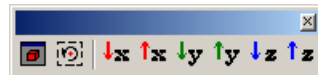
Первая панель инструментов **Геометрия** отвечает за графическое представление твердых тел и за проекцию 3D сцены на 2D окно. Ее кнопки имеют следующую функциональную нагрузку:

- Группа из первых пяти кнопок определяет графическое представление твердых тел. Их этих кнопок всегда нажата только одна.
 -  твердые тела отображаются непрозрачными фасетками (кнопка является нажатой по умолчанию)
 -  отображаются только те фасетки, нормали которых направлены в сторону, противоположную экрану
 -  твердые тела отображаются ребрами фасеток
 -  твердые тела отображаются ребрами фасеток с удалением невидимых линий









-  Твердые тела отображаются границами групп фасеток
-  Кнопка имеет два положения – нажатое и отжатое. В нажатом положении пропорции изображения на экране такие же, как у геометрических тел в пространстве объектов. В отжатом они зависят от отношения длины к ширине графического окна. В случае квадратного окна нажатие этой кнопки не производит никакого эффекта. По умолчанию кнопка нажата. Кнопка введена для того, чтобы эффективнее утилизировать площадь графического окна в случае сильно вытянутого окна.
-  Кнопка имеет два положения – нажатое и отжатое. В нажатом положении изображение 3D сцены в графическом окне имеет перспективную проекцию. Параметры перспективной проекции фиксированы и не могут быть изменены пользователем. В отжатом состоянии изображение 3D сцены в графическом окне имеет параллельную проекцию. По умолчанию кнопка нажата.



Вторая панель инструментов **Режимы** позволяет выбрать режим работы графического окна: Группа кнопок выбора режима описана в разделах [Графическое окно варианта](#) и [Режимы](#).



Третья панель инструментов **Виды** позволяет построить 3D сцену в стандартных видах (подробнее см. [Виды 3D сцены](#)), а также сделать видимым все твердые тела и установить центр вращения в центр расчетной области:

-  Против оси X.
-  Вдоль оси X.
-  Против оси Y.
-  Вдоль оси Y.
-  Против оси Z.
-  Вдоль оси Z.
-  При нажатии этой кнопки твердые тела позиционируются в центр графического окна. Увеличение выбирается таким образом, чтобы все твердые тела поместились в графическое окно. Поворот твердых тел относительно экранной системы координат сохраняется.
-  Помещает центр вращения в центр расчетной области.

Кроме вышеописанных элементов управления функции визуализатора могут быть вызваны через контекстное меню отдельных узлов дерева постпроцессора. Описание контекстных меню приводятся в разделах, посвященных соответствующим элементам дерева постпроцессора.

2.4.3 Термины и организация постпроцессора

Блок постпроцессора представляет собой расширяемый набор объектов нескольких predetermined типов. Для разных типов определены правила создания, удаления и редактирования объектов. Все объекты связаны в древовидную структуру, отражающую их отношения. Эта структура отображена в дереве постпроцессора рабочего окна **FlowVision** и она же используется для хранения данных постпроцессора во внешнем файле.

Пользователь постпроцессора работает с четырьмя типами объектов:

- вид 3D-сцены **Виды**;
- геометрический объект **Объект**;
- расчетная переменная **Переменная**;
- слой визуализации **Слой**.

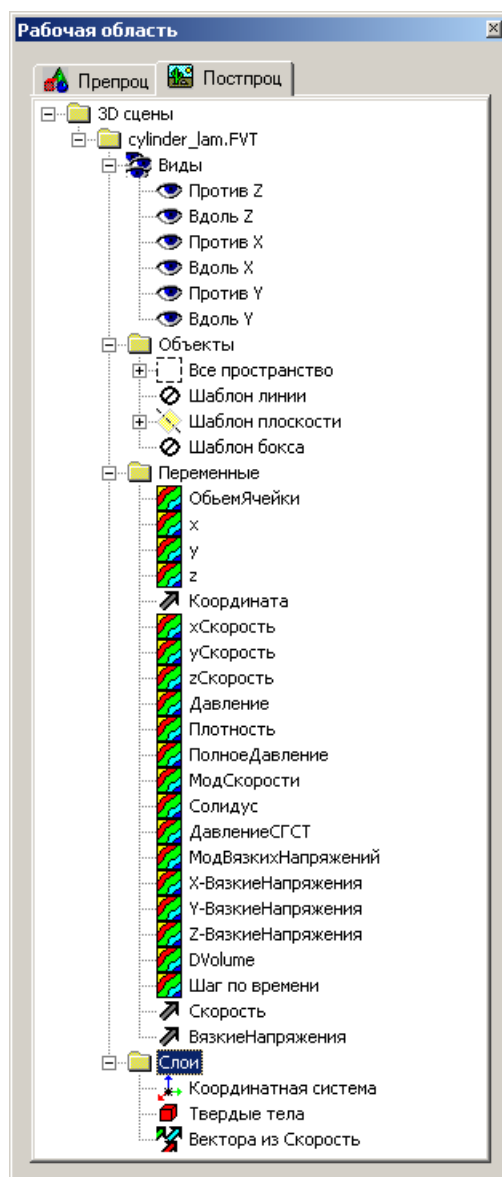
Виды 3D-сцены и слои визуализации создаются и используются только постпроцессором, геометрические объекты создаются в постпроцессоре или экспортируются из препроцессора, расчетные переменные экспортируются блоком расчета.

Создание, редактирование и удаление объектов постпроцессора производится из контекстного меню соответствующего элемента дерева в рабочем окне постпроцессора. Как правило, эти действия могут быть дублированы из других мест программы.

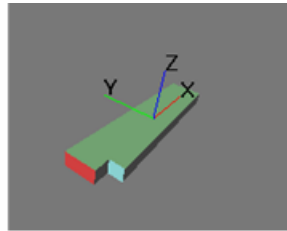
Подробнее об интерфейсе взаимодействия с объектами смотрите последующие разделы.

2.4.3.1 Виды 3D сцены

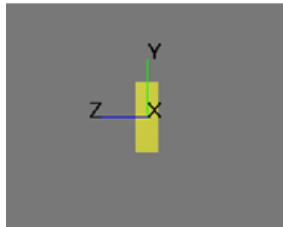
Виды 3D сцены служат для запоминания и последующего воспроизведения установок трехмерной сцены и камеры в графических окнах постпроцессора. Все существующие в варианте виды находятся в папке **Виды** дерева постпроцессора. Каждый вид несет в себе информацию об освещенности сцены, положении камеры внутри пространства объектов, а также некоторую другую необходимую для воспроизведения сцены информацию.



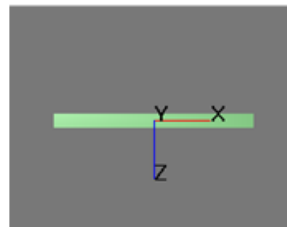
При создании варианта создается 6 стандартных видов вдоль координатных осей. Они называются **Против X**, **Вдоль X**, **Против Y**, **Вдоль Y**, **Против Z** и **Вдоль Z**.



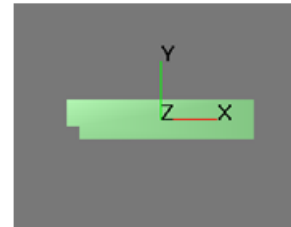
Произвольная ориентация твердых тел



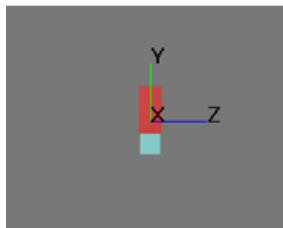
Против X



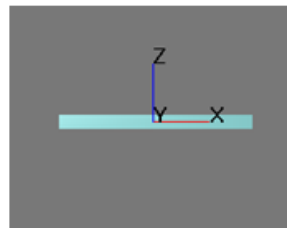
Против Y



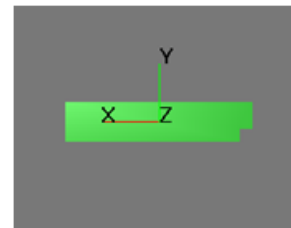
Против Z



Вдоль X



Вдоль Y

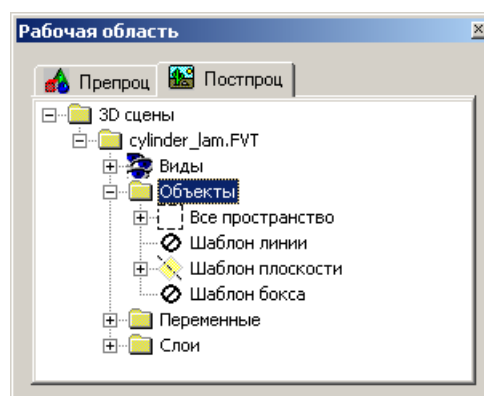


Вдоль Z

Каждый стандартный вид настроен так, чтобы все твердые тела варианта были видны в графическом окне. Центр расчетной области совпадает с центром окна. Одна из осей координат перпендикулярна плоскости окна (ее название вынесено в название вида, **Вдоль** означает, что положительное направление оси направлено от пользователя, а **Против** – к пользователю), а другие две параллельны сторонам окна. Эти виды нельзя редактировать и удалять. Кроме них, пользователь может создать любое количество своих собственных видов и редактировать их в процессе работы (см. раздел [Работа с видами](#)).

2.4.3.2 Геометрические объекты

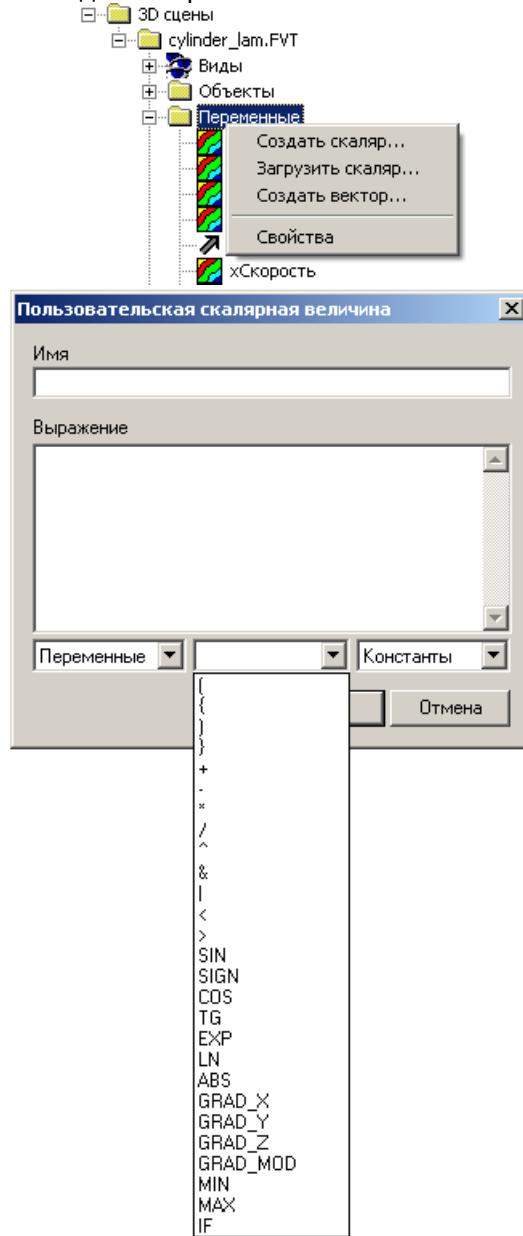
Геометрические объекты – это геометрические фигуры, которые являются основой для создания видимых объектов в графическом окне. Геометрические объекты могут быть двух типов: примитивы и сложные объекты. Примитивы – это простейшие геометрические объекты – плоскость, прямоугольный параллелепипед, прямая и др. Новый примитив создается из этого списка. Сложные объекты заданы набором фасеток. Сложный объект экспортируются из препроцессора (например, экспорт супергруппы). Редактирование геометрических объектов (под редактированием объекта здесь и в дальнейшем понимается редактирование его свойств или параметров) может быть осуществлено в любое время таким же образом, как редактирование других элементов дерева рабочего окна программы. Подробное описание геометрических объектов можно найти в главе [Геометрические объекты](#). Открытый вариант всегда имеет внутри себя несколько базовых геометрических объектов, по одному на каждый тип примитива (например, [Шаблон линии](#)) и, кроме того, объект [Все пространство](#). На основании геометрических объектов создаются все слои визуализации.



2.4.3.3 Расчетные переменные

Расчетные переменные – объекты, которые можно условно разделить на две группы:

- **Стандартные переменные** – не редактируемые объекты, количество которых фиксировано и определено выбранной для блока расчета моделью;
- **Пользовательские переменные** – создаются на основе стандартных переменных с помощью Калькулятора. Вызов Калькулятора осуществляется из контекстного меню папки **Переменные**. В Калькуляторе возможны операции только над скалярными переменными, векторные переменные могут быть использованы только для построения слоев.



В Калькуляторе возможны следующие операции:

() и { }	скобки
+, -, *, /	арифметические действия
^	возведение в степень
<, >	меньше, больше

Логические операции:



&	И
	ИЛИ
IF	условный оператор: IF(logical_test,value_if_true,value_if_false) logical_test – любое значение или выражение, результатом вычисления которого может быть ПРАВДА или ЛОЖЬ, value_if_true – значение, которое возвращается, если logical_test равен ПРАВДА, value_if_false – значение, которое возвращается, если logical_test равен ЛОЖЬ

Математические:

SIN	синус: SIN(number) number – угол в радианах
COS	косинус: COS(number) number – угол в радианах
TG	тангенс: TG(number) number – угол в радианах
LN	натуральный логарифм: LN(number) number – положительное вещественное число, для которого определен натуральный логарифм.
EXP	экспонента: EXP(number) number – показатель экспоненты
SIGN	возвращает знак числа (1 – если число положительное, 0 – если 0, -1 – если число отрицательное): SIGN(number) number – любое вещественное число
ABS	модуль: ABS(number) number – любое вещественное число

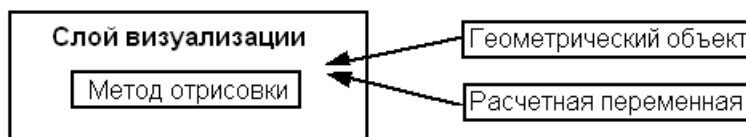
Статистические:

MIN	возвращает наименьшее число из двух значений: MIN(number1,number2) number1, number2 – вещественные числа
MAX	возвращает наибольшее число из двух значений: MAX(number1,number2) number1, number2 – вещественные числа
GRAD_X	возвращает градиент переменной в направлении X: GRAD_X(variable) variable – скалярная переменная
GRAD_Y	возвращает градиент переменной в направлении Y: GRAD_Y(variable) variable – скалярная переменная
GRAD_Z	возвращает градиент переменной в направлении Z: GRAD_Z(variable) variable – скалярная переменная
GRAD_MOD D	возвращает модуль градиента переменной: GRAD_MOD(variable) variable – скалярная переменная

Каждая переменная, в зависимости от своего типа (скаляр , вектор ) может быть положена в основу нового слоя визуализации.

2.4.3.4 Слои визуализации

Слой визуализации – объект постпроцессора, в общем случае состоит из трех компонент: базовый геометрический объект, базовая расчетная переменная и метод отрисовки, вынесенный в название слоя визуализации.

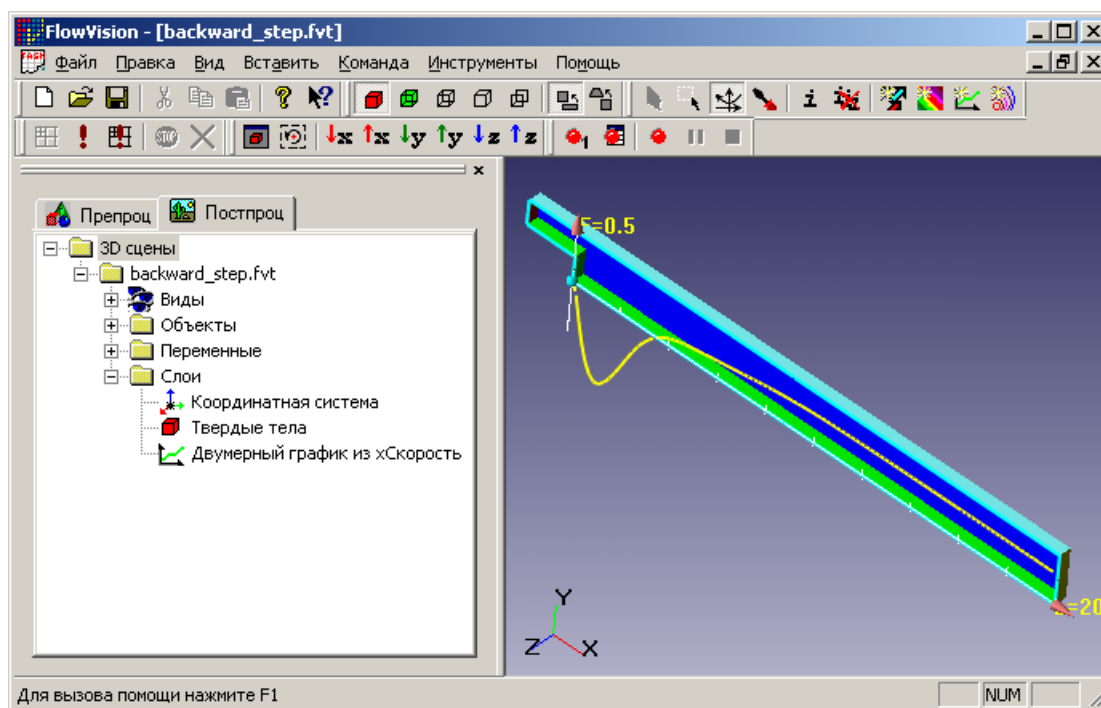


Компоненты слоя визуализации.

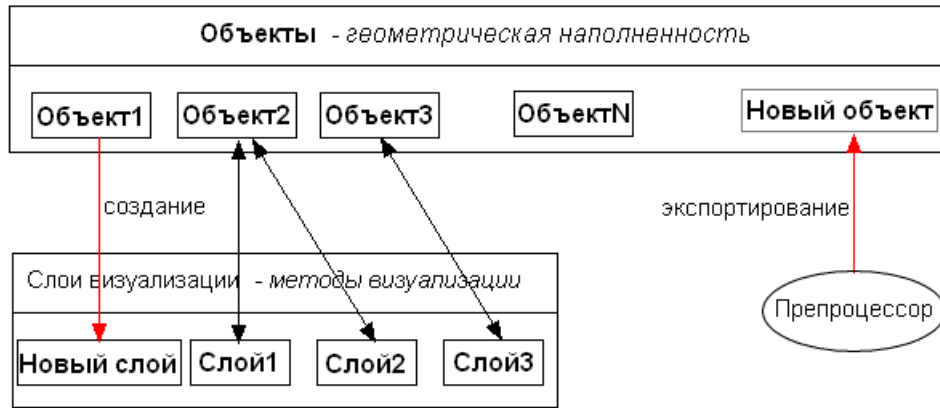
3D сцена состоит только из геометрических объектов и слоев визуализации и не включает в себя никаких других объектов. Все модификации сцены производятся посредством модификации списков слоев и объектов, т.е. создания новых, редактирования и удаления существующих. Слоями визуализации являются такие разнородные объекты, как система координат, геометрические тела, изоповерхность и расчетная сетка. Слои независимы друг от друга и отображаются всегда целиком.

3D сцена варианта, составленная из трех слоев визуализации: твердых тел, системы координат и графика скалярной переменной вдоль направления.

На рисунке представлена задача внезапного расширения канала. 3D сцена варианта составлена из трех слоев визуализации. Соответствующие слоям элементы дерева находятся в папке **Слои** дерева постпроцессора. Слой **Система координат** отрисован в правом нижнем углу графического окна как тройка осей с названиями осей. Он основан на объекте **Все пространство** и не имеет базовой расчетной переменной. Слой **Твердые тела** отрисован как набор непрозрачных фасеток в центре экрана. Он основан на объекте **Все Пространство** и не имеет базовой расчетной переменной. Слой **Двумерный график** построен на основе объекта **Плоскость** и скалярной переменной **xСкорость**. У объекта **Плоскость** установлено свойство **Отсечение**, в результате чего плоскость графика разрезает расчетную геометрию.



Слои сгруппированы по базовому геометрическому объекту в папке геометрического объекта. Модификация геометрического объекта влечет за собой модификацию всех слоев, созданных на его основе.



Взаимодействие слоев и объектов.

Сложный объект экспортируется из препроцессора для создания на его основе новых слоев. Примером служит экспортирование сложного объекта из граничного условия подобласти. При этом в сложный объект будут включены все фасетки групп подобласти, на которых это граничное условие установлено. На основе этого объекта можно построить слой Изолинии. В результате на фасетках сложного объекта будут нанесены изолинии скалярной переменной. После экспортирования связь между экспортером и экспортированным объектом разрывается и любая модификация экспортера не влечет за собой модификацию экспортированного объекта.

В системе существуют слои, графическое представление которых зависит от времени. Это так называемые слои, содержащие анимацию. Качество анимации зависит от мощности компьютера. Частота смены кадров выбирается программой и не может регулироваться пользователем.

2.4.3.5 Интерактивная настройка и интерактивная анимация

2.4.3.5.1 Интерактивная настройка

Если постпроцессор находится в режиме настройки параметров, то редактированию подвергается объект или слой – выделенный элемент дерева. Если ни один такой элемент не выделен, то в этом режиме 3D сцена изменяться не будет. Действия, которые можно производить над выделенным объектом зависят от его типа. О возможностях интерактивной настройки имеющихся объектов см. раздел [Геометрические объекты](#), слоев см. раздел [Слои визуализации](#). Для каждого типа объекта может быть определено до трех действий. **Действие №1** совершается при нажатой левой кнопке мыши, **действие №2** – при правой и **действие №3** – при обоих вместе. При не нажатых кнопках мыши никакие действия над объектом производиться не будут.

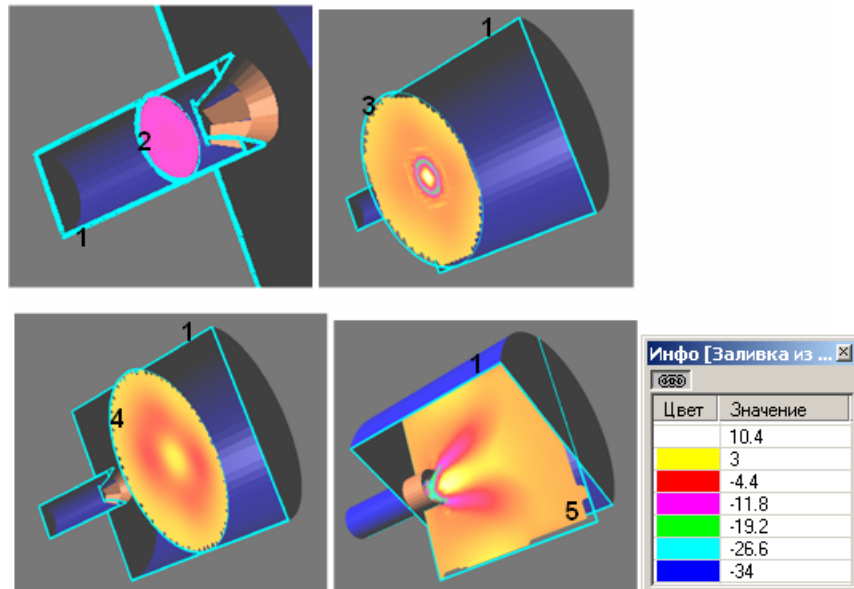
Все действия, производимые над объектом в этом режиме, сводятся к изменению значений параметров в окне его свойств. Любую настройку параметров можно продублировать ручным вводом значений параметров в окне свойств. Если параметры должны быть заданы с высокой точностью, то их необходимо задавать вручную. Однако в подавляющем большинстве случаев достаточно точности, которую обеспечивает интерактивная настройка параметров слоя. При этом она гораздо нагляднее и, как следствие, гораздо быстрее.

2.4.3.5.2 Интерактивная анимация

При интерактивной настройке параметров каждое движение мыши заставляет активный слой обновляться с новыми параметрами. В процессе настройки слой может быть перестроен множество раз. Возможность перестройки слоя в реальном времени и с желаемым изменением того или иного параметра слоя создает мощное средство анализа течений. Приведем пример анализа с помощью интерактивной анимации. Построим плоскость с векторами и начнем равномерно двигать ее вдоль нормали к плоскости. Вместе с движением плоскости будет меняться картина векторного поля на ней. Такое движение позволит не только увидеть общий характер изменения векторного поля в пространстве, но и выделить зоны быстрого изменения модуля и направления векторной переменной.

Рассмотрим пример течения жидкости в реальной геометрии. Статические картинки не могут передать эффекта анимации, но с их помощью можно передать геометрию тел рассматриваемой задачи, а также пояснить расположение плоскости с тоновой заливкой в начале и конце движения.

На исунке показан завихритель газовой горелки, который служит для создания потока воздуха определенной структуры. Он состоит из подводного канала (малый цилиндр), камеры (большой цилиндр) и собственно завихрителя (несколько наклоненных лопаток) между ними. В подводной канал дувается однородный поток, который затем закручивается лопатками.



Плоскость с тоновой заливкой по Z-компоненте скорости в завихрителе.

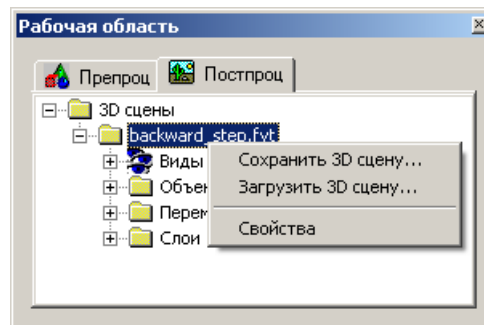
Построим тоновую заливку по Z-компоненте скорости на плоскости. В окне **Инфо** видно, какие цвета соответствуют каким значениям переменной. Таким образом, заливка позволяет определить численное значение Z-компоненты скорости воздуха для любой точки на плоскости. Изначально нормаль плоскости совпадает с осью обоих цилиндров. При движении плоскости вдоль нормали получаются рисунки верхнего ряда.

При таком движении можно отчетливо наблюдать возникновение, развитие и окончание возвратной зоны сразу за лопатками. Также становится ясна структура выходного потока, по которой определяются функциональные качества завихрителя.

Еще одним удачным движением можно считать поворот плоскости из положения 1 в положение 5. Оно дополняет информацию, полученную при смещении плоскости вдоль оси завихрителя.

2.4.3.6 Сохранение и загрузка состояния постпроцессора

В постпроцессоре имеется возможность сохранения статуса постпроцессора (сцены) и загрузки сохраненного статуса в этот же или другой вариант.



При сохранении состояния постпроцессора в файл ***.fvs** записывается вся информация из постпроцессора (слои визуализации, набор 3D видов и т.д.). Сохраненный файл можно использовать для просмотра тех же слоев визуализации в исходном варианте или в варианте, незначительно отличающемся от исходного. При загрузке сохраненного статуса постпроцессора вся информация о текущем состоянии постпроцессора будет уничтожена и заменена новой.

Различные сохраненные состояния постпроцессора одного и того же варианта можно использовать для создания последовательности статусов постпроцессора с помощью инструментов [Захват](#).

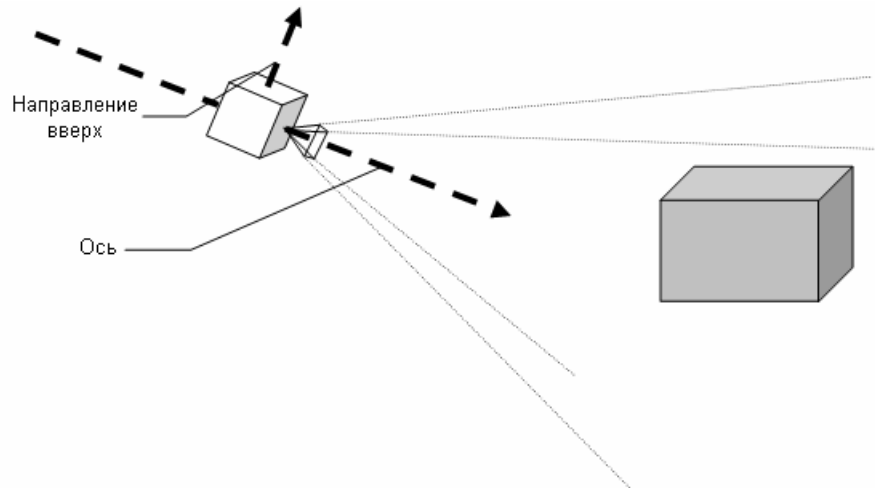
2.4.4 3D сцена

2.4.4.1 Состояние 3D сцены

Состояние 3D сцены характеризуется:

- [положением камеры в 3D пространстве](#);
- [параметрами объектива камеры](#);
- [состоянием источников света](#).

2.4.4.1.1 Положение камеры в 3D пространстве



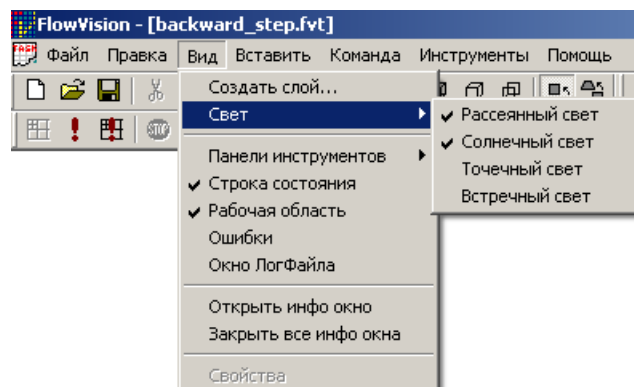
Проекция 3D сцены на экран зависит от расположения камеры (или, по-другому, наблюдателя) в пространстве объектов. Расположение включает в себя ориентацию камеры (направление оси камеры и направление "вверх" для камеры, эти два направления перпендикулярны) и ее параметр обзора. В случае перспективной проекции, это – смещение относительно начала координат. Если в начало координат помещено геометрическое тело, то, при удалении камеры от начала координат, обзор будет расширяться, т.е. тело будет занимать все меньшую часть площади окна. И наоборот, при приближении обзор будет сужаться. Другие смещения камеры приведут к выбору нового видимого объема. В случае параллельной проекции визуальный эффект приближения/удаления достигается уменьшением/увеличением размера смотрового окна ("объектива" камеры).

Положение камеры можно изменять при включенном режиме настройки вида сцены мышью в графическом окне. Пользователю доступны следующие действия:

- Вращение относительно выбранного центра вращения (нажата левая кнопка мыши). Изменяется ориентация камеры. По умолчанию центр вращения совпадает с центром расчетной области.
- Смещение в плоскости экрана (нажата правая кнопка). Изменяется параметр обзора камеры.
- Сужение/расширение обзора (нажаты правая и левая кнопки одновременно) Изменяется параметр обзора камеры.

2.4.4.1.2 Источники света

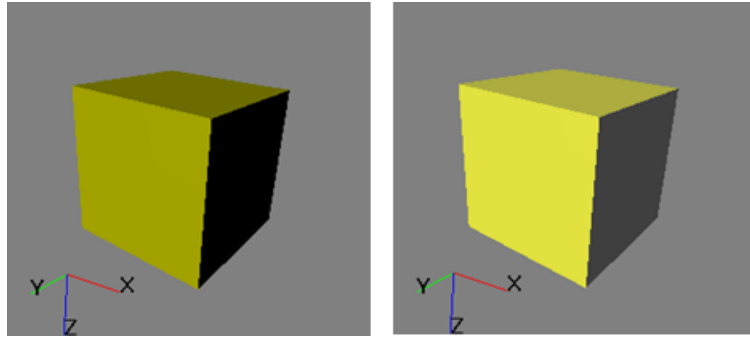
Для того, чтобы сцена выглядела объемной на плоском экране, ее необходимо осветить. Освещения требуют все тела, состоящие из поверхностей. Исключение составляют поверхности с тоновой заливкой. Для объектов, состоящих из линий и точек, освещение во многих случаях не является необходимым. Все изображаемые объекты делятся на освещаемые и неосвещаемые. Цвет освещаемого объекта зависит от его цвета и от того, какие источники света включены. Если все источники света выключены, все освещаемые объекты черные. На освещаемых объектах свет может давать блики и тени. Примером освещаемого объекта являются твердые тела. Цвет неосвещаемого объекта всегда один и тот же – это цвет материала объекта. Оси координат и вектора на плоскости – примеры неосвещаемых объектов.



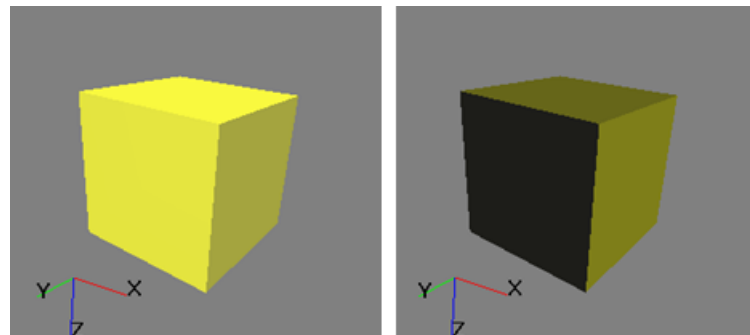
Включение/выключение источников света.

В системе существует 4 источника света с фиксированными свойствами, изменение которых недоступно пользователю. Они включаются и выключаются независимо друг от друга из пункта меню **Вид Свет**.

Освещение кубика разными источниками света. Слева включен источник **Солнечный свет**, справа включены источники **Солнечный свет** и **Рассеянный свет**:



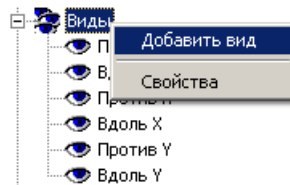
Освещение кубика разными источниками света. Слева включены источники **Солнечный свет**, **Рассеянный свет** и **Точечный свет**, справа включены источники **Точечный свет** и **Встречный свет**:



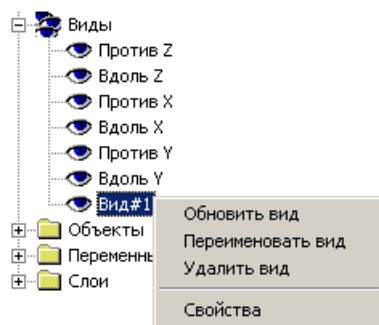
- Источник света **Рассеянный свет** – источник рассеянного белого света. По умолчанию включен.
- Источник света **Солнечный свет** – источник направленного света, расположенный сверху-сзади и направленный на твердые тела варианта. Имитирует привычный глазу белый солнечный свет. По умолчанию включен.
- Источник света **Точечный свет**. Расположение и направление симметричны источнику **Солнечный свет** относительно вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости экрана. Удобен для подсветки объектов, на которые не попадает свет от источника **Солнечный свет**. По умолчанию выключен.
- Источник света **Встречный свет** – источник белого света, расположенный на оси камеры за твердыми телами. Светит в камеру. Его включение обрисовывает контуры объектов, придает дополнительный объем изображению. По умолчанию выключен.

2.4.4.1.3 Работа с видами

Все виды хранятся в варианте в папке **Виды**. Выделение вида в дереве влечет за собой присвоение сцене установок, записанных в этом виде.



В варианте всегда присутствуют 6 стандартных видов, которые не могут быть изменены или удалены. Это три вида вдоль осей координат: **Вдоль X**, **Вдоль Y**, **Вдоль Z**. И три вида навстречу координатным осям: **Против X**, **Против Y**, **Против Z**. При этом направление "вверх" для камеры совпадает с одной из двух остальных осей. Проекция центра геометрии совпадает с центром графического окна и геометрические тела задачи занимают приблизительно половину его площади.



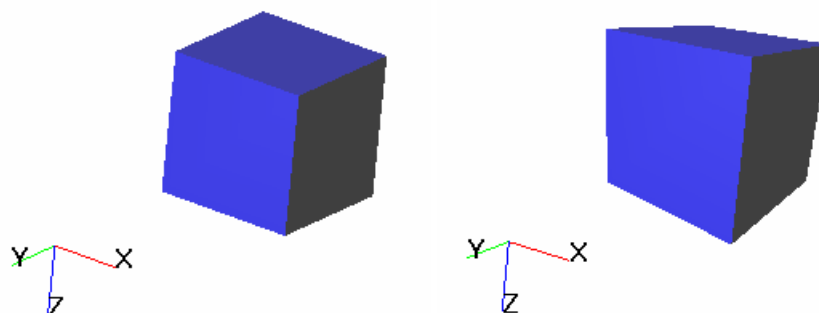
Кроме шести стандартных видов пользователь может создавать новые виды. Процесс создания вида очень прост: пользователь располагает 3D сцену в графическом окне желаемым образом, устанавливает состояние источников света. После этого в контекстном меню папки видов (**Виды**) выбирается пункт **Добавить вид**. По этой команде в папке видов появляется новый элемент с именем Sight#X, где X = 1, 2, ... , в котором записаны выбранные установки 3D сцены. Теперь, чтобы восстановить записанные установки в произвольный момент времени, достаточно выделить в дереве вид с этими установками. Созданные пользователем виды сохраняются при записи варианта. Также они могут быть удалены (пункт **Удалить вид** контекстного меню вида 3D сцены) и изменены (для того, чтобы изменить вид, нужно сначала выделить его в дереве, затем настроить параметры сцены, а затем выбрать пункт **Обновить вид** контекстного меню вида). У шести стандартных видов пункты контекстного меню **Обновить вид** и **Удалить вид** заблокированы.

2.4.4.2 Остальные настройки

Также имеется возможность настройки следующих параметров:

- вид проекции сцены на экран
- пропорциональность изображения
- настройки варианта

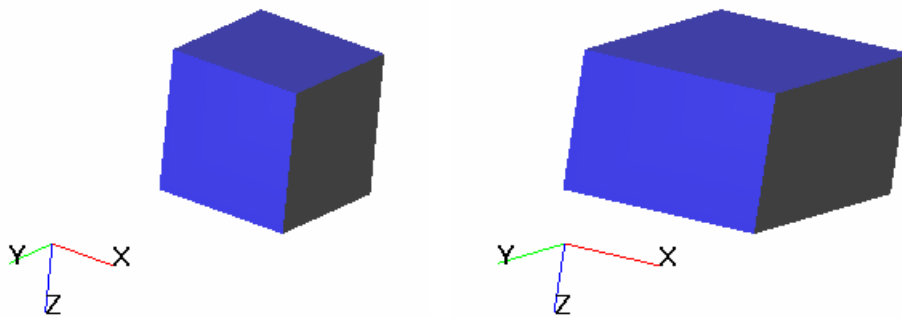
2.4.4.2.1 Вид проекции сцены на экран



Два вида проекции сцены на экран. Слева кубик отображается в параллельной проекции, справа – в перспективной.

Сцена может быть отображена на экран в двух проекциях – перспективной и параллельной. Перспективная проекция дает более реалистичное изображение, в то время, как параллельная сохраняет углы и отношения размеров в объектном пространстве. Перспективная проекция имеет конус зрения, в основании которого лежит прямоугольник. Таким образом, перспективная проекция имеет два параметра: горизонтальный и вертикальный углы зрения. Эти параметры фиксированы таким образом, чтобы изображение выглядело максимально реалистично для человека, сидящего в 30-40 см от монитора.

2.4.4.2.2 Пропорциональность изображения



Пропорциональное (слева) и непропорциональное (справа) отображение сцены в параллельной проекции.

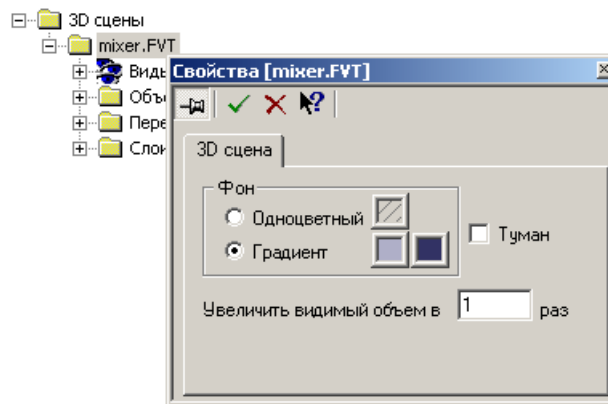
На выходе объектива камеры получается плоское прямоугольное изображение 3D сцены. Существует две возможности отображения его в графическом окне. В первом случае отношение сторон прямоугольника сохраняется, во втором — делается равным отношению сторон графического окна. По умолчанию используется первая схема. Вторая схема дает в общем случае деформированное изображение сцены и удобна лишь в тех редких случаях, когда отношение ширины графического окна к его высоте сильно отличается от единицы, либо расчетная область слишком вытянута вдоль одного направления.

2.4.4.2.3 Настройки варианта

Настройки варианта можно просматривать и редактировать в окне свойств, вызванном для варианта в дереве постпроцессора.

Пользователю доступны три настройки:

- Цвет фона графического окна.
- Наличие тумана.
- Изменение размера отображаемой области.



Фон графического окна может быть либо одноцветным **Одноцветный** либо с цветовым переходом от верхнего к нижнему краю окна **Градиент**. Установка цвета(ов) фона осуществляется через стандартный диалог выбора цвета. Цвет фона или нижней и верхней границ фона можно выбрать, щелкнув мышкой в цветную зону соответствующего элемента управления.

Галочка в поле **Туман** включает наполнение 3D сцены полупрозрачным туманом. Туман подчеркивает глубину кадра, улучшает восприятие трехмерного пространства.

В поле **Увеличить видимый объем в** указывается во сколько раз необходимо увеличить размер области, внутри которой отображаются слои визуализации. **OpenGL** определяет видимую область, как прямоугольный параллелепипед, размеры которого определяются загруженной в вариант геометрией. Если затем в вариант загружаются подвижные тела, которые выходят за границы этого параллелепипеда, то **OpenGL** не отображает то, что оказалось за границами видимого объема. В таких случаях требуется увеличить размер видимой области.

2.4.5 Геометрические объекты

Геометрические объекты – один из основных типов объектов постпроцессора. Объекты этого типа – геометрические тела, которые являются основой для реализации [слоев визуализации](#). Геометрические объекты по умолчанию невидимы, сделать геометрический объект видимым можно из соответствующего ему элемента дерева постпроцессора.

Геометрические объекты постпроцессора **FlowVision** определяются способами их создания:

- Создание геометрического объекта из шаблона объекта-примитива (линии, плоскости, прямоугольного параллелепипеда и т.д.).
- Экспортирование геометрического объекта из препроцессора.

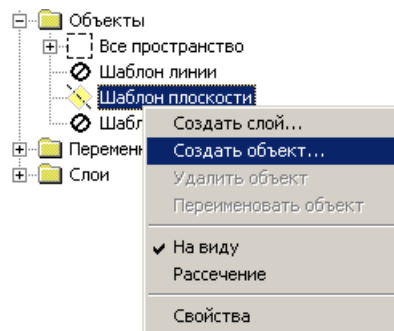
2.4.5.1 Создание геометрического объекта из шаблона объекта

Шаблон объекта – это геометрический примитив, полностью определяющийся небольшим набором параметров. Например: прямоугольный параллелепипед (параметры – центр и размеры), плоскость (параметры – точка на плоскости и нормаль к плоскости) и т.д. Шаблон объекта отличается от объекта тем, что значения его параметров определены по умолчанию.

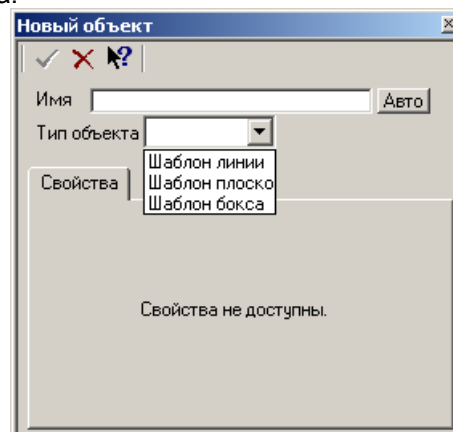
Создание нового объекта заключается в выборе значений параметров существующего шаблона объекта.



Ниже приводится описание процедуры создания нового геометрического объекта из шаблона объекта.

- Вызвать диалог **Новый объект** из пункта **Создать объект** контекстного меню геометрического объекта.



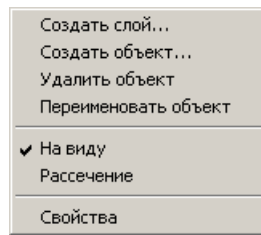
- Выбрать шаблон объекта из списка **Тип объекта**. После этого возникнут страницы, которые содержат параметры шаблона.



- Задать параметры шаблона.
- Задать имя нового объекта или оставить имя по умолчанию. Если пользователь ввел новое имя и после этого захотел вернуться к имени по умолчанию, ему достаточно нажать кнопку **Авто**.
- Создать новый объект, нажав кнопку  панели инструментов. После нажатия этой кнопки объект создан и удалить его можно только из дерева.
- Чтобы начать создание объекта заново, достаточно нажать кнопку .

2.4.5.2 Контекстное меню геометрического объекта

Все геометрические объекты имеют одно и то же контекстное меню; над ними можно производить одни и те же действия.



Первый пункт меню – создание нового объекта из шаблона объекта.

Второй пункт – создание нового слоя визуализации на основе этого объекта.

Третий и четвертый пункты – удаление и переименование объекта. Также объект может быть переименован непосредственно в дереве постпроцессора.


Пункт **На виду**: если напротив него стоит галочка, объект отображается на экране, если нет, то объект скрыт. Если элемент дерева, соответствующий объекту, выбран в дереве, то объект всегда отображается на экране, вне зависимости от пункта **На виду**.

Пункт **Рассечение**: если напротив него стоит галочка, объект разрезается плоскостями отсечения, если нет, то плоскости отсечения не действуют на него.

Пункт **Свойства** вызывает окно свойств геометрического объекта.

2.4.5.3 Режим настройки параметров

Постпроцессор находится в режиме настройки параметров геометрического объекта, когда выполнены два условия:

- В дереве постпроцессора выделен какой-нибудь геометрический объект.
- Нажата кнопка .

В этом режиме у пользователя появляется возможность редактирования параметров выбранного объекта в графическом окне постпроцессора с помощью мыши. В зависимости от типа выбранного объекта редактирование может включать в себя до трех различных действий.

- **Действие №1** выполняется, когда курсор мыши находится над графическим окном и нажата левая кнопка.
- **Действие №2** выполняется, когда курсор мыши находится над графическим окном и нажата правая кнопка.
- **Действие №3** выполняется, когда курсор мыши находится над графическим окном и одновременно нажаты левая и правая кнопки.

Эффект действия пропорционален смещению мыши.

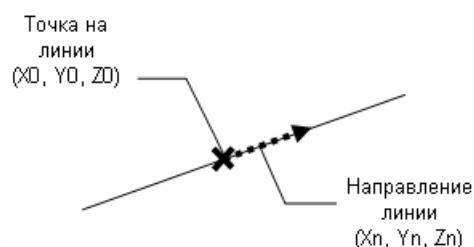
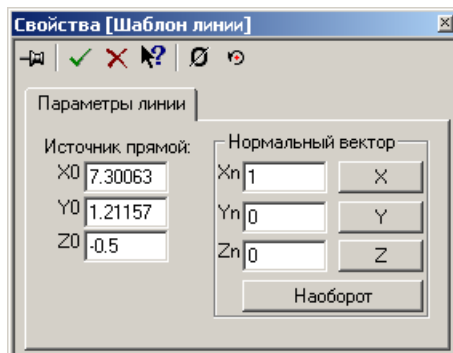
Заметим, что для некоторых объектов определены не все действия.

2.4.5.4 Шаблоны объектов

В этом разделе описаны следующие шаблоны объектов и их параметры:

- [шаблон линии](#),
- [шаблон плоскости](#),
- [шаблон прямоугольного параллелепипеда](#),
- [шаблон конуса](#).

2.4.5.4.1 Шаблон линии



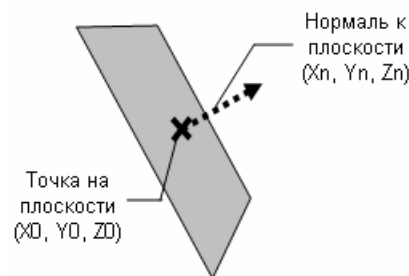
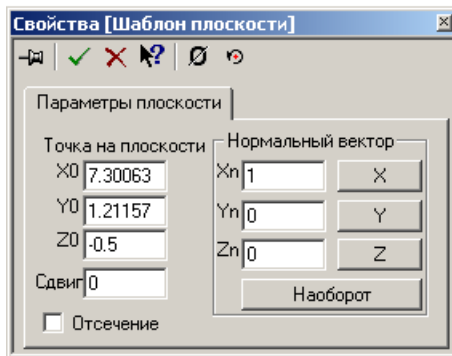
Шаблон линии имеет следующие параметры:

- **Источник прямой** – декартовы координаты X_0 , Y_0 и Z_0 некоторой точки на линии. По умолчанию это координаты центра расчетной области.
- **Нормальный вектор** – направление линии в 3D пространстве. Направить линию по координатным осям можно с помощью кнопок X , Y и Z . Кроме того, изменить направление линии на противоположное можно с помощью кнопки **Наоборот**.

Интерактивная настройка параметров:

- **Действие №1** вызывает вращение линии вокруг точки на линии, отмеченной шариком. **Действие №1** меняет значение вектора **Нормальный вектор** в странице свойств.
- **Действие №2** вызывает перемещение исходной точки линии, помеченной шариком в плоскости, перпендикулярной прямой. **Действие №2** меняет значение начальной точки линии **Источник прямой** в странице свойств.

2.4.5.4.2 Шаблон плоскости



Шаблон плоскости имеет следующие параметры:

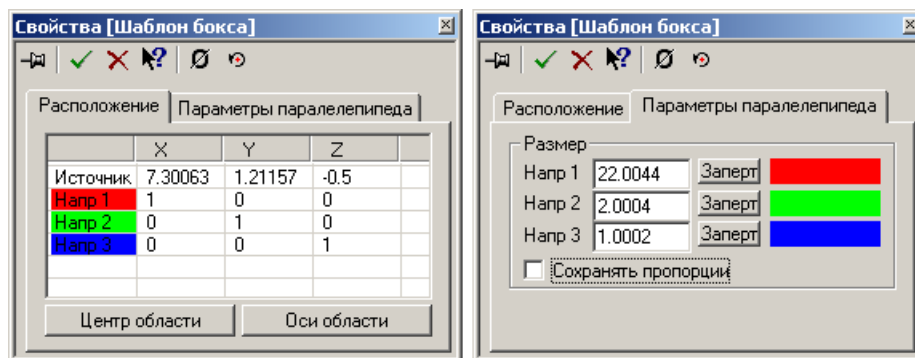
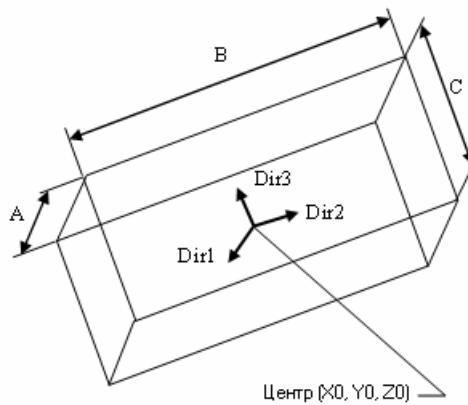
- **Точка на плоскости** – декартовы координаты X_0 , Y_0 и Z_0 некоторой точки на плоскости. По умолчанию это координаты центра расчетной области.
- **Нормальный вектор** – вектор, нормальный к плоскости. Абсолютная величина нормали к плоскости не имеет значения. Задать нормаль к плоскости, параллельную одной из координатных осей можно с помощью кнопок X , Y и Z .
- **Сдвиг** – смещение плоскости вдоль нормального вектора на расстояние, указанное в поле **Сдвиг**. В этом случае точка (X_0, Y_0, Z_0) не лежит на плоскости. Нажатие кнопок X , Y или Z автоматически устанавливает поле **Сдвиг** равным нулю. Нажатие кнопки **Наоборот** меняет знак у поля **Сдвиг**. Таким образом, при нажатии кнопки **Наоборот** положение плоскости в пространстве не меняется, а компоненты нормального вектора меняют знак.
- **Отсечение** делит пространство на два полупространства. В том полупространстве, куда смотрит нормаль плоскости, отрисовка слоев и объектов разрешена, в другом – запрещена. Плоскости отсечения воздействуют на все слои, у которых установлен флаг [Рассечь](#). Линия пересечения плоскости отсечения с твердыми телами выделена голубым цветом. В случае, если плоскость и твердые тела не имеют общих точек, в плоскости отрисовывается квадрат, указывающий ее положение в пространстве.

Интерактивная настройка параметров

Если при начале одного из действий поле **Сдвиг** содержало ненулевое значение, оно становится нулевым и значение точки **Точка на плоскости** корректируется так, чтобы уравнение плоскости не изменилось.

- **Действие №1** вызывает вращение плоскости вокруг точки на плоскости, отмеченной шариком. **Действие №1** меняет значение вектора **Нормальный вектор** в странице свойств.
- **Действие №2** вызывает перемещение исходной точки плоскости, помеченной шариком в этой плоскости. **Действие №2** меняет значение начальной точки плоскости **Точка на плоскости** в странице свойств.
- **Действие №3** вызывает смещение плоскости вдоль ее нормали. **Действие №3** меняет значение начальной точки плоскости **Точка на плоскости** в странице свойств.

2.4.5.4.3 Шаблон прямоугольного параллелепипеда



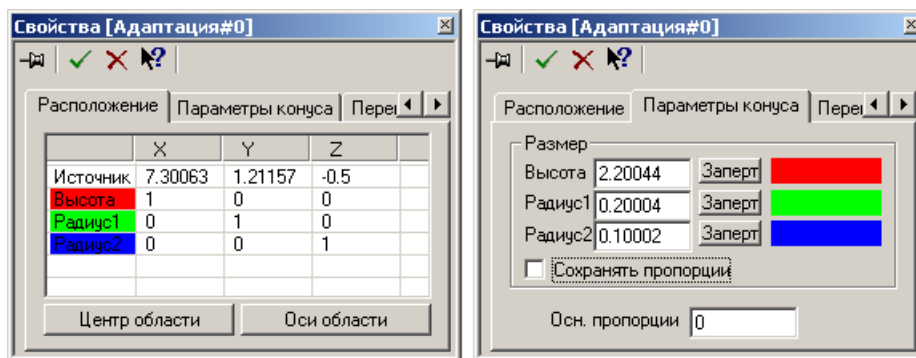
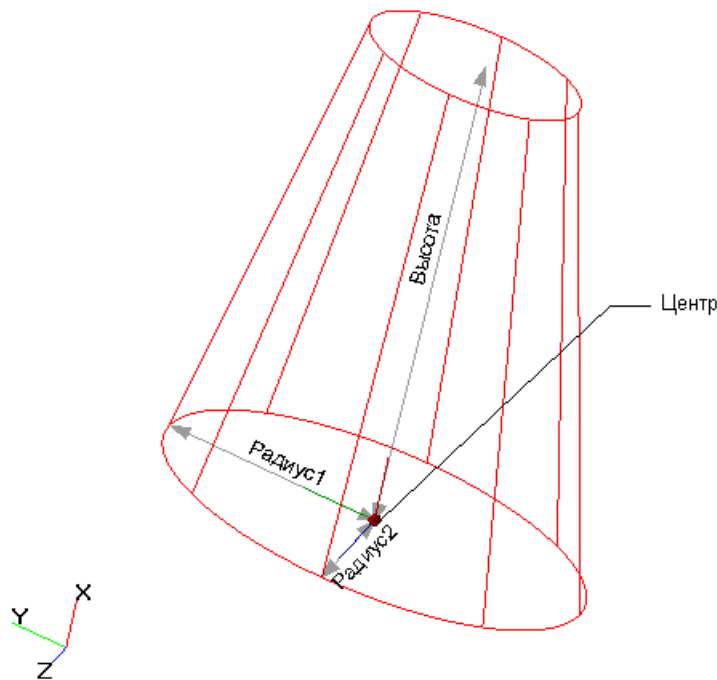
Шаблон прямоугольного параллелепипеда позволяет задать прямоугольный параллелепипед с произвольно ориентированными в пространстве ребрами. Шаблон прямоугольного параллелепипеда имеет следующие параметры:

- **Источник** – декартовы координаты центра параллелепипеда. По умолчанию, это – координаты центра расчетной области. В любой момент выставить значение центра параллелепипеда равным значению центра расчетной области можно, нажав кнопку **Центр Области**.
- Ориентация ребер прямоугольного параллелепипеда **Напр 1**, **Напр 2**, **Напр 3** – вектора, по которым направлены ребра. **Напр 1** задает первое направление, **Напр 2** – второе, с учетом того, что **Напр 2** перпендикулярно **Напр 1**, **Напр 3** вычисляется так, чтобы **Напр 1**, **Напр 2** и **Напр 3** образовывали правую тройку векторов. В любой момент направить ребра параллелепипеда вдоль осей координат можно, нажав кнопку **Оси области**.
- **Размер** – длины трех взаимоперпендикулярных ребер параллелепипеда. Если в поле **Сохранять пропорции** не стоит галочка, размеры задаются независимо друг от друга. Иначе изменение одного из размеров влечет за собой изменение остальных двух таким образом, чтобы сохранялись отношения между каждыми двумя величинами. По умолчанию размеры параллелепипеда равны размерам расчетной области. Кнопки **Lock (Заперт)** справа от каждого размера блокируют изменение этого размера при интерактивной настройке параметров параллелепипеда.

Интерактивная настройка параметров

- **Действие №1** вызывает вращение параллелепипеда вокруг его центра, отмеченного шариком. **Действие №1** меняет значение векторов **Напр 1**, **Напр 2**, **Напр 3** в первой странице свойств.
- **Действие №2** вызывает перемещение центра параллелепипеда, помеченного шариком в плоскости, параллельной плоскости экрана. **Действие №2** меняет координаты центра параллелепипеда **Источник** в первой странице свойств.
- **Действие №3** вызывает изменение размеров параллелепипеда. Если на второй странице свойств не нажата ни одна кнопка **Заперт**, то все размеры параллелепипеда изменяются пропорционально. Если нажата одна или несколько кнопок **Заперт**, то соответствующие размеры параллелепипеда не меняются при интерактивной настройке параметров, остальные размеры меняются пропорционально. **Действие №3** меняет значение начальной точки плоскости **Точка на плоскости** в странице свойств.

2.4.5.4.4 Шаблон конуса



Шаблон конуса позволяет задать конус, усеченный конус или цилиндр, произвольно ориентированный в пространстве. Шаблон конуса имеет следующие параметры:

- **Источник** – декартовы координаты центра первого основания конуса. По умолчанию, это – координаты центра расчетной области. В любой момент выставить значение центра первого основания конуса равным значению центра расчетной области можно, нажав кнопку **Центр области**.
- Ориентация конуса **Высота**, **Радиус1**, **Радиус2** – вектора, по которым направлены основания и высота конуса.

Высота задает первое направление,

Радиус1 – второе, с учетом того, что **Радиус1** перпендикулярно **Высота**,

Радиус2 вычисляется так, чтобы **Высота**, **Радиус1** и **Радиус2** образовывали правую тройку векторов.

В любой момент направить конус вдоль осей координат можно, нажав кнопку **Оси области**.

- **Размеры:**

Высота – высота конуса;

Радиус1, **Радиус2** – два радиуса эллипса первого основания (ориентация этих радиусов и высоты конуса относительно системы координат расчетной области указывается системой координат самого конуса, находящейся в центре первого основания конуса).

Если в поле **Сохранять пропорции** не стоит галочка, размеры задаются независимо друг от друга.

Иначе изменение одного из размеров влечет за собой изменение остальных двух таким образом, чтобы сохранялись отношения между каждыми двумя величинами. По умолчанию размеры конуса равны размерам расчетной области. Кнопки **Заперт** справа от каждого размера блокируют изменение этого размера при интерактивной настройке параметров конуса. Параметр **Осн. пропорции** задает отношение радиусов первого и второго оснований конуса, т.е. если это отношение равно 0, то это будет конус, если 1 – то цилиндр, если <1 – то усеченный конус, у которого второе основание меньше первого, если >1 – то усеченный конус, у которого второе основание больше первого.

Интерактивная настройка параметров

- **Действие №1** вызывает вращение конуса вокруг его центра, отмеченного шариком. **Действие №1** меняет значение векторов **Высота**, **Радиус1**, **Радиус2** в первой странице свойств.
- **Действие №2** вызывает перемещение центра первого основания конуса, помеченного шариком в плоскости, параллельной плоскости экрана. **Действие №2** меняет координаты центра параллелепипеда **Источник** в первой странице свойств.
- **Действие №3** вызывает изменение размеров конуса. Если на второй странице свойств не нажата ни одна кнопка **Заперт**, то все размеры конуса изменяются пропорционально. Если нажата одна или несколько кнопок **Заперт**, то соответствующие размеры конуса не меняются при интерактивной настройке параметров, остальные размеры меняются пропорционально. **Действие №3** меняет значение начальной точки плоскости **Точка на плоскости** в странице свойств.

2.4.5.5 Объект Все пространство

Объект **Все пространство** – уникальный объект, который создается одновременно с созданием варианта, не удаляется и не редактируется, поскольку не имеет никаких свойств. Отметим, что **Все пространство** – не шаблон объекта! Этот объект не накладывает пространственных ограничений на отрисовку слоя, слой сам определяет, где и что ему отрисовывать.

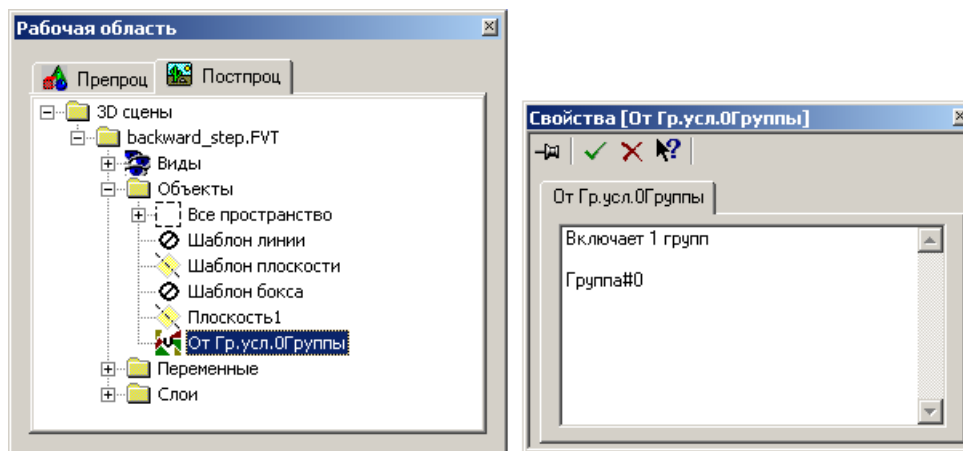
На основе объекта **Все пространство** создаются три специальных слоя:

- **Твердые тела;**
- **Координатная система;**
- **Расчетная сетка;**

а также другие слои.

Несмотря на то, что объект **Все пространство** декларирует возможность отрисовки слоя во всем объектном пространстве, существует ограничение графического ядра постпроцессора – вся отрисовка происходит внутри прямоугольного параллелепипеда. Его центр совпадает с центром расчетной области, а размер приблизительно в 3-4 раза больше размера расчетной области. Таким образом, слой ничего не может отрисовать вне этого параллелепипеда. Размер этого параллелепипеда может быть изменен с помощью опции **Увеличить видимый объем** в [настройках варианта](#).

2.4.5.6 Объекты, полученные из супергрупп



Объекты, полученные из супергрупп, появляются в дереве постпроцессора (папка **Объекты** варианта) в результате экспортирования супергрупп, предварительно созданных в дереве препроцессора (см. [Создание супергруппы](#)). После того, как было выполнено экспортирование, связь экспортера и объекта разрывается и модификации экспортера не влияют на объект. Таким образом, Объекты, полученные из супергрупп, являются не редактируемыми. Окно свойств для сложного объекта сообщает информацию о наборе фасеток и групп, из которых состоит объект.

2.4.6 Слои визуализации

Слои визуализации – это визуальные объекты, отображаемые в графическом окне **FlowVision**. Любая 3D сцена представляет собой набор различных слоев визуализации.

В общем случае слой имеет трехкомпонентную внутреннюю структуру: он состоит из геометрического объекта, расчетной переменной и метода отрисовки. Типы слоев различаются по методам отрисовки, которые в них заложены. Названия типов слоев – это названия их методов отрисовки.

Методы отрисовки классифицируются по нескольким признакам:

- По типу переменной (скаляр, вектор). Чаще всего метод отрисовки позволяет отображать переменные только одного типа. Например, изоповерхности имеют смысл только для скалярного

поля, а маркеры – только для векторного. Есть и исключения: слой **Характеристики** может быть построен как на скалярной, так и на векторной переменной. Некоторые методы отрисовки не требуют расчетной переменной. Такие слои называются **специальными**.

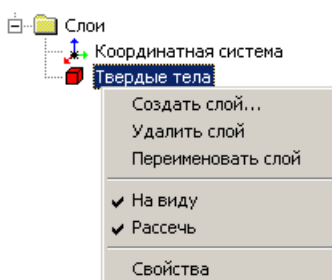
- По типу геометрического объекта ([Все пространство](#), [Линия](#), [Плоскость](#), [Параллелепипед](#), [Объект, полученный из супергруппы](#)). Например, слой **Изоповерхность** может быть основан только на объекте **Все Пространство**, а слой **Двумерный график** может быть основан как на **Линии**, так и на **Плоскости**.
- По наличию анимации при отображении слоя. По этому признаку классифицируются слои, требующие расчетную переменную. Слои, не содержащие анимации, называются **статическими**, а слои, содержащие анимацию – **слоями с анимацией**.

Тип слоя визуализации	Название слоя (метод отрисовки)	Геометрические объекты	Тип переменной
Специальный	Твердые тела	Все пространство	—
	Координатная система	Все пространство	—
	Расчетная сетка	Все пространство	—
	Отладка ячеек	Все пространство	—
	Набор ячеек	Все пространство	—
Статический	Двумерный график	Плоскость Линия	Скаляр
	График вдоль кривой	Плоскость	Скаляр
	График по окружности	Плоскость	Скаляр
	Распределенные характеристики	Линия	Скаляр Вектор
	Характеристики	Все пространство Плоскость Объект, полученный из супергруппы	Скаляр Вектор
	Вектора	Плоскость	Вектор
	Изолинии	Плоскость Объект, полученный из супергруппы	Скаляр
	Заливка	Плоскость Объект, полученный из супергруппы	Скаляр
	Изоповерхность	Все пространство	Скаляр
С анимацией	Вспышки	Все пространство Параллелепипед	Вектор
	Группа частиц	Плоскость Объект, полученный из супергруппы	Вектор
	Траектории	Все пространство	—

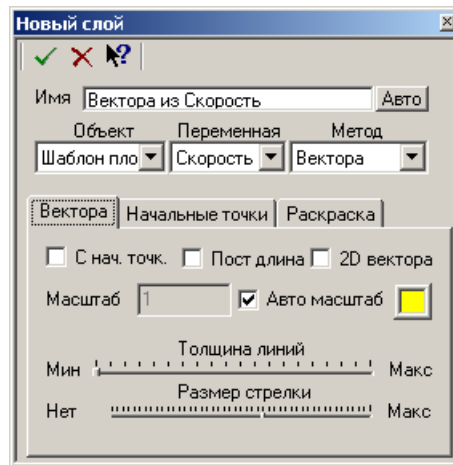
2.4.6.1 Создание слоя

Вызвать диалог создания нового слоя можно несколькими способами:

- Из пункта меню **Вид Создать слой**.
- Из пункта **Создать слой** контекстного меню одного из следующих элементов дерева: геометрического объекта, расчетной переменной, слоя визуализации. При вызове диалога создания слоя из контекстного меню объекта этот объект будет автоматически выбран базовым для нового слоя. При вызове диалога создания слоя из контекстного меню переменной эта переменная будет автоматически выбрана базовой для нового слоя.



Выпадающий список **Объект** содержит список геометрических объектов, содержащихся в варианте, список **Переменная** содержит список расчетных переменных варианта, а список **Метод** содержит существующие во **FlowVision** методы отрисовки.



Процедура создания нового слоя следующая:

1. Выбрать геометрический объект, расчетную переменную и метод отрисовки из выпадающих списков **Объект**, **Переменная** и **Метод** соответственно. Последовательность выборов может быть произвольной. После этого возникнут страницы, которые содержат параметры метода отрисовки.
2. Задать параметры метода отрисовки в страницах свойств.
3. Задать имя нового слоя или оставить имя по умолчанию. Если пользователь ввел новое имя и после этого захотел вернуться к имени по умолчанию, ему достаточно нажать кнопку **Авто**.
4. Создать новый слой, нажав кнопку панели инструментов. После нажатия этой кнопки слой создан и удалить его можно только из дерева постпроцессора.
5. Чтобы начать создание слоя заново, достаточно нажать кнопку .

При создании нового слоя нужно выбрать три связанных параметра: объект, переменную и метод. Выбор одного параметра сразу сужает множество выборов остальных двух. Может возникнуть ситуация, когда в результате ошибочного выбора одного из параметров из списка другого пропадет необходимый пункт. В этом случае заново наполнить все списки можно, нажав кнопку .

Быстро создать наиболее часто используемые слои можно с помощью кнопок . Описание работы этой панели дано в разделе [Режимы](#).

2.4.6.2 Общие черты слоев

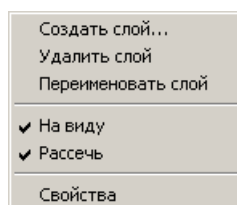
В этом разделе описаны детали реализации и интерфейса, общие для всех слоев визуализации. Различия между слоями рассмотрены в последующих разделах.

Все слои имеют одинаковый набор кнопок в окне свойств:

- Кнопка – сохранить видимым.
- Кнопка – применить изменения к слою или создать новый слой.
- Кнопка – удалить переменную и все ее слои.
- Кнопка – подсказка.
- Кнопка – инициализировать свойства значениями по умолчанию.
- Кнопка – сменить переменную.
- Кнопка – применить настройки слоя только к видимой части экрана.
- Кнопка – добавить заливку к слою.

2.4.6.2.1 Контекстное меню слоя

Все слои визуализации реализованы как элементы дерева постпроцессора одного типа. Следовательно, они имеют одно и то же контекстное меню. над ними можно производить одни и те же действия.



Первые три пункта меню – создание нового слоя, удаление и переименование слоя. Также слой может быть переименован непосредственно в дереве постпроцессора.


Пункт **На виду**: если напротив него стоит галочка, слой отображается на экране, если нет, то слой скрыт. Если элемент дерева, соответствующий слою, выбран в дереве, то слой всегда отображается на экране, вне зависимости от пункта **На виду**.

Пункт **Рассечь**: если напротив него стоит галочка, слой разрезается плоскостями отсечения, если нет, то плоскости отсечения не действуют на слой.

Пункт **Свойства** вызывает окно свойств слоя.

2.4.6.2.2 Режим настройки параметров

Постпроцессор находится в режиме настройки параметров слоя, когда выполнены два условия:

- В дереве постпроцессора выделен какой-нибудь слой.
- Нажата кнопка .

В этом режиме у пользователя появляется возможность редактирования параметров активного слоя в графическом окне постпроцессора с помощью мыши. В зависимости от типа активного слоя редактирование может включать в себя до трех различных действий.

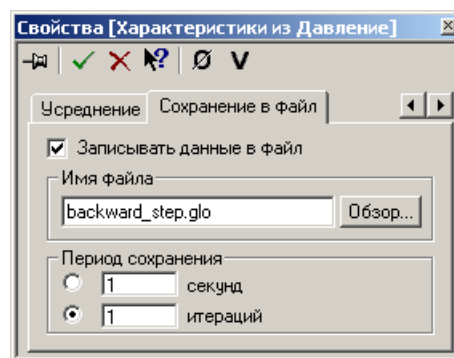
- **Действие №1** выполняется, когда курсор мыши находится над графическим окном и нажата левая кнопка.
- **Действие №2** выполняется, когда курсор мыши находится над графическим окном и нажата правая кнопка.
- **Действие №3** выполняется, когда курсор мыши находится над графическим окном и одновременно нажаты левая и правая кнопки.

Эффект действия пропорционален смещению мыши.

Заметим, что для некоторых слоев определены не все действия.

2.4.6.2.3 Создание файла с данными слоя

Некоторые слои (например, **Характеристики** и **Двумерный график**) предоставляют пользователю возможность периодически выводить данные во внешний файл. В окне свойств этих слоев присутствует стандартная страница **Сохранение в файл**.



Элементы управления этой страницы выполняют следующие функции:

- Поле **Записывать данные в файл**. Если стоит галочка, слой выводит информацию в файл.
- Строка редактирования **Файл**. Задаёт имя файла для вывода информации. Кнопка **Выбор** позволяет выйти в файловую систему для выбора файла.
- Группа элементов управления **Период сохранения**. Контролирует период вывода информации в файл. Если выделен пункт **N секунд**, то представление слоя будет выводиться в файл каждые N секунд расчетного времени. Если выделен пункт **M итераций**, то представление слоя будет выводиться в файл каждые M итераций. Каждая новая запись добавляется в конец существующего файла, не уничтожая предыдущие записи.

2.4.6.3 Специальные слои

Группа специальных слоев объединяет слои, для которых не требуются расчетные данные.

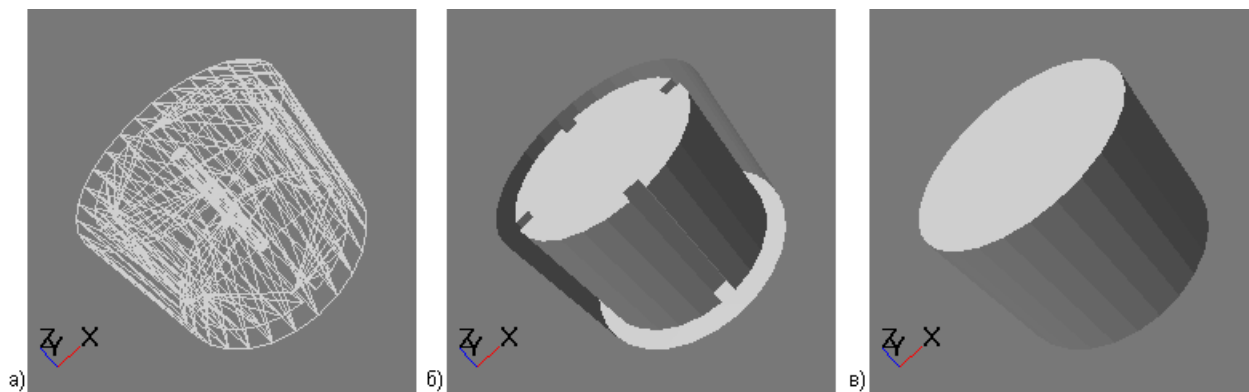
Соответственно, при создании специального слоя не указывается базовая переменная. Таким образом, специальные слои могут быть созданы и отображены до начала расчета.

К специальным слоям относятся:

- [Твердые тела](#)
- [Система координат](#)
- [Расчетная сетка](#)
- [Отладка ячеек](#)

- [Набор ячеек](#)

2.4.6.3.1 Твердые тела



Отрисовка твердых тел в трех режимах: а) только ребра фасеток, б) односторонние фасетки, в) двусторонние фасетки.

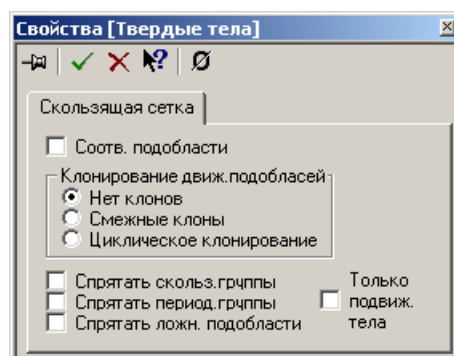
Слой отображает все твердые тела задачи с помощью набора освещенных фасеток. Цвет отдельной фасетки связан с типом граничного условия, установленного на ней.

Нельзя создать больше одного слоя такого типа. При создании нового варианта слой создается автоматически на основе геометрических данных используемого для создания варианта файла.

Базовые объекты


Всё пространство

Свойства слоя



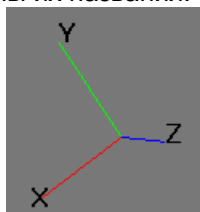
Слой имеет редактируемые свойства в случае, если в варианте есть скользящая сетка или подвижные тела:

- **Соотв. подобласти** – если проставлен этот флаг, подобласти смещаются таким образом, чтобы их скользящие границы совмещались.
- **Клонирование движ. подобластей** – эта группа кнопок предлагает 3 режима размножения периодически движущихся подобластей:
 - **Нет клонов**,
 - **Смежные клоны** – отрисовка двух копий движущейся подобласти таким образом, чтобы скользящие границы разных подобластей были пространственно совмещены независимо от их смещения,
 - **Циклическое клонирование** – отрисовка полного периода всех движущихся подобластей.
- **Спрятать скольз. группы** – не отрисовывать фасетки, на которых задано граничное условие **Скользящая поверхность**.
- **Спрятать период. группы** – не отрисовывать фасетки, на которых задано граничное условие **Периодическое**.
- **Спрятать ложн. подобласти** – не отрисовывать фасетки нерасчетных подобластей.
- **Только подвиж. тела** – показывать только подвижные тела.

Визуальное представление слоя зависит от выбора одной из пяти кнопок  [панели инструментов](#).

2.4.6.3.2 Система координат

Слой демонстрирует направление трех координатных осей X, Y и Z. Оси координат отрисованы как сплошные линии разных цветов (X – красная линия, Y – зеленая и Z – синяя), имеющие одну начальную точку. Кроме того, около концов осей написаны их названия.

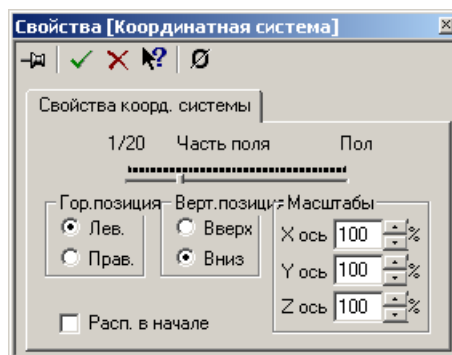


В зависимости от свойств слоя начало координат может быть привязано к точке графического окна или к точке трехмерного пространства (центру расчетной области). В первом случае слой не реагирует на параллельные смещения камеры в плоскости экрана и в обоих – на приближение/удаление камеры. Слой всегда выводится на экран поверх остальных слоев и, таким образом, не может быть закрыт ими. Нельзя создать больше одного слоя такого типа. При создании нового варианта слой создается автоматически с установками по умолчанию.

Базовые объекты

Всё пространство

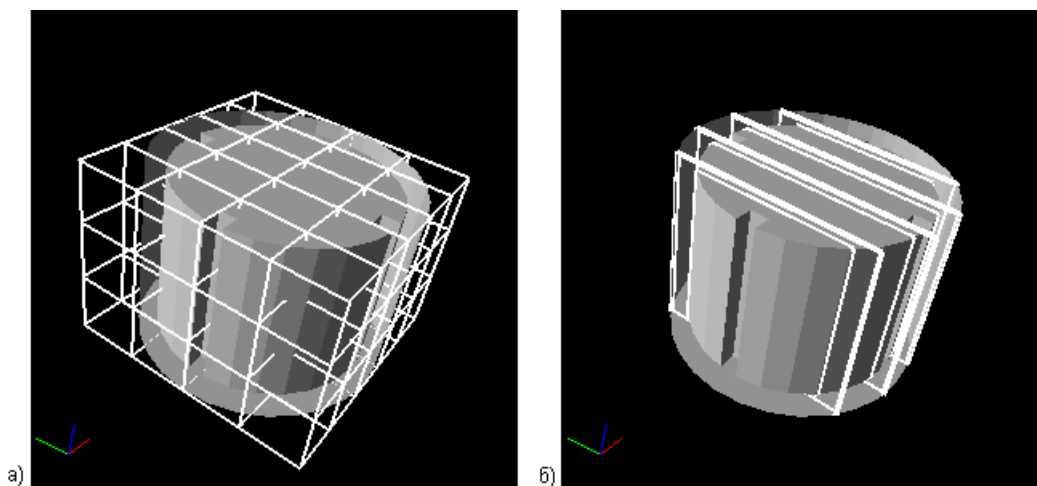
Свойства слоя



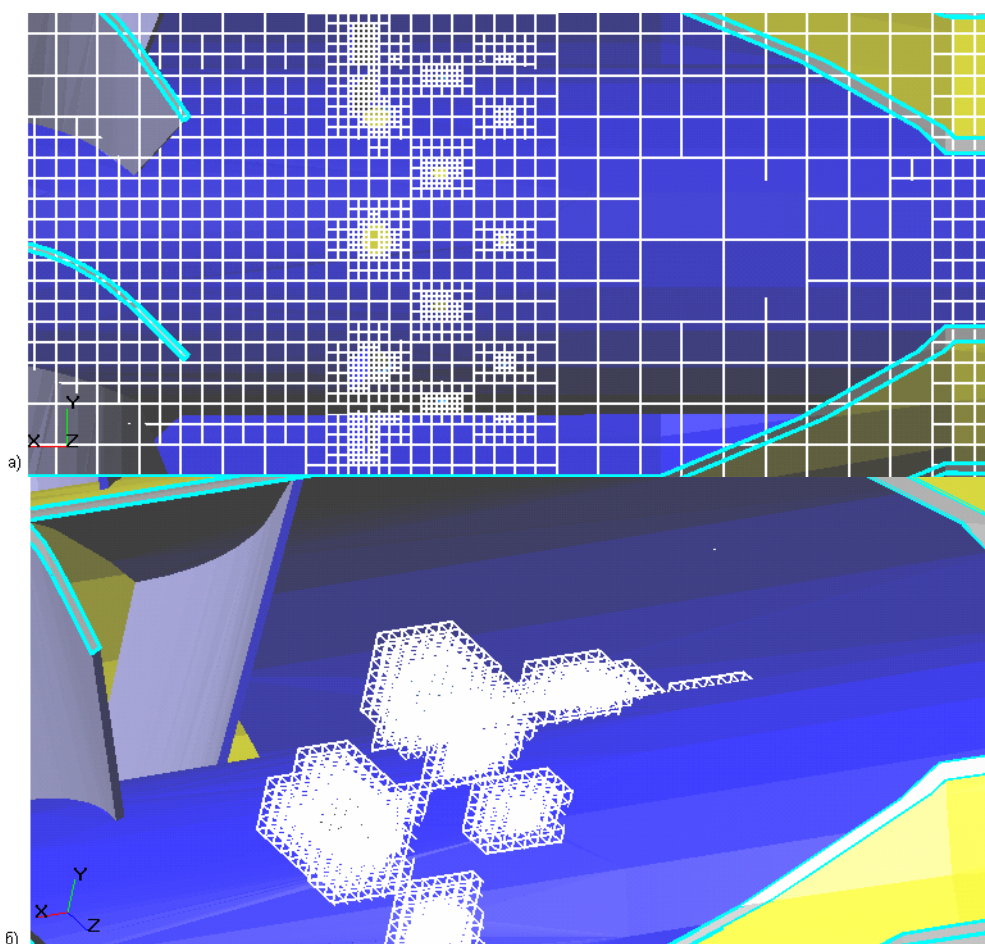
Слой **Координатная система** имеет следующие свойства:

- **Часть поля** – относительная длина координатных осей. Может принимать значения от 0.05 до 0.5 размеров графического окна.
- Положение начала координат (группа элементов управления **Гор.позиция**, **Верт.позиция**, **Расп. в начале**). Если в поле **Расп. в начале** не стоит галочки, положение начала координат привязано к точке графического окна и определяется выборами в группах **Гор.позиция** и **Верт.позиция**. Возможности выбора соответствуют четырем углам граф. окна. Если в поле **Расп. в начале** установлена галочка, то начало координат расположено в центре расчетной области.
- Масштаб координат (группа элементов управления **Масштабы**) задает отношение между единичными отрезками вдоль каждой из осей координат. По умолчанию, отношение 1:1:1. Если увеличить/уменьшить масштаб одной из осей, изображение сцены будет растянуто/сжато вдоль этой оси. Например, если ввести 200% в поле **X ось**, не меняя значения полей **Y ось** и **Z ось**, то отношение станет равным 2:1:1 и изображение будет растянуто в два раза вдоль оси X.

2.4.6.3.3 Расчетная сетка



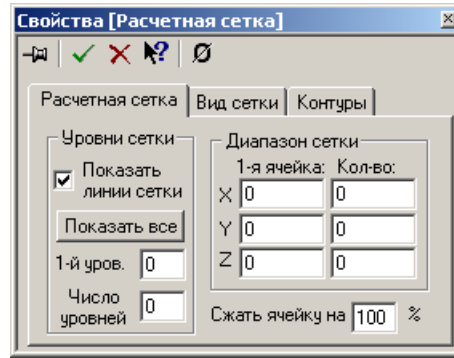
На рисунке: а) построены ребра ячеек расчетной сетки, б) построены линии пересечения твердых тел и граней ячеек расчетной сетки, перпендикулярных оси X.



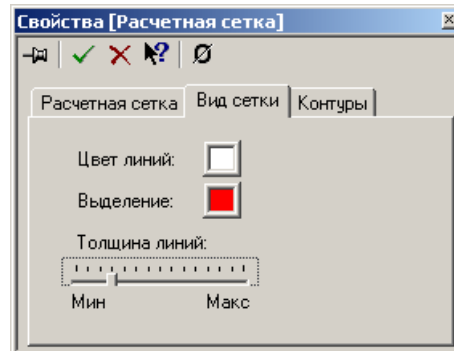
Расчетная сетка, локально измельченная по геометрии: а) все ячейки сетки, параллельная проекция сцены, направление взгляда вдоль оси Z; б) только измельченные ячейки, перспективная проекция сцены.

Слой **Расчетная сетка** делает видимыми ребра ячеек расчетной сетки как нулевого уровня, так и локально измельченных. Кроме того, этот слой может отрисовывать линии пересечения граней ячеек расчетной сетки нулевого уровня с твердыми телами.

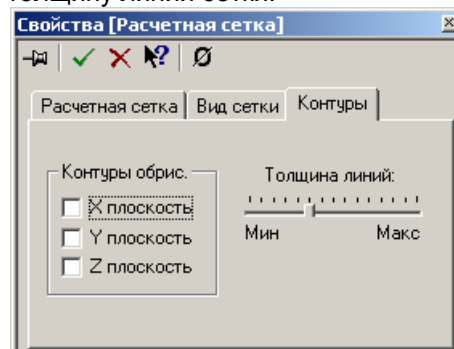
Базовые объекты**Всё пространство**Свойства слоя



- Уровни сетки** – группа элементов управления, ответственная за отображение ребер ячеек. Если установлена галочка в поле **Показать линии сетки**, то ребра ячеек отображаются на экране в виде белых неосвещаемых прямых линий. Если галочка не установлена, то все остальные элементы управления этой группы неактивны. Нажатие кнопки **Показать все** приводит к отрисовке ребер всех ячеек, как нулевого уровня, так и локально измельченных. Редактируемое поле **1-й уров.** позволяет выбрать уровень ячеек расчетной сетки, начиная с которого ячейки будут видимы на экране. Редактируемое поле **Число уровней** позволяет задать число уровней сетки, видимых на экране. Если в поле введен 0, то выводятся все уровни, начиная с уровня, установленного в поле **1-й уров.**
- Диапазон сетки** – группа элементов управления, позволяющая построить лишь некоторый ограниченный диапазон ячеек сетки. Для этого следует ввести требующиеся номера начальных интервалов сетки по трём направлениям в полях **1-я ячейка / X, Y, Z** и количества интервалов в полях **Кол-во / X, Y, Z**. Если в поле количества введен 0, то строятся все интервалы, начиная с интервала, заданного в соответствующем поле **1-я ячейка**.
- Сжать ячейку на XXX%** – ячейки будут отображены не в натуральную величину, а с уменьшенными до XXX процентов линейными размерами. XXX могут принимать значения от 1 до 100%. При этом центр ячейки остается на месте.



- Цвет линий** – определяет цвет линий сетки.
- Выделение** – определяет цвет выбранной в редакторе сетки линии.
- Толщина линий** – определяет толщину линий сетки.

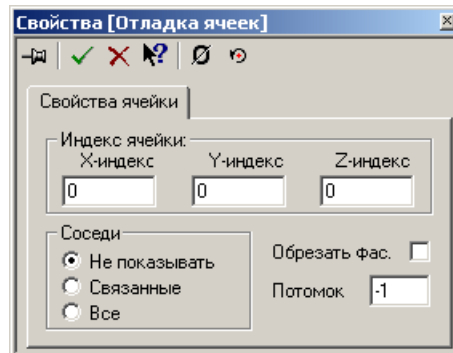


- Контур обрис.** – группа элементов управления, определяющая набор плоскостей, линии пересечения с которыми должны выводиться на экран. Если стоит галочка в поле **X плоскость**, то отображаются линии пересечения граней ячеек, перпендикулярных оси X с твердыми телами. Все три поля этой группы независимы друг от друга.
- Толщина линий** – определяет толщину линий контуров пересечения граней ячеек с твердыми телами.

2.4.6.3.4 Отладка ячеек

Базовые объекты
Всё пространство
Плоскость

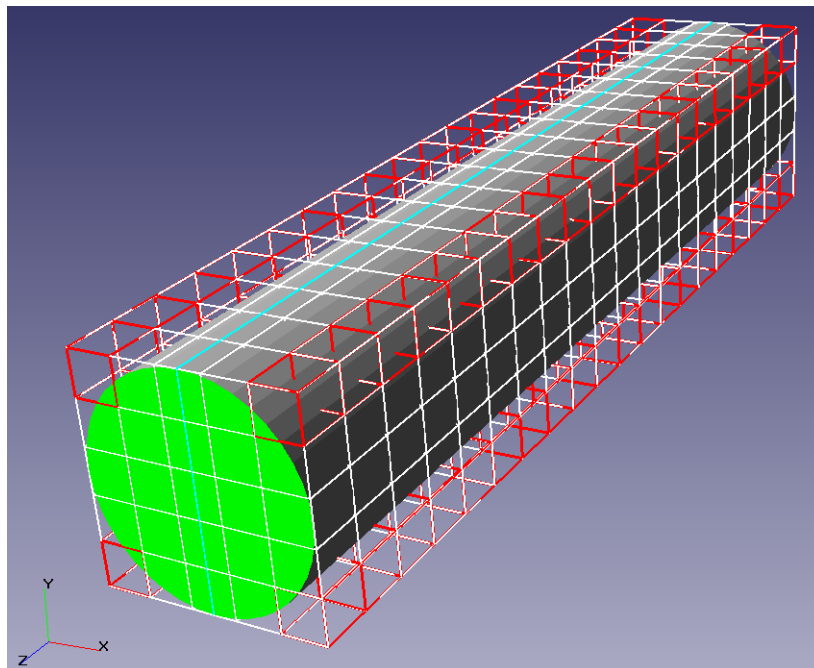
Свойства слоя



Этот слой предназначен для просмотра геометрических и расчетных параметров ячейки. Задаются индексы ячейки и ее порядковый номер в родительской ячейке.

- Параметры выводятся в окна **Индекс ячейки** и **Потомок**. В случае, если базовый объект – плоскость, ручной ввод индексов ячейки заблокирован и просматривается та ячейка, в которую попадает центр плоскости.
- Флаг **Обрезать фас.** позволяет обрезать фасетки, попавшие в данную ячейку, границами ячейки.
- **Соседи** – эта группа кнопок предлагает 3 режима отображения соседних с выбранной ячеек:
 - **Не показывать** – не показывать;
 - **Связанные** – показывать только соседние ячейки, содержащие фасетки, на которых задано связанное граничное условие;
 - **Все** – показывать все соседние ячейки.

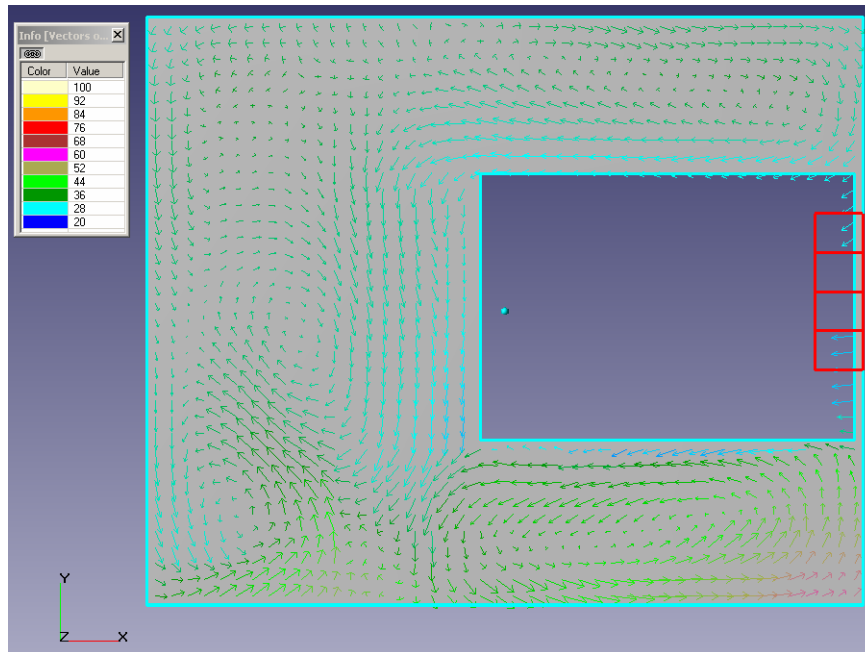
2.4.6.3.5 Набор ячеек



На рисунке представлена расчетная сетка, где красным цветом показаны «маленькие» ячейки (точнее исходные ячейки, из которых путем отсечения поверхностью расчетной области образованы «маленькие» ячейки).

Существует класс задач, в которых удаление «маленьких» ячеек может приводить к нефизичным явлениям в решении.

На рисунке ниже показан пример такой задачи – течение в области с узким каналом. Красным цветом показаны «плохие маленькие» ячейки. В этом примере канал оказывается полностью перекрыт «плохими маленькими» ячейками, что приводит к неверному решению. Использование слоя визуализации **Маленькие ячейки** позволяет контролировать возникновение таких ситуаций.



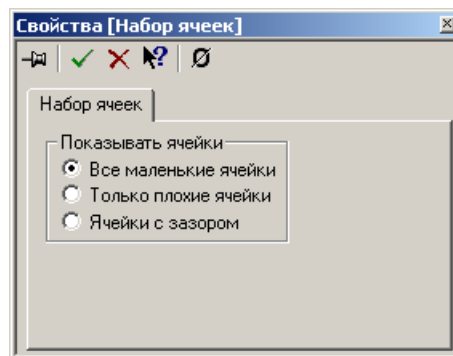
Течение в области с узким каналом.

Существуют два способа устранения проблем, связанным с удалением маленьких ячеек: Подробное разрешение сетки в тех областях, где образуются «маленькие» ячейки. С этой целью можно использовать [адаптацию](#). Не удалять «маленькие» ячейки. Этот способ подробно описан в разделе [Опции процесса расчета](#).

Базовые объекты

Всё пространство

Свойства слоя



Этот слой предназначен для просмотра «маленьких» ячеек и ячеек, в которых используется модель зазора (см. том [Теория](#)). «Маленькими» считаются те ячейки, объем которых меньше 20% исходного объема ячейки.

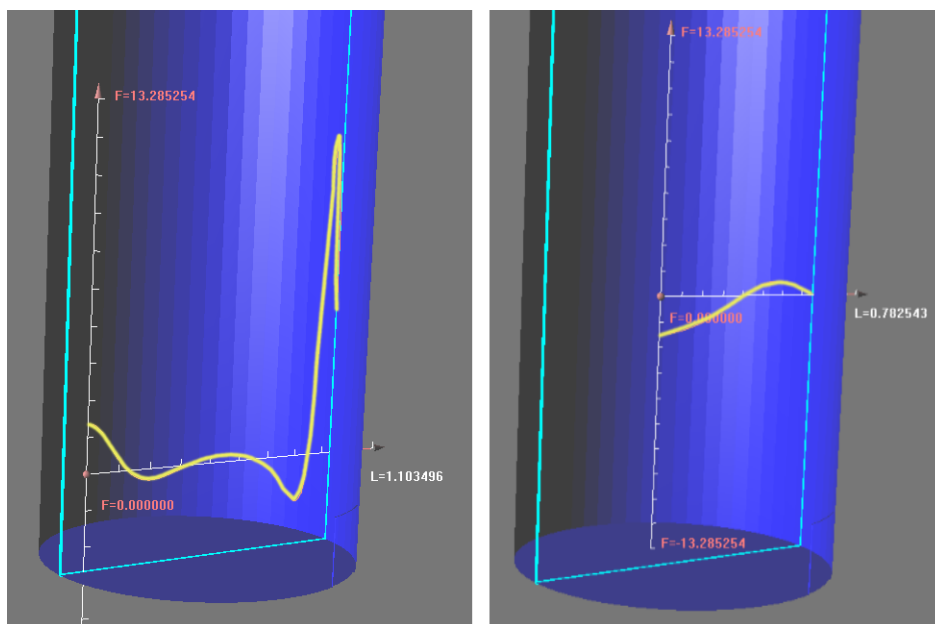
2.4.6.4 Статические слои

Группа статистических слоев объединяет слои, для которых требуются расчетные данные, т.е. требуется указывать расчетную переменную. Эти слои не содержат анимацию.

К статическим слоям относятся следующие:

- [Двумерный график](#)
- [График вдоль кривой](#)
- [График по окружности](#)
- [Распределенные характеристики](#)
- [Характеристики](#)
- [Вектора](#)
- [Изолинии](#)
- [Заливка](#)
- [Изоповерхность](#)

2.4.6.4.1 Двумерный график



Цилиндрический вихревой смеситель. График вдоль луча.

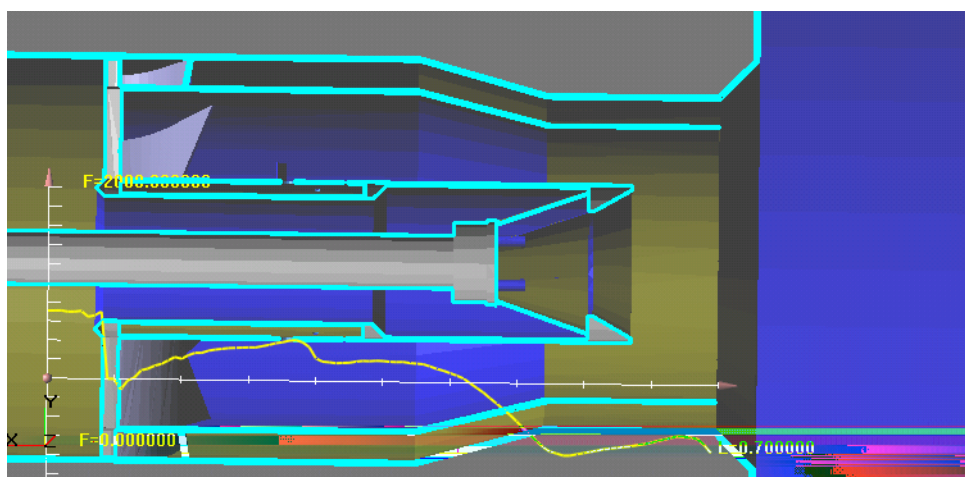


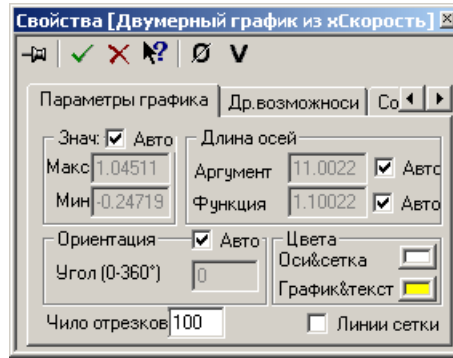
График давления вдоль главного канала газовой горелки.

Слой **Двумерный график** выводит на экран график скалярной переменной вдоль выбранного в трехмерном пространстве луча. График лежит в плоскости, которая также задается. Начало луча совпадает с центром базового объекта. График отображается как неосвещенная ломаная с фиксированным числом звеньев. В начале графика расположен маленький освещенный шарик, а на положительных концах осей – маленькие освещенные конусы. В плоскости графика отрисовываются следующие комментарии:

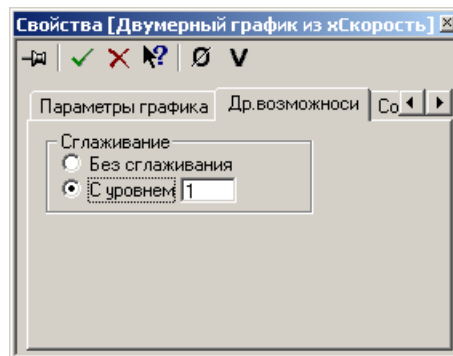
- Длина оси абсцисс около положительного конца оси абсцисс.
- Максимальное значение переменной около положительного конца оси ординат.
- Минимальное значение переменной около отрицательного конца оси ординат.

Кроме того, в зависимости от установленных свойств в плоскости графика могут отрисовываться координатные линии по 10 параллельно каждой из осей.

Базовые объекты**Линия****Плоскость**Базовые переменные**Скалярные**Свойства слоя



- **Знач.** – Значения переменной. Градуирует ось ординат. Поле **Макс** задает значение переменной на положительном конце оси ординат, а поле **Мин** – на отрицательном. Если установлен флажок **Авто**, то поля **Мин** и **Макс** инициализируются минимальным и максимальным значением переменной по всей расчетной области.
- **Длина осей** – редактируемые поля **Аргумент** и **Функция** фиксируют длины осей абсцисс и ординат соответственно. Каждое из полей разрешено для ввода только в том случае, если рядом с ним не стоит флажок **Авто**. Если флажок **Авто** установлен, длина оси выбирается автоматически так, чтобы положительный конец оси лежал на границе расчетной области.
- **Ориентация** – в зависимости от базового объекта значение угла в поле **Угол (0-360°)** определяет ориентацию плоскости графика в пространстве при фиксированной прямой (базовый объект – линия) или ориентацию луча на плоскости при фиксированной плоскости (базовый объект – плоскость). Если установлена галочка в поле **Авто**, ориентация выбирается так, чтобы график выглядел на экране наилучшим образом.
- **Цвета**: цветное поле **Оси&сетка** задает цвет осей графика и координатных линий, цветное поле **График&текст** задает цвет графика и надписей на графике.
- **Число отрезков** – число отрезков, из которого состоит линия графика.
- Если установлен флажок **Линии сетки**, в плоскости графика отрисуются по 10 равноотстоящих координатных линий по каждой из координат.



- **Сглаживание**: если выбрана кнопка **с уровнем XXX**, то значение каждой точки графика вычисляется как взвешенное среднее из $2 \cdot XXX + 1$ значений соседних с ней точек. В противном случае в каждой точке графика отображается реальное значение величины. Этот режим включен по умолчанию.

Интерактивная настройка параметров

Действие №1: Если базовый объект – плоскость, то действие вызывает вращение линии графика в этой плоскости. Если базовый объект – линия, то действие вызывает вращение плоскости графика относительно этой линии. В обоих случаях действие меняет значение в поле **Угол (0-360°)** страницы **Параметры графика**. Если рядом с полем **Угол (0-360°)** выставлен флажок **Авто**, то действие не вызывает в графике никаких изменений.

Запись в файл

При каждой записи в файл записывается 5 последовательностей чисел, каждая в отдельной строке: координата по оси абсцисс графика, значение переменной в этой точке, значение координаты x в этой точке, значение координаты y в этой точке, значение координаты z в этой точке.

2.4.6.4.2 График вдоль кривой

Слой **График вдоль кривой** выводит на экран график скалярной переменной вдоль заданной кривой. Кривая задается как участок замкнутого контура, образующегося при пересечении твердого тела с объектом-плоскостью. Таким образом, базовым объектом для этого слоя является плоскость. Плоская кривая, на которой строится график, может быть произвольной сложности, следовательно, функция, представленная на графике, может быть неоднозначной. График отображается как неосвещенная ломаная линия. В начале графика расположен маленький освещенный шарик, а на положительных концах осей – маленькие освещенные конусы. В плоскости графика отрисовываются следующие комментарии:

- Длина оси абсцисс около положительного конца оси абсцисс.
- Максимальное значение переменной около положительного конца оси ординат.
- Минимальное значение переменной около отрицательного конца оси ординат.

Кроме того, в зависимости от установленных свойств в плоскости графика могут отрисовываться координатные линии по 10 параллельно каждой из осей.

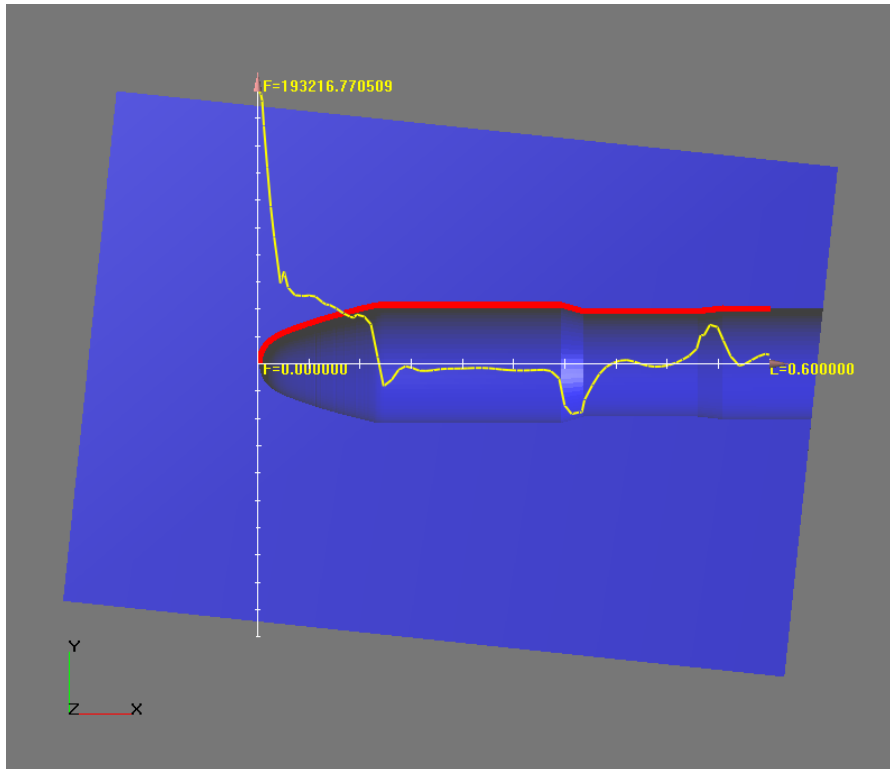


График распределения давления на поверхности ракеты-носителя.

Выбор кривой производится следующим образом:

- При пересечении объекта-плоскости с твердыми телами образуется один или несколько замкнутых контуров. Если у объекта-плоскости стоит флажок **На виду**, то эти контуры видны на экране.
- Получившиеся замкнутые контуры отсекаются тремя полуплоскостями: $X < 0$, $Y < 0$ и $X > X_{\max}$, X и Y – координаты в плоскости, определяемые расположением осей графика, а X_{\max} – длина оси абсцисс. В результате получается один или несколько связанных кривых. График может быть построен на любой из них. Выбор кривой производится в окне свойств графика, в странице **Кривая**.

При создании нового слоя График Вдоль Кривой перед выбором кривой необходимо нажать кнопку панели инструментов. Иначе страница **Кривая** не будет инициализирована. При дальнейшем редактировании слоя эта страница будет автоматически обновляться при необходимости.

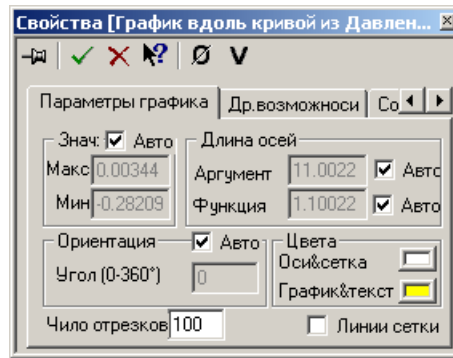
Базовые объекты

Плоскость

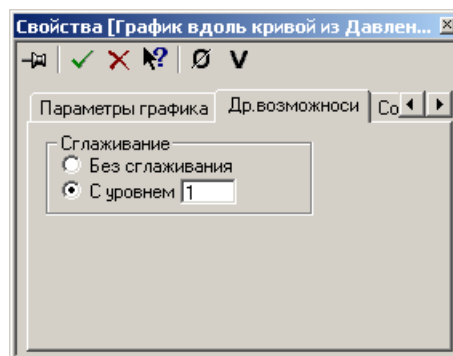
Базовые переменные

Скалярные

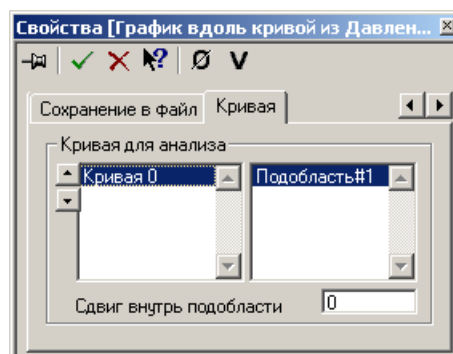
Свойства слоя



- **Знач.** – градуирует ось ординат. Поле **Макс** задает значение переменной на положительном конце оси ординат, а поле **Мин** – на отрицательном. Если установлен флажок **Авто**, то поля **Мин** и **Макс** инициализируются минимальным и максимальным значением переменной по всей расчетной области.
- **Длина осей** – редактируемые поля **Аргумент** и **Функция** фиксируют длины осей абсцисс и ординат соответственно. Каждое из полей разрешено для ввода только в том случае, если рядом с ним не стоит флажок **Авто**. Если флажок **Авто** установлен, длина оси выбирается автоматически так, чтобы положительный конец оси лежал на границе расчетной области.
- **Ориентация** – значение угла в поле **Угол (0-360°)** определяет ориентацию луча на плоскости. Если установлена галочка в поле **Авто**, ориентация выбирается так, чтобы график выглядел на экране наилучшим образом.
- **Цвета**: цветовое поле **Оси&сетка** задает цвет осей графика и координатных линий, цветовое поле **График&текст** задает цвет графика и надписей на графике.
- **Число отрезков** – число отрезков, из которого состоит линия графика.
- Если установлен флажок **Линии сетки**, в плоскости графика отрисовываются по 10 равноотстоящих координатных линий по каждой из координат.



- **Сглаживание**: если выбрана кнопка **с уровнем XXX**, то значение каждой точки графика вычисляется как взвешенное среднее из $2 \cdot XXX + 1$ значений соседних с ней точек. В противном случае в каждой точке графика отображается реальное значение величины. Этот режим включен по умолчанию.



- **Кривая для анализа** служит для задания кривой, вдоль которой строится график. Для выбора кривой необходимо выделить строку, соответствующую ей в левом списке. При этом кривая будет высвечена красным цветом в графическом окне. Выделять строку в списке можно как нажатием мыши на нее, так и с помощью элемента управления **spin**, расположенного слева от списка. В правый список выводятся расчетные подобласти, граничащие с кривой. График может быть построен только для одной подобласти, той, что подсвечена в правом списке.
- **Сдвиг внутрь подобласти** позволяет строить значения выбранной переменной не на самой кривой,

лежащей на поверхности, а на заданном расстоянии от нее, отсчитываемом от поверхности вглубь расчетной области.

Интерактивная настройка параметров

Действие №1: Действие вызывает вращение осей графика в плоскости. Действие меняет значение в поле **Угол (0-360°)** страницы **Параметры графика**. Если рядом с полем **Угол (0-360°)** выставлен флаг **Авто**, то действие не вызывает в графике никаких изменений.

Запись в файл

При каждой записи в файл записывается 5 последовательностей чисел, каждая в отдельной строке: длина участка кривой от ее начала (собственный параметр кривой), значение переменной в этой точке, значение координаты x в этой точке, значение координаты y в этой точке, значение координаты z в этой точке.

2.4.6.4.3 График вдоль окружности

Слой **График вдоль окружности** выводит на экран график скалярной переменной вдоль выбранной в трехмерном пространстве окружности. График лежит в плоскости, которая является его базовым объектом. Центр окружности совпадает с центром плоскости. График отображается как неосвещенная ломаная с переменным числом звеньев. В центре окружности расположен маленький освещенный шарик, а на положительном конце оси ординат – маленький освещенный конус. Около него выводится максимальное значение переменной.

Кроме того, в зависимости от установленных свойств могут отрисовываться координатные линии, перпендикулярные выбранной окружности и координатные окружности, параллельные ей.

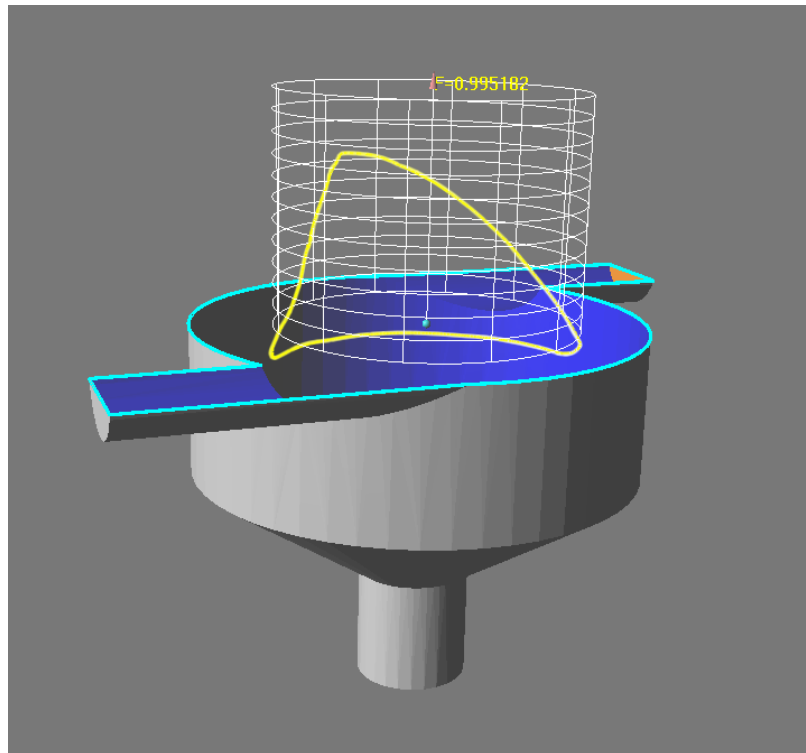


График вдоль окружности концентрации газа в смесителе. Вдув газа производится только через левый вход.

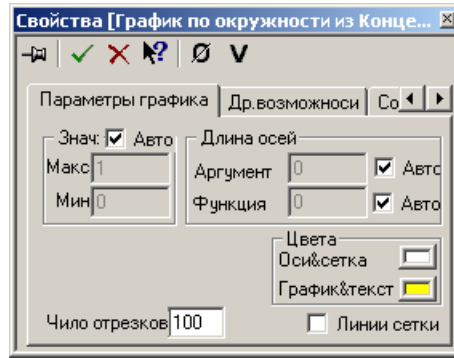
Базовые объекты

Плоскость

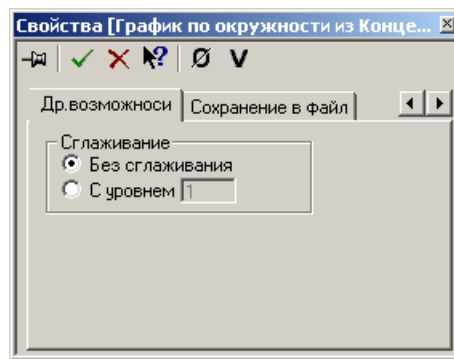
Базовые переменные

Скалярные

Свойства слоя



- **Знач.** – градуирует ось ординат. Поле **Макс** задает значение переменной на положительном конце оси ординат, а поле **Мин** – на отрицательном. Если установлен флажок **Авто**, то поля **Мин** и **Макс** инициализируются минимальным и максимальным значением переменной по всей расчетной области.
- **Длина осей** – редактируемые поля **Аргумент** и **Функция** фиксируют радиус окружности и длину оси ординат соответственно. Каждое из полей разрешено для ввода только в том случае, если рядом с ним не стоит флажок **Авто**. Если флажок **Авто** установлен, размер выбирается автоматически.
- **Цвета**: цветовое поле **Оси&сетка** задает цвет осей графика и координатных линий, цветовое поле **График&текст** задает цвет графика и надписей на графике.
- **Число отрезков** – число отрезков, из которого состоит линия графика.
- Если установлен флажок **Линии сетки**, отрисуются 10 равноотстоящих окружностей, параллельных плоскости графика и 10 равноотстоящих координатных линий параллельно оси ординат.
- **Сглаживание**: если выбрана кнопка **с уровнем XXX**, то значение каждой точки графика вычисляется как взвешенное среднее из $2 \cdot XXX + 1$ значений соседних с ней точек. В противном случае в каждой точке графика отображается реальное значение величины. Этот режим включен по умолчанию.



Запись в файл

При каждой записи в файл записывается 5 последовательностей чисел, каждая в отдельной строке: значение угла от 0 до 360 градусов, значение переменной в этой точке, значение координаты x в этой точке, значение координаты y в этой точке, значение координаты z в этой точке.

2.4.6.4.4 Распределенные характеристики

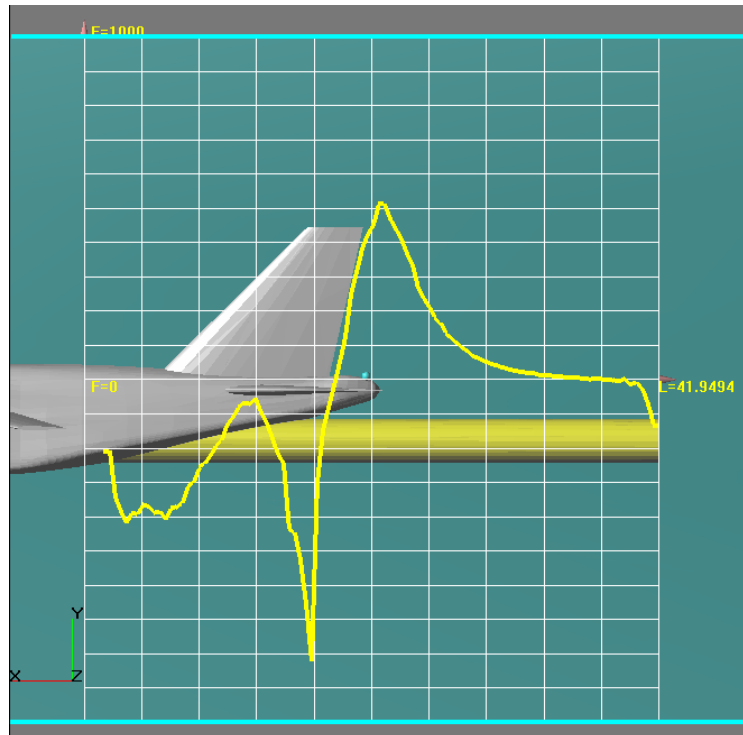
Слой **Распределенные характеристики** представляет собой график вдоль линии P одной из компонент следующего контурного интеграла

$$F = \int_L f(l) \mathbf{n}(l) dl$$

Здесь

L – контур, образованный путем пересечения плоскости, перпендикулярной линии P , и некоторой поверхности твердого тела S ;

\mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности S , направленный внутрь твердого тела.



Распределенные характеристики давления вдоль оси цилиндрического тела.

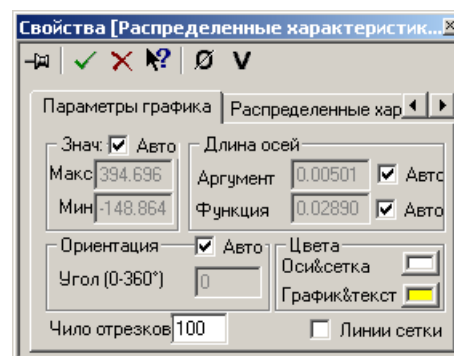
Базовые объекты

Линия

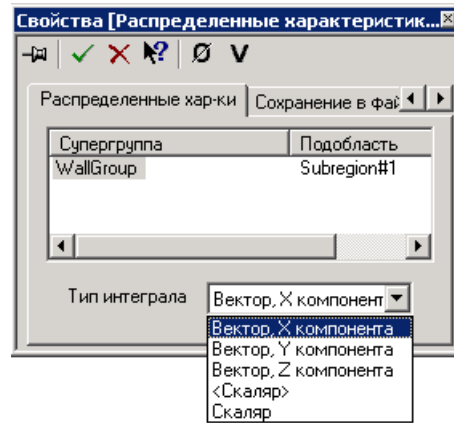
Базовые переменные

Скалярные

Свойства слоя



- **Знач.** – градуирует ось ординат. Поле **Макс** задает значение переменной на положительном конце оси ординат, а поле **Мин** – на отрицательном. Если установлен флажок **Авто**, то поля **Мин** и **Макс** инициализируются минимальным и максимальным значением переменной по всей расчетной области.
- Поле **Функция** фиксирует длину оси ординат. Поле разрешено для ввода только в том случае, если рядом с ним не стоит флажок **Авто**. Если флажок **Авто** установлен, длина оси выбирается автоматически так, чтобы положительный конец оси лежал на границе расчетной области. Длина оси абсцисс всегда выбирается автоматически.
- **Ориентация** – значение угла в поле **Угол (0-360°)** определяет ориентацию плоскости графика в пространстве. Если установлена галочка в поле **Авто**, ориентация выбирается так, чтобы график выглядел на экране наилучшим образом.
- **Цвета**: цветовое поле **Оси&сетка** задает цвет осей графика и координатных линий, цветовое поле **График&текст** задает цвет графика и надписей на графике.
- **Число отрезков** – число отрезков, из которого состоит линия графика. Также это количество сечений, в которых производится интегрирование.
- Если установлен флажок **Линии сетки**, в плоскости графика отрисуются по 10 равноотстоящих координатных линий по каждой из координат.



- В колонке **Супергруппа** следует выбрать соответствующую поверхность.
- Компонента контурного интеграла **F** задается по направлениям X, Y или Z.
- В случае выбора опции <Скаляр> распределенные характеристики вычисляются таким образом:

$$F = \frac{1}{L} \oint_L f(l) dl$$

- В случае выбора опции Скаляр распределенные характеристики вычисляются таким образом:

$$F = \oint_L f(l) dl$$

Запись в файл

При каждой записи в файл записывается 5 последовательностей чисел, каждая в отдельной строке: координата по оси абсцисс, значение интеграла в этой точке, значение координаты x в этой точке, значение координаты y в этой точке, значение координаты z в этой точке.

2.4.6.4.5 Характеристики

Слой **Характеристики** предоставляет доступ к информации об интегральных значениях переменной, а также ее значению в точке (только для объекта **Плоскость**). Информация выводится в окно **Инфо** и зависит как от базового объекта, так и типа переменной.

Базовые объекты

Всё пространство

Плоскость

Объект, полученный из супергруппы

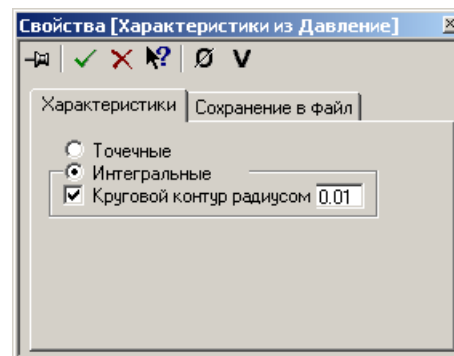
Базовые переменные

Скалярные

Векторные

Свойства слоя

1. В случае, если слой построен на объекте **Всё пространство**, для него доступны только параметры сохранения в файл.
2. В случае, если слой построен на объекте **Плоскость**, он имеет следующие свойства:

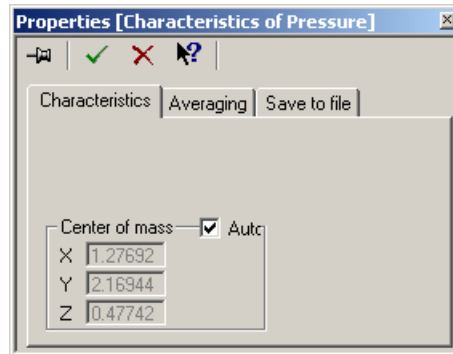


- Если выбрано поле **Точечные**, то в окно **Инфо** выводится локальные значения переменной. В этом случае поле **Круговой контур радиусом** неактивно.
- Если выбрано поле **Интегральные**, то интегральные характеристики могут вычисляться двумя

способами:

- если в поле **Круговой контур радиусом** не стоит галочки, то интегральные характеристики вычисляются по той части плоскости, которая содержит центр плоскости и ограничена контуром, образованным пересечением плоскости и геометрии подобласти;
- если в поле **Круговой контур радиусом** стоит галочка и в поле **XXX** введено положительное число, то интегральные характеристики вычисляются по той части области из предыдущего случая, которая содержится внутри круга, образованного из центра плоскости и с радиусом из поля **XXX**. При этом в плоскости рисуется круг отсечения.

3. В случае, если базовый объект получен **из супергруппы**, слой имеет следующие свойства:



- **Центр масс:** задает точку, относительно которой будут рассчитываться моменты. Если включена кнопка **Авто**, то расчет будет производиться относительно центра расчетной области. В противном случае точка задается вручную. Ее координаты определяются полями X, Y и Z.

Окно Инфо

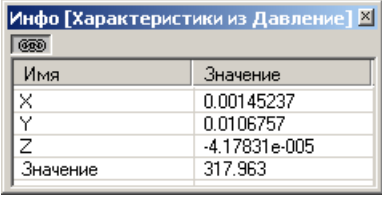
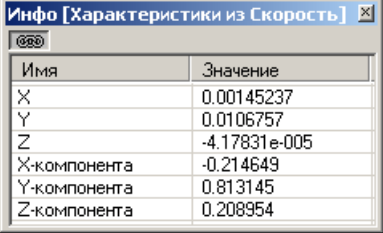
1. Для объекта **Все пространство** окно **Инфо** выглядит следующим образом:

Name	Value
Subregion	SubRegion#1
<f> by volume	1
Volume	42
<f> * Volume	42
Maximum	1
X	-3.64656
Y	1.1949
Z	-0.75005
I	101
J	32
K	2
Index	1
Minimum	1
X	-3.64656
Y	1.1949
Z	-0.75005
I	101
J	32
K	2
Index	1

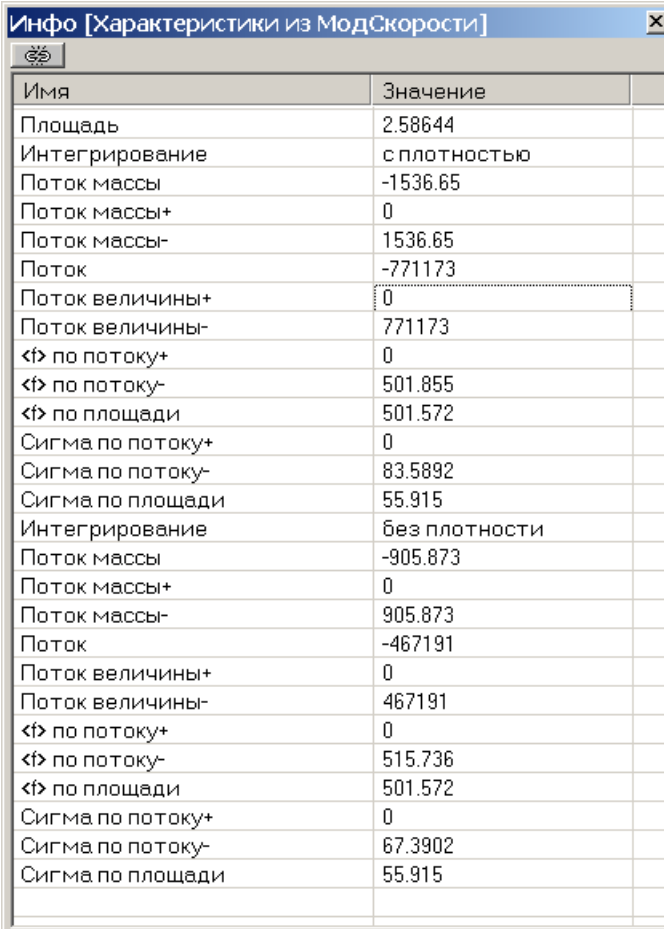
- Имя расчетной подобласти указано в строке **Подобласть**.
- Среднее интегральное значение переменной приведено в строке **<f> по объему**.
- Объем расчетной подобласти указан в строке **Объем**.
- Максимальное и минимальное значения приведены в строках **Максимум** и **Минимум** соответственно.
- Координаты точек максимума и минимума указаны в строках **X**, **Y** и **Z**.
- Индексы ячеек, в которых достигаются максимум и минимум, указаны в строках **I**, **J**, **K** и **Index**.

2. Для **Плоскость** окно **Инфо**

- **локальных** значений выглядит следующим образом:

для скалярной переменной:	для векторной переменной:
	
<ul style="list-style-type: none"> • Координаты точки, в которой вычисляется значение переменной, указаны в строках X, Y и Z. • Значение переменной приведено в строке Значение. 	<ul style="list-style-type: none"> • Координаты точки, в которой вычисляется значение переменной, указаны в строках X, Y и Z. • Компоненты вектора приведены в строках X-, Y- и Z-компонента.

- *интегральных* значений выглядит следующим образом (одинаково для скалярных и векторных переменных):



- Величина площади *S*, по которой проводится вычисление, приведено в строке **Площадь**.
- Группа параметров **Интегрирование с плотностью**:
- В строке **Поток массы** приведена величина массового конвективного потока, определённого как $\int_S \rho V_n ds$.
- В строке **Поток массы+** приведена величина массового положительного конвективного потока, определённого как $\int_S \rho V_n^+ ds$.
- В строке **Поток массы-** приведена величина массового отрицательного конвективного потока, определённого как $\int_S \rho V_n^- ds$.

- В строке **Поток** приведен массовый поток скалярной переменной f , определённый как $\int_S \rho V_n f ds$.
- В строке **Поток величины+** приведен положительный массовый поток скалярной переменной f ,

$$\int_S \rho V_n^+ f ds$$

определённый как S .

- В строке **Поток величины -** приведен отрицательный массовый поток скалярной переменной f ,

$$\int_S \rho V_n^- f ds$$

определённый как S .

- В строке **<f> по потоку** приведена усредненная по потоку величина скалярной переменной f ,

$$\bar{f}_F = \frac{\int_S \rho V_n f ds}{\int_S \rho V_n ds}$$

определённая как

- В строке **<f> по площади** приведена усредненная по площади величина скалярной переменной f ,

$$\bar{f}_S = \frac{1}{S} \int_S f ds$$

определённая как

- В строке **Сигма по потоку** приведено усредненное по потоку квадратичное отклонение скалярной

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{\int_S (f - \bar{f}_F)^2 \rho V_n ds}{\int_S \rho V_n ds}}$$

переменной f , определённая как

- В строке **Сигма по площади** приведено усредненное по площади квадратичное отклонение скалярной

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{\int_S (f - \bar{f}_F)^2 ds}{S}}$$

переменной f , определённое как

- Группа параметров **Интегрирование без плотности:**
- В строке **Поток массы** приведена величина объемного конвективного потока, определённого как

$$\int_S V_n ds$$

- В строке **Поток массы+** приведена величина положительного объемного конвективного потока,

$$\int_S V_n^+ ds$$

определённого как S .

- В строке **Поток массы-** приведена величина отрицательного объемного конвективного потока,

$$\int_S V_n^- ds$$

определённого как S .

- В строке **Поток** приведен объемный поток скалярной переменной f , определённый как $\int_S V_n f ds$.
- В строке **Поток величины+** приведен положительный объемный поток скалярной переменной f ,

$$\int_S V_n^+ f ds$$

определённый как S .

- В строке **Поток величины -** приведен отрицательный объемный поток скалярной переменной f ,

$$\int_S V_n^- f ds$$

определённый как S .

- В строке **<f> по потоку** приведена усредненная по потоку величина скалярной переменной f ,

$$\bar{f}_F = \frac{\int_S V_n f ds}{\int_S V_n ds}$$

определённая как

- В строке **<f> по площади** приведена усредненная по площади величина скалярной переменной f ,

$$\bar{f}_S = \frac{1}{S} \int_S f ds$$

определённая как

- В строке **Сигма по потоку** приведено усредненное по потоку квадратичное отклонение скалярной

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{\int_S (f - \bar{f}_F)^2 V_n ds}{\int_S V_n ds}}$$

переменной f , определённое как

- В строке **Сигма по площади** приведено осредненное по площади квадратичное отклонение скалярной

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{\int_S (f - \bar{f}_F)^2 ds}{S}}$$

переменной f , определённое как

- Для **Объекта**, полученного из супергруппы окно **Инфо** выглядит следующим образом:

- для всех переменных, *кроме давления*

Имя	Значение
Поток массы	0
ИнтегралX	5.96443e-006
ИнтегралY	7.04601e-007
ИнтегралZ	3.63223e-006
Площадь	0.000313683
<f> по площади	1.23212
Интеграл	0.000386496

- В строке **Поток массы** приведена величина конвективного потока через поверхность, то есть

$$\int_S \rho V_n ds$$

- В строках **ИнтегралX**, **ИнтегралY**, **ИнтегралZ** приведены x, y, z компоненты следующего

$$\bar{I} = - \int_S f n ds$$

интеграла

- В строке **<f> по площади** приведена осредненная по площади величина скалярной переменной f ,

$$\bar{f}_S = \frac{1}{S} \int_S f ds$$

то есть

$$I = - \int_S f ds$$

- В строке **Интеграл** приведена следующая величина:

- для *давления*

Имя	Значение
Поток массы	0
ИнтегралX	0.00115846
ИнтегралY	7.62053e-006
ИнтегралZ	-0.000472202
СилаСТрениемX	0.00115749
СилаСТрениемY	0.000391468
СилаСТрениемZ	-0.000462774
ОбщаяПлощадь	0.000313683
ТочкаПриложенияМоментaX	1.60475e-015
ТочкаПриложенияМоментaY	0.0349985
ТочкаПриложенияМоментaZ	2.1078e-016
МоментX	1.4364e-006
МоментY	-8.89595e-007
МоментZ	2.71926e-006
МоментБезТренияX	1.41818e-006
МоментБезТренияY	2.7401e-009
МоментБезТренияZ	2.68811e-006
Площадь	0.000313683
<f> по площади	-6.17388
Интеграл	-0.00193664

- В строке **Поток массы** приведена величина конвективного потока через поверхность, то есть

$$\int_S \rho V_n ds$$

- В строках **ИнтегралX**, **ИнтегралY**, **ИнтегралZ** приведены x, y, z компоненты силы, действующей на

$$\vec{F} = - \int_S P \vec{n} ds$$

объект. Сила вычисляется по формуле

- В строках **СилаСТрениемX**, **СилаСТрениемY**, **СилаСТрениемZ** приведены x, y, z компоненты силы, действующей на объект с учетом силы трения. Сила вычисляется по формуле

$$\vec{F}_{\text{ф}} = - \int_S P \vec{n} ds + \int_S \mu \frac{\partial \vec{V}_x}{\partial n} ds$$

- В строке **Общая площадь** приведена площадь всех фасеток, входящих в супергруппу.
- В строках **ТочкаПриложенияМоментaX**, **ТочкаПриложенияМоментaY**, **ТочкаПриложенияМоментaZ** приведены x, y, z координаты точки относительно которой рассчитывается момент сил, действующих на объект.
- В строках **МоментX**, **МоментY**, **МоментZ** приведены x, y, z компоненты момента сил **M**,

$$\vec{M} = - \int_S \vec{r} \times d\vec{F}_{\text{ф}}$$

действующих на объект с учетом сил трения. Момент вычисляется по формуле

- В строках **МоментБезТренияX**, **МоментБезТренияY**, **МоментБезТренияZ** приведены x, y, z компоненты момента сил **M**, действующих на объект без учета сил трения. Момент вычисляется по

$$\vec{M} = - \int_S \vec{r} \times d\vec{F}$$

формуле

- В строке **Площадь** приведена величина площади S, по которой проводится вычисление.

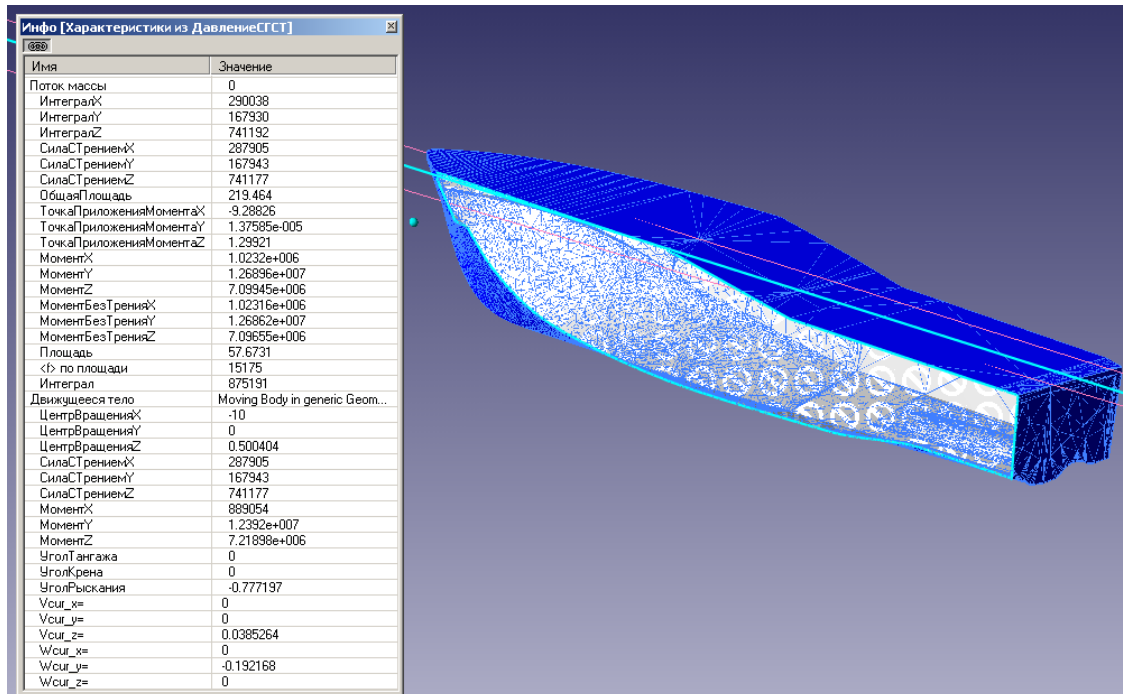
$$\bar{P}_s = \frac{1}{S} \int_S P ds$$

- В строке **<f> по площади** приведено давление, осредненное по площади, то есть

$$I = - \int_S P ds$$

- В строке **Интеграл** приведена следующая величина:

В большинстве задач значения в **Площадь** и **Общая площадь** совпадают, но существует класс задач, где эти значения различаются. Например, в задачах со свободной поверхностью (моделирование движения кораблей) при построении слоя **Характеристики** на поверхности корабля расчет характеристик будет проводиться только по площади, находящейся в воде.



Запись в файл

При каждой записи в файл записываются все данные, присутствующие в окне **Инфо**.

Следует также обратить внимание на то, что при просмотре расхода жидкости в различных сечениях с помощью данного слоя визуализации возможны расхождения значений расхода. Это может быть вызвано несколькими причинами:

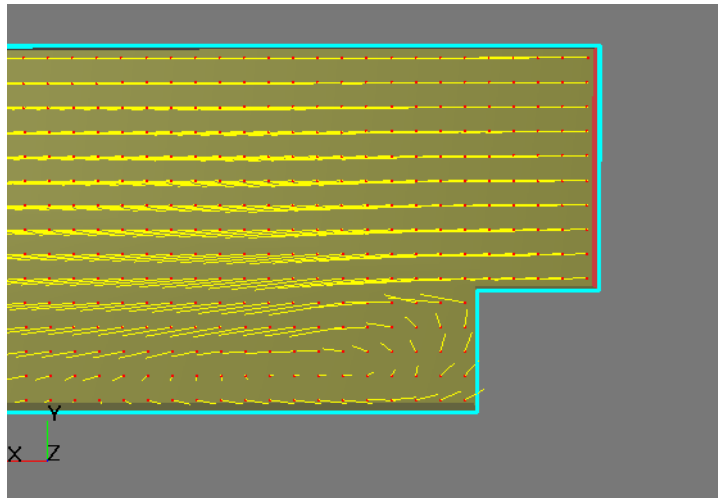
- недостаточная точность сходимости итераций по давлению. По умолчанию этот параметр равен 0.01,

это значение можно изменить в [параметрах метода расчета](#).

- вносится погрешность вычисления расхода за счет удаления [«маленьких» ячеек](#). В этом случае, если погрешность вычисления расхода оказывается существенной для решения задачи, можно отключить опцию удаления «маленьких» ячеек. При этом для продолжения расчета следует уменьшить [шаг по времени](#), задав CFL=1, просчитать несколько итераций, затем шаг по времени можно снова увеличить. Эта процедура необходима для того, чтобы уменьшить возможные возмущения, вносимые в решение «маленькими» ячейками.
- Точность вычисления интегральных характеристик в **Плоскости** зависит от расчетной сетки (чем сетка грубее, тем ниже точность), поэтому рекомендуется использовать интегральные характеристики на **Объекте, полученном из супергруппы** (для этого объекта точность вычисления интегральных характеристик от расчетной сетки практически не зависит).

2.4.6.4.6 Вектора

Слой **Вектора** служит для визуализации векторного поля. Слой является неосвещаемым. Он выглядит как множество точек-начал векторов с выходящими из них отрезками. Направление отрезка совпадает с направлением векторного поля в начале отрезка, а длина пропорциональна модулю поля в этой точке. На плоскости начала векторов расположены в узлах равномерной прямоугольной сетки.



Вектора на плоскости. Возвратная зона за обратным уступом.

Базовые объекты

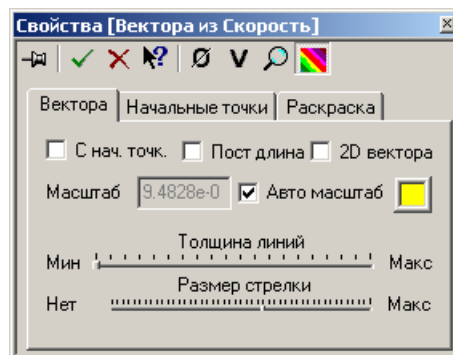
Плоскость

Объект, полученный из супергруппы

Базовые переменные

Векторные

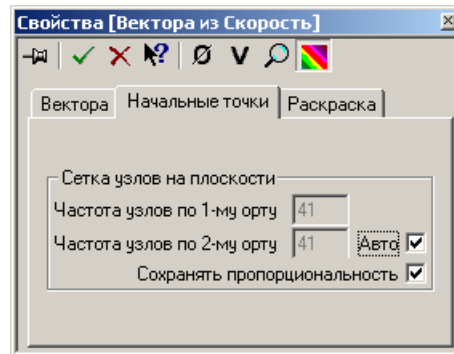
Свойства слоя



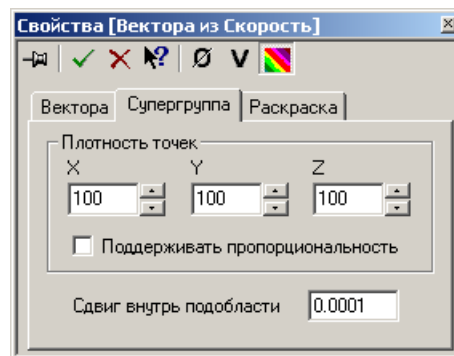
- Поле **Масштаб** определяет коэффициент пропорциональности между значением модуля переменной и длиной отрезка в трехмерном пространстве. Если значение коэффициента равно 1, то длина отрезка, изображающего вектор с наибольшим в расчетной области модулем будет равна расстоянию между соседними узлами сетки на плоскости. Если установлен флаг **Авто масштаб**, то значение коэффициента принимается равным 1.
- Цветное поле определяет цвет отрезков, изображающих вектора.
- **Толщина линий** – толщина линий стрелок векторов. Крайнее левое положение дает самые тонкие стрелки с отключенным сглаживанием ступенчатости. Остальные положения дают линии с

устранением ступенчатости (*antialiasing*).

- **Размер стрелки** – длина двух отходящих от конца вектора линий, образующих стрелку. **Нет** – стрелка отсутствует, **Макс** – большая стрелка.
- **С нач. точк.** – если этот флаг проставлен, то в точки, в которых меряется значение векторного поля, помещаются маленькие красные кружочки.



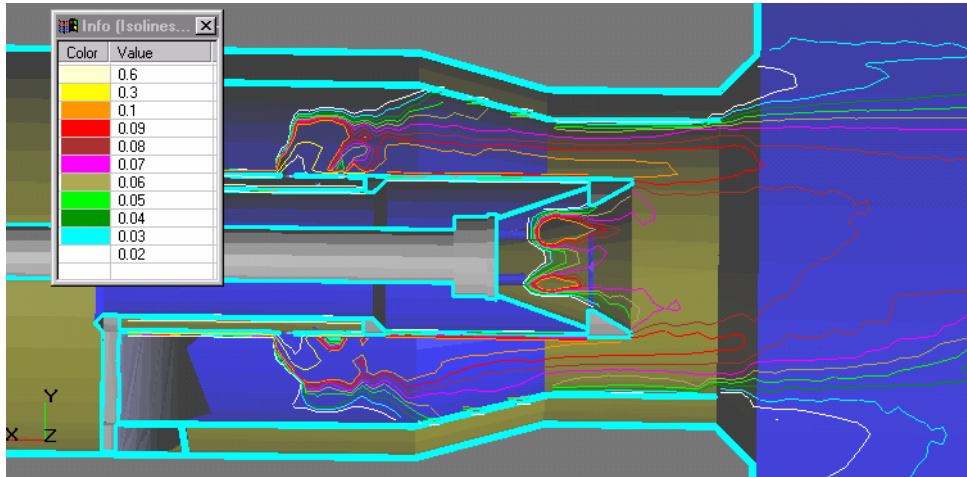
- **Сетка узлов на плоскости** – группа элементов управления, задающая параметры сетки на плоскости, узлы которой служат началами векторов.
 - Поля **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** задают частоту узлов сетки по двум направлениям.
 - Если установлен флаг **Авто**, то шаг сетки по обоим осям выбирается автоматически и поля **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** запрещены для ввода.
 - Если установлен флаг **Поддерживать пропорциональность**, то изменение значения одного из полей **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** влечет за собой изменение другого так, что отношение между ними сохраняется постоянным.



Если слой создан на **Объекте, полученном из супергруппы**, то страница **Начальные точки** становится недоступной и появляется дополнительная страница **Супергруппа**.

- **Плотность точек** – группа элементов управления, позволяющая задать плотность векторов по трем направлениям (поля **X**, **Y** и **Z**) в процентах от некоторой оптимальной плотности. Если установлен флаг **Поддерживать пропорциональность**, то изменение значения одного из полей **X**, **Y** и **Z** влечет за собой изменение другого так, что отношение между ними сохраняется постоянным.
- **Сдвиг внутрь подобласти.** Эта опция позволяет строить значения выбранной величины не на самой выбранной поверхности, а на заданном расстоянии от нее, отсчитываемом от поверхности вглубь расчетной области.

2.4.6.4.7 Изолинии

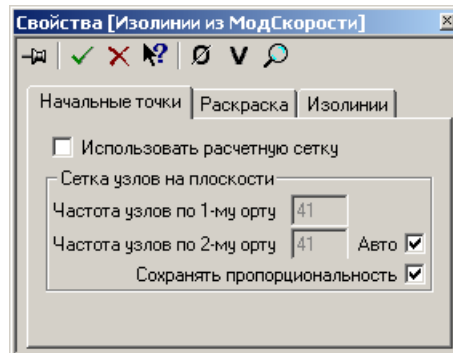


Распределение концентрации горючего в осевой плоскости газовой горелки.

Набор изолиний скалярной переменной. Изолинии неосвещаемые. На плоскости изолинии строятся в ячейках равномерной прямоугольной сетки, параметры которой задаются в странице **Начальные точки**. Часть изолинии, заключенная внутри ячейки, является отрезком.

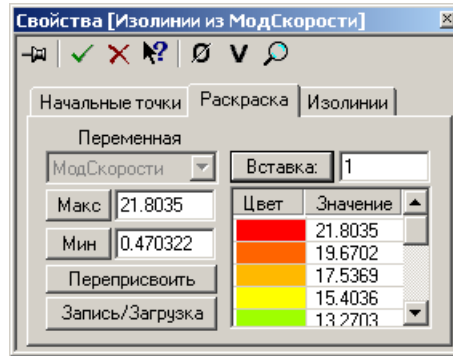
Базовые объекты**Плоскость**

Объект, полученный из супергруппы

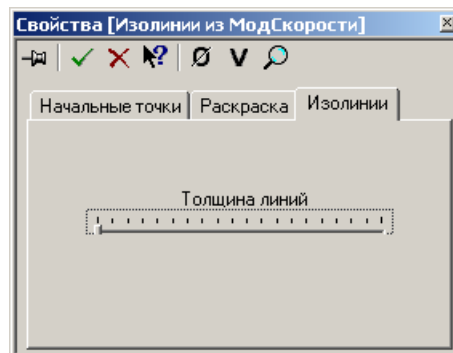
Базовые переменные**Скалярные**Свойства слоя

Эта страница выводится только в случае, если базовый объект – **Плоскость**.

- **Сетка узлов на плоскости** – группа элементов управления, задающая параметры сетки на плоскости.
 - Поля **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** задают частоту узлов сетки по двум направлениям.
 - Если установлен флаг **Авто**, то шаг сетки по обоим осям выбирается автоматически и поля **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** запрещены для ввода.
 - Если установлен флаг **Сохранять пропорциональность**, то изменение значения одного из полей **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** влечет за собой изменение другого так, что отношение между ними сохраняется постоянным.
- Флаг **Использовать расчетную сетку** – если этот флаг включен, то изолинии строятся на основе расчетной сетки, если флаг выключен – то на основе сетки на плоскости, задаваемой в **Сетка узлов на плоскости**.



- Поле **Переменная** информирует, какая скалярная переменная использовалась для построения изолиний.
- Двух колоночный список задает палитру – соответствие цветов изолиний и значений переменной. Для того, чтобы удалить уровень из палитры, необходимо выделить его в списке и нажать клавишу **Del** на клавиатуре.
- Нажатие кнопки **Вставка** вызывает появление новых уровней между выбранным в списке и соседним с ним сверху. Количество вставляемых уровней определяется числом, введенным в редактируемое поле справа от кнопки. Аналогично действует клавиша **Ins** клавиатуры.
- Кнопка **Макс** устанавливает в редактируемом поле справа от нее значение переменной, немного меньшее максимального значения переменной в расчетной области. Это сделано для того, чтобы изолиния с таким значением могла быть построена. Точные максимальное и минимальное значения переменной в области можно посмотреть в окне свойств этой переменной в дереве постпроцессора.
- Кнопка **Мин** устанавливает в редактируемом поле справа от нее значение переменной, немного большее минимального значения переменной в расчетной области. Это сделано для того, чтобы изолиния с таким значением могла быть построена.
- Кнопка **Переприсвоить** – не изменяя количества и цвета изолиний, сопоставляет цветам новые значения переменной. Интервал значений берется из полей справа от кнопок **Мин** и **Макс** и разбивается таким образом, чтобы отношения разностей уровней были такие же, как в старой палитре.
- Кнопка **Запись/Загрузка** вызывает [редактор палитр](#). С его помощью можно записать существующую палитру в файл, загрузить палитру из файла, а также создать новую палитру.

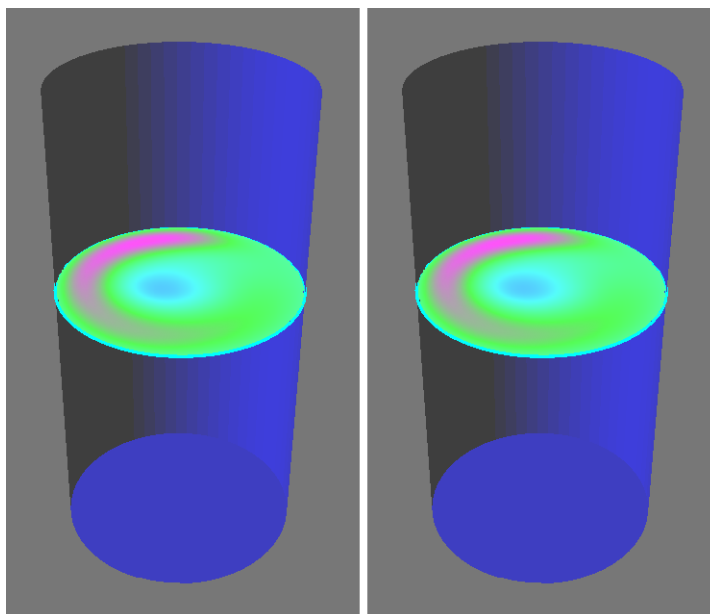


- **Толщина линий.** Крайнее левое положение дает самые тонкие линии с отключенным сглаживанием ступенчатости. Остальные положения дают линии с устранением ступенчатости (*antialiasing*).

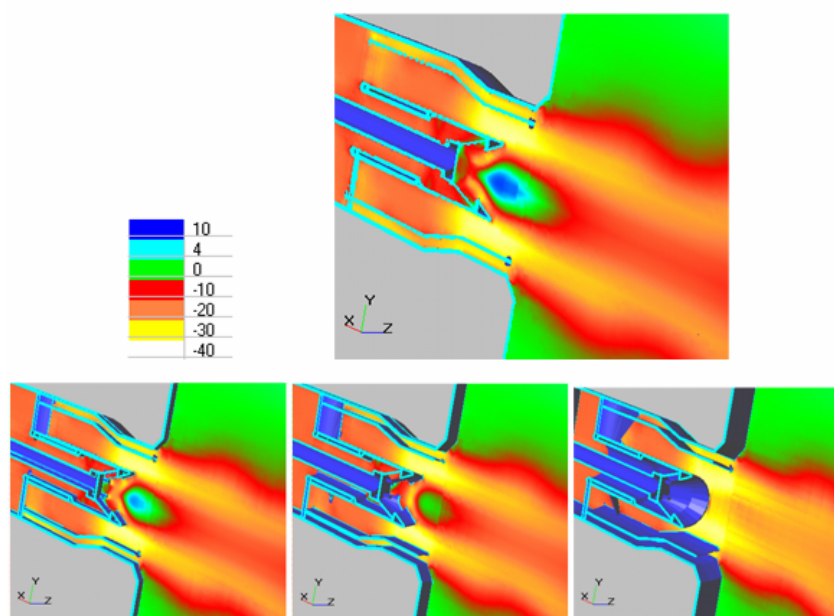
Если слой создан на **Объекте, полученном из супергруппы**, то страница **Начальные точки** становится недоступной, а на странице **Изолинии** появляется дополнительное поле **Сдвиг внутрь подобласти**. Эта опция позволяет строить значения выбранной величины не на самой выбранной поверхности, а на заданном расстоянии от нее, отсчитываемом от поверхности вглубь расчетной области.

2.4.6.4.8 Заливка

Слой Заливка базируется на поверхности и демонстрирует распределение скалярной переменной на этой поверхности с помощью цветовых переходов. Для построения заливки необходимо задать несколько уровней переменной и поставить им в соответствие цвета. Тогда цвет точки поверхности будет находиться линейной интерполяцией трех цветовых компонент между соседними уровнями, между которыми лежит значение переменной в этой точке. На плоскости значения переменной вычисляются в узлах равномерной прямоугольной сетки, параметры которой задаются в странице **Сетка узлов на плоскости**. Интерполяция цвета между узлами возложена на **OpenGL**. В случае, если между значениями в соседних узлах находится уровень, между узлами вставляется дополнительная точка, соответствующая этому уровню, что позволяет исключить неверную цветовую интерполяцию.



Цилиндрический вихревой смеситель. Плоскости с тоновой заливкой.



Плоскость с тоновой заливкой по Z-компоненте скорости в завихрителе.

Базовые объекты

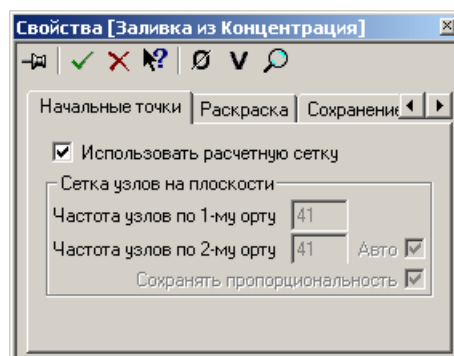
Плоскость

Объект, полученный из супергруппы

Базовые переменные

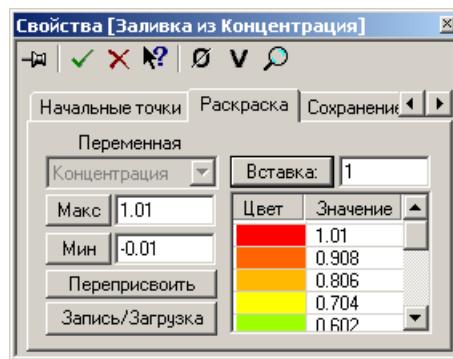
Скалярные

Свойства слоя



Эта страница выводится только в случае, если базовый объект – **Плоскость**.

- **Сетка узлов на плоскости** – группа элементов управления, задающая параметры сетки на плоскости.
 - Поля **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** задают частоту узлов сетки по двум направлениям.
 - Если установлен флаг **Авто**, то шаг сетки по обоим осям выбирается автоматически и поля **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** запрещены для ввода.
 - Если установлен флаг **Сохранять пропорциональность**, то изменение значения одного из полей **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** влечет за собой изменение другого так, что отношение между ними сохраняется постоянным.
- Флаг **Использовать расчетную сетку** – если этот флаг включен, то изолинии строятся на основе расчетной сетки, если флаг выключен – то на основе сетки на плоскости, задаваемой в **Сетка узлов на плоскости**.

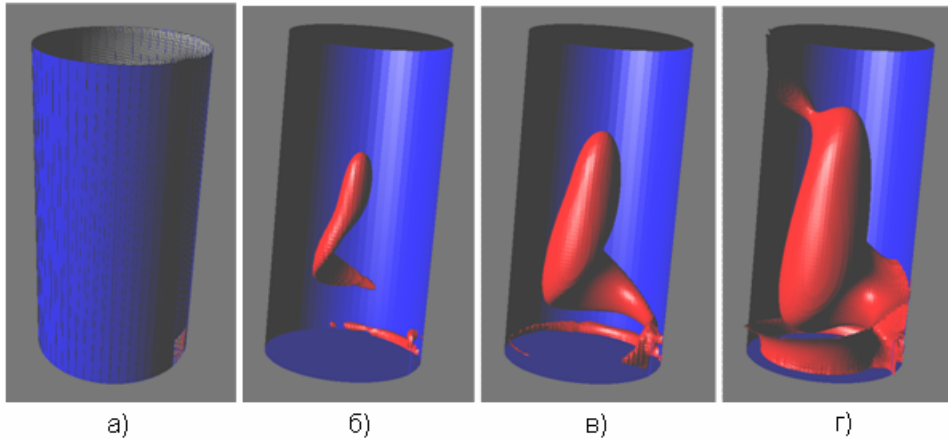


- Поле **Переменная** информирует, какая скалярная переменная использовалась для построения заливки.
- Двух колоночный список задает палитру – соответствие цветов и значений переменной. Для того, чтобы удалить уровень из палитры, необходимо выделить его в списке и нажать клавишу **Del** на клавиатуре.
- Нажатие кнопки **Вставка** вызывает появление новых уровней между выбранным в списке и соседним с ним сверху. Количество вставляемых уровней определяется числом, введенным в редактируемое поле справа от кнопки. Аналогично действует клавиша **Ins** клавиатуры.
- Кнопка **Макс** устанавливает в редактируемом поле справа от нее значение переменной, немного меньшее максимального значения переменной в расчетной области. Это сделано для того, чтобы уровень заливки с таким значением мог быть построен. Точные максимальное и минимальное значения переменной в области можно посмотреть в окне свойств этой переменной в дереве постпроцессора.
- Кнопка **Мин** устанавливает в редактируемом поле справа от нее значение переменной, немного большее минимального значения переменной в расчетной области. Это сделано для того, чтобы уровень заливки таким значением мог быть построен.
- Кнопка **Переприсвоить** – не изменяя количества и цвета уровней заливки, сопоставляет цветам новые значения переменной. Интервал значений берется из полей справа от кнопок **Мин** и **Макс** и разбивается таким образом, чтобы отношения разностей уровней были такие же, как в старой палитре.
- Кнопка **Запись/Загрузка** вызывает [редактор палитр](#). С его помощью можно записать существующую палитру в файл, загрузить палитру из файла, а также создать новую палитру.

Если слой создан на **Объект, полученный из супергруппы**, то страница **Начальные точки** становится недоступной и появляется дополнительная страница **Заливка** с полем **Сдвиг внутрь подобласти**. Эта опция позволяет строить значения выбранной величины не на самой выбранной поверхности, а на заданном расстоянии от нее, отсчитываемом от поверхности вглубь расчетной области.

2.4.6.4.9 Изоповерхность

Строит в трехмерном пространстве изоповерхность скалярной величины как набор непрозрачных или полупрозрачных освещенных фасеток.



Цилиндрический вихревой смеситель (а) и изоповерхности Z-компоненты скорости в нем: (б) – $V_z = -1.85$, (в) – $V_z = -1.0$, (г) – $V_z = 0.0$.

Базовые объекты

Всё пространство

Базовые переменные

Скалярные

Свойства слоя



- Окно **Значение** – задает значение переменной, для которого будет построена изоповерхность. В редактируемые окна **Мин** и **Макс** выводятся минимальное и максимальное значение переменной в расчетной области. Значение в окне **Значение** может быть меньше **Мин** и больше **Макс**.
- Бегунок **Непрозрач.** – **Невидим.** задает степень прозрачности изоповерхности. Прозрачность может меняться от полностью непрозрачной **Непрозрачн.** до полностью прозрачной **Невидим.**.
- Цветное окно задает цвет изоповерхности.
- Флаг **Асинхр. постр.** – задает способ построения: если он включен, то проводится построение заливки по всем указанным уровням поочередно, при этом управление возвращается после построения нулевого уровня и дальнейшее построение заливки осуществляется в фоновом режиме, если он выключен, то проводится построение заливки по всем указанным уровням одновременно, при этом перехват управления будет невозможен до окончания заливки. Второй способ отрисовки работает быстрее, но не позволяет перехватывать управление в процессе отрисовки.
- Флаг **Рёберный вид** – отображает изоповерхность в реберном виде.
- Окно **Макс. уровень** – задает максимальный уровень адаптации сетки, по которому будет проводится адаптации изоповерхности. Если задано значение < 0 , то адаптация изоповерхности производится по всем уровням.
- Бегунок **Уровень сглаживания** задает степень сглаживания изоповерхности.

2.4.6.5 Слои с анимацией

Группа слоев с анимацией объединяет слои, для которых требуются расчетные данные, т.е. требуется указывать расчетную переменную. Эти слои содержат анимацию.

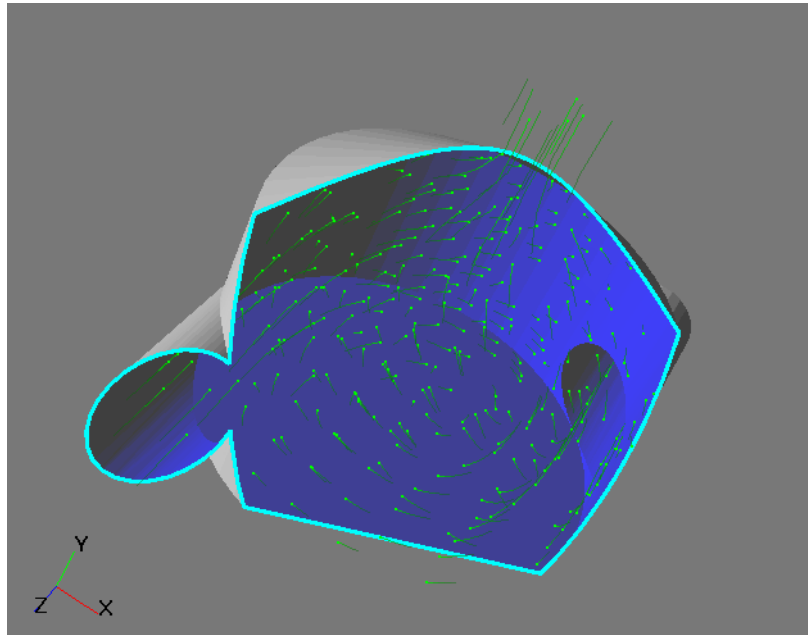
К слоям относятся следующие:

- [Вспышки](#)

- [Группа частиц](#)
- [Траектории](#)

2.4.6.5.1 Вспышки

Слой **Вспышки** основан на одном из *методов многочастичной анимации*. Он генерирует начальные точки частиц равномерно по всему расчетному объему. В объеме генерируется равномерная прямоугольная сетка с кубическими ячейками и начальные точки частиц получают небольшим сдвигом узлов сетки на случайный вектор. Частицы выпускаются из подмножества множества начальных точек. Время жизни частиц задается в параметрах слоя. По окончании времени жизни частицы для нее случайным образом выбирается новая начальная точка из множества начальных точек. Жизненный объем каждой частицы совпадает с расчетной областью. Слой позволяет наблюдать общую картину движения жидкости/газа в объеме.



Слой Вспышки в газовом миксере, разрезанном плоскостью отсечения. Можно наблюдать вток газа через подающие трубы, закрутку газа в объеме миксера и выброс газа через выходную трубу.

Базовые объекты

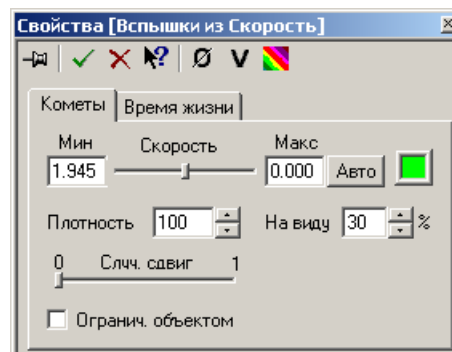
Всё пространство

Бокс

Базовые переменные

Векторные

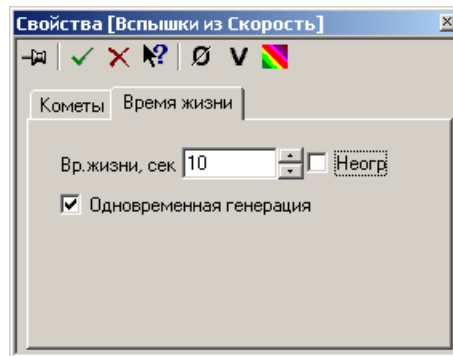
Свойства слоя



- Бегунок **Скорость** задает скорость движения частиц слоя. Предельные значения бегунка задаются в окнах **Мин** и **Макс**. Значение равное 1 соответствует реальному времени. Значение равное x соответствует замедлению частиц в $1/x$ раз. Промежуточные положения бегунка задают значение скорости между **Мин** и **Макс**.
- Кнопка **Авто** устанавливает значения в окнах **Мин** и **Макс**, а также позиционирует бегунок таким образом, чтобы движение частиц на экране происходило с оптимальной скоростью.
- Цветное окно задает цвет частиц.
- Бегунок **Плотность** задает частоту кубической решетки, на основании которой генерируются

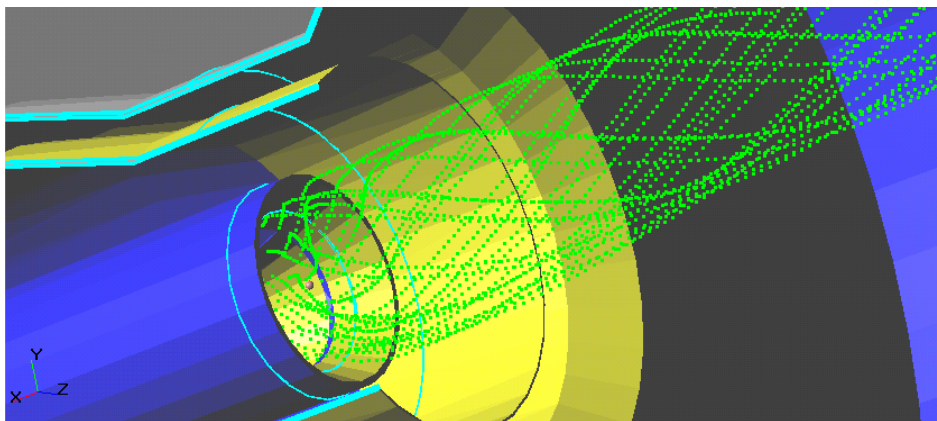
начальные точки частиц.

- Бегунок **Случ. сдвиг** задает длину случайного вектора, на который начальные точки отстоят от узлов кубической решетки. Направление вектора свое для каждого узла решетки. Если бегунок находится в крайнем левом положении, начальные точки совпадают с узлами решетки.
- Окно **На виду** задает количество частиц, видимых на экране в процентах от всех начальных точек.
- Флаг **Огранич. объектом** – если включен этот флаг, то частицы не могут вылетать за пределы того объекта, на котором они созданы.



- Окно **Вр. жизни, сек** задает время жизни частиц в секундах.
- Флаг **Неогр** – если включен этот флаг, то время жизни частиц задается неограниченным.
- Флаг **Одновременная генерация** – если включен этот флаг, то все частицы генерируются одновременно, если же он выключен, то частицы создаются с некоторой задержкой.

2.4.6.5.2 Группа частиц



Течение за закручивающим стабилизатором.

Слой **Группа частиц** визуализирует траектории движения виртуальных частиц, выпущенных с части плоскости, ограниченной плоским контуром или контурами. Траектории отображаются трассирующими точками, неподвижными в пространстве объектов. На каждом шаге длина траектории удлиняется на один сегмент. Базовым объектом слоя является плоскость, пересечение которой с твердыми телами образует набор контуров. Контур, в котором расположен центр плоскости, определяет подобласть расчетной области, которая будет использоваться для построения слоя. В зависимости от параметров слоя частицы могут выпускаться из внутренности контура, к которому расположен центр плоскости или изо всех контуров, внутренности которых лежат в выбранной подобласти. Дополнительно точки-начала траекторий могут быть ограничены кругом, лежащим в базовой плоскости с центром в центре плоскости. Частицы имеют радиус и плотность. Если масса частицы ненулевая, то ее движение определяется в результате действия на нее сил тяжести и сопротивления.

Базовые объекты

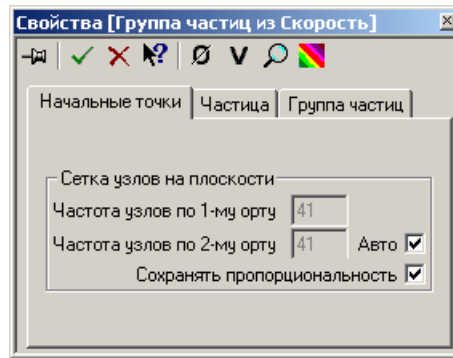
Плоскость

Объект, полученный из супергруппы

Базовые переменные

Векторные

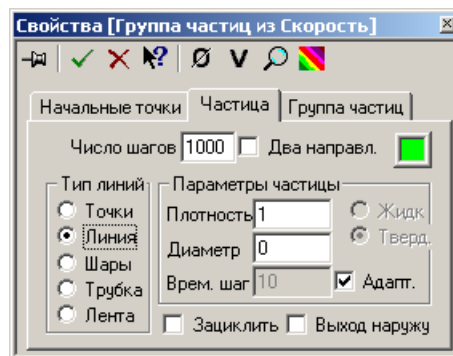
Свойства слоя



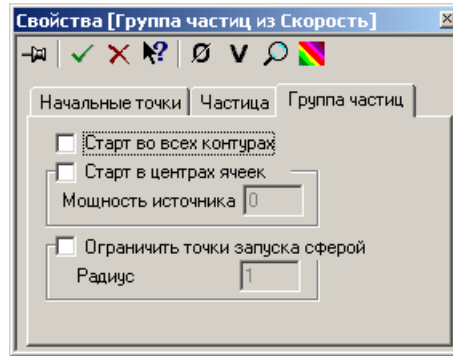
Параметры, задаваемые на этой странице используются только в том случае, если в странице **Группа частиц** не стоит флаг **Старт в центрах ячеек**.

Сетка узлов на плоскости – группа элементов управления, задающая параметры сетки на плоскости.

- Поля **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** задают частоту узлов сетки по двум направлениям.
- Если установлен флаг **Авто**, то шаг сетки по обоим осям выбирается автоматически и поля **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** запрещены для ввода.
- Если установлен флаг **Сохранять пропорциональность**, то изменение значения одного из полей **Частота узлов по 1-му орту** и **Частота узлов по 2-му орту** влечет за собой изменение другого так, что отношение между ними сохраняется постоянным.



- Окно **Число шагов** задает количество шагов построения слоя и одновременно определяет количество сегментов, из которых будет состоять каждая из траекторий в законченном состоянии.
- Цветовое окно задает цвет сегментов.
- **Тип линий** задает способ отрисовки траекторий частиц.
 - **Точки** – набор точек,
 - **Линия** – ломаная с точками в узлах,
 - **Шары** – набор освещенных шариков,
 - **Трубка** – освещенная трубка,
 - **Лента** – освещенная ленточка. Кручение ленточки отражает вращение частицы вокруг ее центра масс.
- Окно **Плотность** задает плотность вещества, из которого состоит частица в $\text{кг}/\text{м}^3$.
- Окно **Диаметр** задает диаметр частицы в метрах.
- Окно **Врем. шаг** задает значение коэффициента шага интегрирования по времени, с которым вычисляется траектория движения частицы. Шаг интегрирования по времени получается умножением значения из поля Time step на явный шаг по времени.
- Если установлен флаг адаптивный выбор шага по времени **Адапт.**, то шаг по времени выбирается автоматически.
- Переключатель **Жидк./Тверд.** зарезервирован для использования в следующих версиях.
- Если установлен флаг **Зациклить**, то после выполнения заданного количества шагов траектории начинают строиться заново.
- Если установлен флаг **Выход наружу**, то траектории частиц могут выходить за пределы расчетной области. В противном случае, траектории отрисовываются только внутри расчетной области.



- Если установлен флаг **Старт во всех контурах**, то траектории частиц выпускаются из всех контуров, внутренности которых принадлежат выбранной подобласти. В противном случае траектории выпускаются только из контура, в котором находится центр базовой плоскости.
- Если установлен флаг **Старт в центрах ячеек**, то начала траекторий позиционируются не на базовой плоскости, а в ячейках, которые пересекает внутренность выбранного контура (контуров). В окне **Мощность источника** задается плотность траекторий. Если значение в этом окне ($n=0$), то выпускается по одной траектории из центра каждой ячейки. Если значение положительно ($n>0$), то из каждой ячейки выпускается $8n$ траекторий. Если значение отрицательно ($n<0$), то траектории выпускаются из центра каждой $|n|$ -ой ячейки.
- Если установлен флаг **Ограничить точки запуска сферой**, то частицы выпускаются только из точек, удаленных от центра плоскости не далее, чем на расстояние, заданное в окне **Радиус**.

2.4.6.5.3 Траектории

Слой предназначен для наблюдения за движением модельных частиц. Слой имеет смысл только если **Частицы** отмечены в окне **Выбор модели**. Движение модельных частиц можно наблюдать только если параметр **Нестационарность** = 1 в окне свойств элемента **Частицы**. Стартовые точки можно задавать либо обычным способом (на входах в расчётную область) либо через фильтр [Начальное распределение частиц](#).

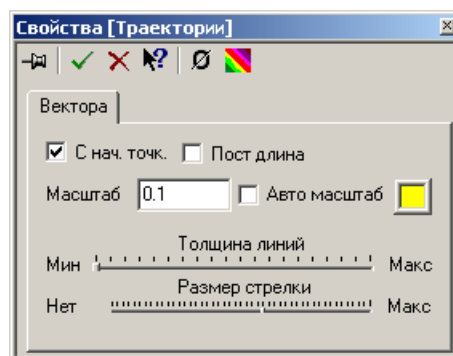
Слой может быть использован для визуализации течения. Для этого

- задайте **Вещество частиц** совпадающим с **Веществом0**,
- на страницах **Частицы** в граничных условиях типа **Стенка** установите параметр **Плётка** = 0,
- задайте диаметр частиц 10^{-3} м.

Базовые объекты

Всё пространство

Свойства слоя



- **С нач. Точк.** – поставьте маркер в этом поле, если хотите видеть текущие положения модельных частиц в виде красных точек.
- **Пост длина** – поставьте маркер в этом поле, если хотите чтобы все вектора скоростей частиц были одинаковой длины.
- **Масштаб** – задаёт отношение длины максимального вектора скорости к некоторой контрольной длине. Экспериментируя с этим параметром, добейтесь требуемого результата. Если поле **Авто масштаб** отмечено, параметр равен 1.
- Выберите цвет векторов в цветовом поле.
- **Толщина линий** – задайте толщину векторов: крайнее левое положение бегунка соответствует минимальной толщине, крайнее правое положение соответствует максимальной толщине.
- **Размер стрелки** – задайте размер стрелки.

Общие принципы устройства слоёв описаны в разделе [Слои визуализации](#).

2.4.7 Дополнительные средства постпроцессора

Дополнительные средства Постпроцессора предназначены для:

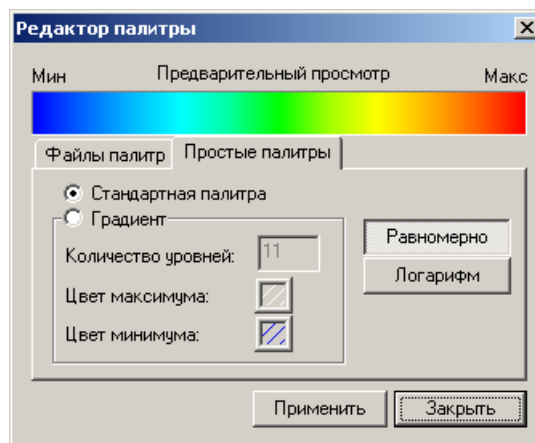
- создания и редактирования палитр – инструмент [Редактор палитр](#),
- диагностики возможностей видеокарты — инструмент [Счетчик кадров](#),
- записи состояний постпроцессора – инструмент [Отрисовка сценария](#).

2.4.7.1 Редактор палитры

Редактор палитр служит для создания простых палитр, обмена палитрами со страницами свойств, имеющих кнопку **Сохранить/Загрузить палитру**, а также чтения и модификации файлов, содержащих библиотеки палитр.

Палитрой во **FlowVision** называется набор возрастающих чисел, меньшее из которых – 0, а большее – 1, с сопоставленным каждому из чисел цветом. Эти числа называются уровнями палитры. Количество уровней не может быть меньше 2. Сверху количество уровней не ограничено. Цвет уровня задается тройкой **RGB**. Если к палитре поступает запрос на цвет, соответствующий значению X из $(0, 1)$ и X нет в списке уровней, то цвет получается линейной интерполяцией по трем цветовым компонентам двух уровней палитры, между которыми заключен X .

Создание простой палитры производится со страницы **Простые палитры**. Простые палитры, которые можно создавать в редакторе палитр, делятся на 2 типа: палитра с predetermined набором цветов **Стандартная палитра** и палитра – разбиение цветового интервала **Градиент**.



В первом случае берется следующий набор из 11 цветов: синий соответствует 0, голубой, темно-зеленый, светло-зеленый, светло-коричневый, малиновый, бордовый, красный, оранжевый, желтый, светло-желтый соответствует 1.

- Во втором случае палитра будет содержать количество уровней, равное числу, введенному в поле Число уровней **Количество уровней**. Минимальному уровню будет соответствовать цвет, выбранный в цветовом окне **Цвет минимума**, а максимальному – в окне **Цвет максимума**. Промежуточным уровням будут соответствовать цвета, полученные интерполяцией по трем цветовым компонентам между цветами минимального и максимального уровней. Интерполяция линейна по номеру уровня.
- Выбор одной из кнопок **Равномерно** и **Логарифм** определяет, каким образом будет разбит уровнями промежуток $(0, 1)$ в простой палитре. В первом случае уровни палитры эквидистантны, во втором – это значения $\ln(x)$ из $(1, e)$.
- Прямоугольник **Предварительный просмотр** над страницей служит для просмотра текущей палитры редактора. Его левый край соответствует уровню 0, а правый – уровню 1.
- Кнопка **Применить** отсылает текущую палитру редактору окну, вызвавшему редактор палитр.
- Кнопка **Закрыть** закрывает редактор палитр.

Кроме создания простых палитр, редактор палитр позволяет работать с файлами палитр или библиотеками палитр. Библиотека палитр **FlowVision** – текстовый файл, содержащий одну или несколько палитр. Как правило, библиотеки палитр имеют расширение ***.fvp**. Формат файла очень прост и позволяет создавать файлы палитр вручную, без редактора палитр, а затем, с помощью редактора палитр, использовать их для построения различных слоёв визуализации.

Формат файла палитр FlowVision

Файл палитр = Набор палитр;

Набор палитр = Палитра | Палитра "\n" [Набор палитр];

"\n" – переход на новую строку;

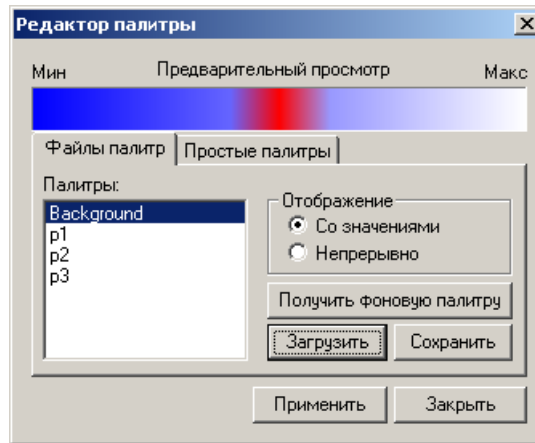
Палитра = "Name" Имя_палитры "\n" Уровень_0 "\n" [Список_уровней] "\n" Уровень_1;
 Имя_палитры – строка, содержащая любые символы, кроме "\0" и "\n" и длиной не более 50 символов;
 Уровень_0 = "0.0" rValuegValue bValue;
 Уровень_1 = "1.0" rValuegValue bValue;
 Список_уровней = Уровень "\n" [Список_уровней];
 Уровень = level rValuegValue bValue;
 level – число из (0, 1), причем каждое последующее число в списке уровней должно быть больше предыдущего.
 rValue – целое число из [0, 255], задающее интенсивность красной компоненты цвета уровня;
 gValue – целое число из [0, 255], задающее интенсивность зеленой компоненты цвета уровня;
 bValue – целое число из [0, 255], задающее интенсивность синей компоненты цвета уровня/

Ниже приводится пример файла палитр:

```

Name Background
0.000000 0 0 255
0.103448 25 25 255
0.202586 51 51 255
0.301724 76 76 255
0.400862 102 102 255
0.500000 255 0 0
0.603448 153 153 255
0.702586 178 178 255
0.801724 204 204 255
0.900862 229 229 255
1.000000 255 255 255
Name p1
0.000000 0 0 255
0.103448 0 255 255
0.202586 0 150 0
0.301724 0 255 0
0.400862 170 170 81
0.500000 255 0 255
0.603448 170 50 50
0.702586 255 0 0
0.801724 255 150 0
0.900862 255 255 0
1.000000 255 255 200
Name p2
0.000000 0 0 255
0.202586 0 150 0
0.400862 170 170 81
0.603448 170 50 50
0.801724 255 150 0
1.000000 255 255 200
Name p3
0.000000 0 0 255
0.301724 0 255 0
0.603448 170 50 50
0.900862 255 255 0
1.000000 255 255 200
  
```

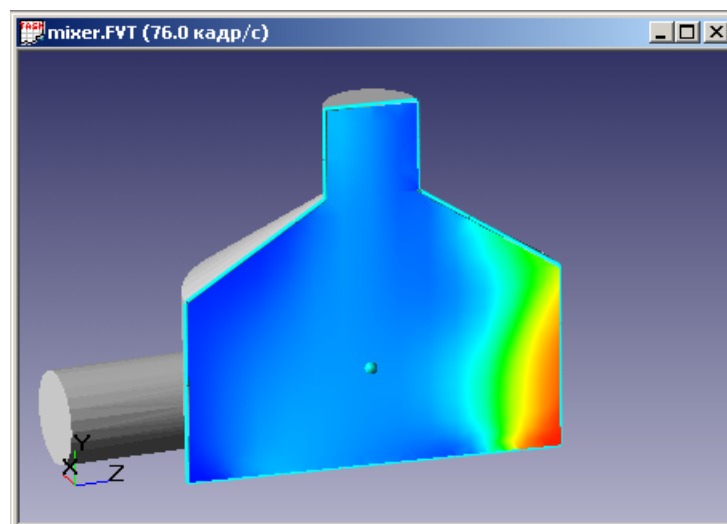
Страница **Файлы палитр** предназначена для работы с файлами палитр.



- Кнопка **Загрузить** вызывает стандартный диалог открытия файла и позволяет загрузить библиотеку палитр в редактор. После загрузки файла в окне **Палитры** появляются названия всех палитр, которые редактор смог считать из файла. В случае неверного формата файла сообщение об ошибке не выводится, но список палитр окажется пуст.
- Выбор какой-либо палитры мышкой в окне **Палитры** делает ее текущей палитрой редактора и загружает ее в окно просмотра. Если ни одна палитра не выбрана, окно просмотра будет одноцветным серым. Для того, чтобы удалить палитру из списка палитр, необходимо выделить ее мышкой в окне и нажать клавишу Del на клавиатуре.
- Кнопка **Сохранить** вызывает стандартный диалог записи файла. С его помощью выбирается файл, в который будут записаны палитры, находящиеся в окне палитр. По умолчанию выбирается тот файл, откуда палитры были загружены.
- Кнопка **Получить фоновую палитру** позволяет добавить в список палитр палитру той страницы свойств, откуда был вызван редактор палитр.
- Группа элементов управления **Отображение** определяет, каким образом будет работать кнопка **Применить**:
 - Если выбран пункт **Со значениями**, то в вызвавшую редактор страницу свойств палитра передается вместе со значениями уровней. В этом случае новая палитра страницы свойств будет состоять из того же количества уровней, что и палитра в редакторе, и отношения расстояний между уровнями сохранятся. Значения минимально и максимального уровня новой палитры останутся те же, что и в старой.
 - Если выбран пункт **Непрерывно**, то количество и значения уровней в палитре страницы свойств не изменится, а их новые цвета будут получены линейной интерполяцией по выбранной в редакторе палитре.


2.4.7.2 Счетчик кадров

Счетчик кадров включается и выключается из главного меню **FlowVision** из пункта **Инструменты FPS измеритель**. Если счетчик включен, текущая частота кадров в графическом окне отображается в заголовке окна. Это число показывает, сколько кадров в секунду способен отображать компьютер, на котором запущена программа. Частота кадров в основном зависит от производительности процессора и возможностей видеокарты, то есть, ее **OpenGL** и 2D ускорителей. Если видеокарта не поддерживает **OpenGL**, то ее замена на видеокарту с аппаратным **OpenGL** ускорителем способна увеличить частоту кадров на порядок и более.



Выполняя тесты на частоту кадров, необходимо помнить, что сравнительный анализ конфигураций компьютера имеет смысл только в том случае, если рассматривается одна и та же 3D-сцена. Частота кадров существенно зависит от количества и параметров объектов, из которых состоит 3D-сцена. Счетчик кадров принудительно вызывает перерисовку графического окна с наибольшей возможной частотой. Поэтому, если счетчик кадров включен, работа органов управления **FlowVision** замедляется. В силу этого, рекомендуется включать счетчик кадров только на время измерения частоты кадров.

2.4.7.3 Отрисовка сценария

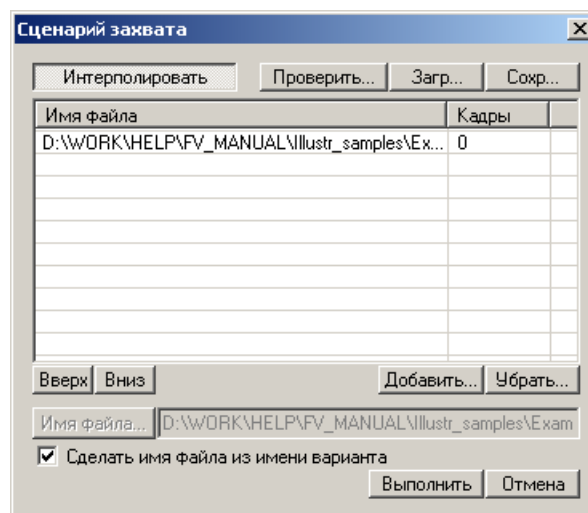
Инструмент **Отрисовка сценария** осуществляет обработку предварительно описанных состояний постпроцессора и вызывается из панели инструментов **Захват** кнопкой . Этот инструмент позволяет сохранять последовательность предварительно записанных состояний постпроцессора в двух режимах: с интерполяцией и без интерполяции. Описание процедуры записи состояний постпроцессора подробно описано в разделе [Сохранение и загрузка состояния постпроцессора](#).

Режим отрисовки сценария с интерполяцией

Этот режим позволяет задать набор состояний постпроцессора и количество промежуточных кадров между ними, после этого будут интерполированы параметры статусов и построены картинки промежуточных состояний. В этом режиме анализируется каждая пара состояний постпроцессора, все слои визуализации, которые присутствуют в каждом из состояний постпроцессора будут интерполированы, а те слои, которые присутствуют только в одном состоянии из пары, будут выброшены.

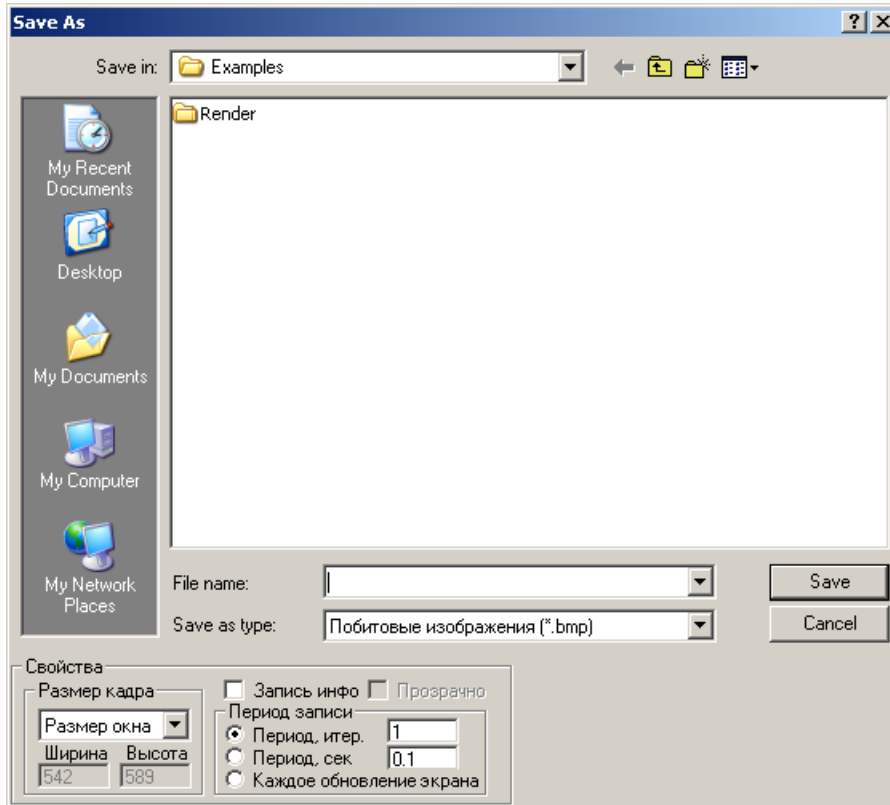
Режим отрисовки сценария без интерполяции

Этот режим позволяет задать набор состояний постпроцессора. Используется в случае когда необходима пакетная обработка результатов нестационарного расчета, причем состояния, загружаемые в сценарий не могут быть интерполированы (содержат разные слои визуализации).



Окно Отрисовка сценария

- Кнопка **Интерполировать/Не интерполировать** – осуществляет переключение между режимами отрисовки сценария.
- Кнопка **Проверить** – проверяет возможность загрузки указанных в списке состояний постпроцессора.
- Кнопка **Загр.** – загружает созданный ранее сценарий.
- Кнопка **Сохранить** – сохраняет созданный сценарий.
- Список **Имя файла** – в этот список помещается набор состояний постпроцессора.
- Список **Кадры** – доступен только в режиме интерполяции. Здесь задается количество кадров между двумя состояниями постпроцессора.
- Кнопка **Вверх** – перемещает выбранное состояние постпроцессора вверх по списку состояний.
- Кнопка **Вниз** – перемещает выбранное состояние постпроцессора вниз по списку состояний.
- Кнопка **Добавить** – добавляет состояние постпроцессора в список.
- Кнопка **Убрать** – удаляет состояние постпроцессора из списка.
- Кнопка **Имя файла** – вызывает диалог сохранения графического окна варианта в файл.



- **Свойства** — группа элементов управления, задающая размер кадра. Размер сохраняемого в файл графического окна может быть выбран либо такой как на экране, либо один из трех стандартных, либо задан вручную.
- В поле **Тип файла** выбирается один из трех форматов записи файла: **Windows bitmap (*.bmp)**, **Targa (*.tga)**, **Portable network graphics (*.png)**.
- Флаг **Запись инфо** позволяет сохранять содержимое графического окна вместе с окном информации.
- Флаг **Прозрачно** делает столбцы значений окна информации прозрачными.
- Флаг **Сделать имя файла из имени варианта** – если этот флаг включен, то имя файла картинки будет создано на основе имени варианта в следующем формате **NAME####**, где **NAME** – имя варианта, **####** - четырехзначный номер, присваиваемый каждому графическому файлу, созданному на основе этого варианта.
- Кнопка **Выполнить** – проводит интерполяцию состояния постпроцессора и сохранение графических файлов для данного варианта.
- Кнопка **Отмена** – сброс всех установок.

2.5 Сообщения об ошибках

Обозначения в выдаваемом на экран сообщении:

n – целое число (номер ячейки, номер уровня),

a – вещественное число,

S – площадь,

name – название модели, подобласти и т.п..

В FlowVision существуют следующие типы ошибок:

- [фатальные ошибки](#),
- [ошибки](#),
- [предупреждения](#).

2.5.1 Фатальные ошибки

Номер ошибки	Сообщение, выдаваемое на экран	Описание ошибки	Возможные пути устранения
5	После перестройки сетки образовалась плохая ячейка, смотри: инд.ячейки <i>n:n:n</i> род.инд. <i>n</i> :	Произошла ошибка в генерации сетки. Ячейка указана.	Посмотрите для какой ячейки произошел сбой генерации сетки с помощью слоя ОтладкаЯчеек . Возможно, в этом месте ошибки геометрической модели. Исправьте геометрическую модель.
6	Неизвестная ошибка	Ошибка при обращении к памяти.	Обратиться к разработчику.
11	Функция деления ячейки была применена к ячейке без модели! Ячейка: <i>n:n:n</i> Индекс родителя <i>n</i>	В ячейке не установлена никакая модель.	Обратиться к разработчику.
12	Функция деления была применена к уже поделенной ячейке! Ячейка: <i>n:n:n</i> Индекс родителя <i>n</i>	Уже разбитая ячейка разбивается повторно.	Обратиться к разработчику.
13	Деление ячейки: Подобласть с CModel не может быть найдена!	Нет нерасчетной области. В варианте всегда должна существовать хотя бы одна нерасчетная область (например, внешняя).	Обратиться к разработчику.
14	Функция слияния была применена к ячейке без модели! Ячейка: <i>n:n:n</i>	В ячейке не установлена никакая модель.	Обратиться к разработчику.
15	Функция слияния была применена к ячейке, кот. не была поделена! Ячейка: <i>n:n:n</i>	Попытка осуществить слияние предварительно не разбитой ячейки.	Обратиться к разработчику.
16	СлияниеЯчеек: Подобласть с CModel не может быть найдена!	Нет нерасчетной области. В варианте всегда должна существовать хотя бы одна нерасчетная область (например, внешняя).	Обратиться к разработчику.
17	Нерасщепленная ячейка после слияния расщепленных ячеек! Ячейка: <i>n:n:n</i>	Произошла ошибка в процессе адаптации сетки. Ячейка указана.	Обратиться к разработчику.

Номер ошибки	Сообщение, выдаваемое на экран	Описание ошибки	Возможные пути устранения
18	SetRegularity: Неправильная структура сетки для мелкой ячейки! Ячейка: <i>n:n:n</i>	Произошла ошибка в процессе адаптации сетки. Ячейка указана.	Посмотрите для какой ячейки произошел сбой генерации сетки с помощью слоя ОтладкаЯчеек. Возможно, в этом месте ошибки геометрической модели. Исправьте геометрическую модель.
19	SetRegularity: Неправильная структура сетки для крупной ячейки! Ячейка: <i>n:n:n</i>	Произошла ошибка в процессе адаптации сетки. Ячейка указана.	Посмотрите для какой ячейки произошел сбой генерации сетки с помощью слоя ОтладкаЯчеек. Возможно, в этом месте ошибки геометрической модели. Исправьте геометрическую модель.
20	CheckGrid: Неправильная структура ячейки! Ячейка: <i>n:n:n</i> , Уровень <i>n</i> , Модель <i>Name</i> Сосед: <i>n:n:n</i> , Уровень <i>n</i> , Модель <i>Name</i>	Ошибка в структуре сетки. Граничат две ячейки, имеющие разные модели.	Скорректировать геометрию.
21	CreateFirstLevel: Подобласть с смоделью не может быть найдена!	Нет нерасчетной области. В варианте всегда должна существовать хотя бы одна нерасчетная область (например, внешняя).	Обратиться к разработчику.
22	Возникли ошибки в процессе генерации сетки!	Ошибка, которая выдается при остановке генератора сеток. Вызвана какими-то ошибками, произошедшими в процессе генерации сетки.	Посмотреть список ошибок генератора сеток. Устранить ошибки, которые возникли перед появлением этого сообщения.
23	Невозможно убрать дисбаланс!	Программа не может устранить дисбаланс между количеством втекающей в расчетную область жидкости и количеством вытекающей жидкости.	Проверить граничные условия. Возможно не поставлено граничное условие «выход».
27	CheckBoundary: Параметр не совпадает с моделью! Ячейка: <i>n:n:n</i> Родитель <i>n</i>	Не совпадает модель, которая присвоена ячейке, принадлежащей подобласти, и модель всей подобласти.	Возможно сбой в оборудовании. Обратиться к разработчику.
29	CheckBoundary: Другая граница! Ячейка: <i>n:n:n</i> Родитель <i>n</i> Соседн.ячейка: <i>n:n:n</i> Родитель <i>n</i>	В том случае, когда по каким-либо причинам граница модели прошла вне расчетной области, может возникнуть ситуация, когда ячейка, примыкающая к границе расчетной области, является расчетной.	Попробовать заново загрузить геометрию. Если устранить ошибку не удалось, обратиться к разработчикам.
44	Многолистная поверхность! Ячейка: <i>n:n:n</i> Родитель <i>n</i>	По одному ребру стыкуется больше двух фасеток.	Скорректировать геометрию.

Номер ошибки	Сообщение, выдаваемое на экран	Описание ошибки	Возможные пути устранения
47	Ошибка при разборе уравнения: Name	Лексическая ошибка в уравнении. Программа не может найти переменную. Вызвана либо тем, что изменилась модель (или отменен расчет какого-то уравнения), либо тем, что изменился язык интерфейса.	Изменить язык интерфейса или проверить включен ли расчет уравнения, переменную от которого программа не может найти.
48	Не найдена dll - измените путь для Name	Неправильно указан путь к dll в пользовательской переменной.	Указать путь к dll в пользовательской переменной.
58	Ошибка в связывании Name N0 = n N1= n	Ошибка при связывании двух граничных условий.	Проверить правильно ли задана связь граничных условий. Если связь задана правильно попробовать скорректировать геометрию.
59	Ошибка в связывании Name , поверхность Name	Невозможно отобразить одну поверхность на другую. Возможно, поверхности не идентичны.	Сравните площади поверхностей. Если они различаются, исправьте геометрию расчетной области.
60	Ошибка в связывании Name , разные площади	Невозможно отобразить одну поверхность на другую. Возможно, поверхности не идентичны.	Сравните площади поверхностей. Если они различаются, исправьте геометрию расчетной области

2.5.2 Ошибки

Номер ошибки	Сообщение, выдаваемое на экран	Описание ошибки	Возможные пути устранения
34	Justify Faces! Подобласть с CModel не может быть найдена!	Нет нерасчетной области. В варианте всегда должна существовать хотя бы одна нерасчетная область (например, внешняя).	Обратиться к разработчику.
36	CheckModel: Нет потомков! Ячейка: n:n:n Родитель n	У разбиваемой ячейки или у ячейки, через которую проходит граница, нет дочерних.	Обратиться к разработчику.
37	CheckModel: Нет модели! Ячейка: n:n:n Родитель n	В ячейке не установлена никакая модель.	Обратиться к разработчику.
38	SetModel: Facets: различные модели! Ячейка: n:n:n Родитель n	В одной ячейке находятся две фасетки с установленными разными моделями.	Скорректировать геометрию.
54	Плохая матрица: a PCell: n n n pi n	Решение развалилось.	Обратиться к разработчику.
55	Плохое решение: a PCell: n n n pi n	Решение развалилось.	Обратиться к разработчику.
56	Плохая правая часть: a PCell: n n n	Решение развалилось.	Обратиться к разработчику.

Номер ошибки	Сообщение, выдаваемое на экран	Описание ошибки	Возможные пути устранения
57	Плохая нормировка: a PCell: n n n	Решение развалилось.	Обратиться к разработчику.
63	Ошибка в формате файла.	Означает, что при считывании файла произошла ошибка из-за неверного формата файла или неверных данных.	Скорректировать файл начальной сетки.
64	Ошибка при записи файла.	Означает, что по какой-то причине не удалось записать файл при сохранении начальной сетки.	Проверьте наличие свободного места на диске, проверьте не открыт ли уже тот файл, в который пытается проводиться запись.
67	Размер начальной сетки по координате coord равен нулю.	По координате coord в считываемой сетке оказалось меньше двух плоскостей (после того, как были отброшены все повторяющиеся, если таковые были).	Скорректировать файл начальной сетки.
68	Граничные условия Name и Name не связались!	Невозможно отобразить одну поверхность на другую. Возможно, поверхности не идентичны.	Сравните площади поверхностей. Если они различаются, исправьте геометрию расчетной области.
70	Невозможно открыть файл Name для записи данных слоя Name !	1. Нет места на диске для записи файла Name. 2. Файл Name закрыт для записи (возможно открыт другой программой).	1. Проверьте наличие свободного места на диске. 2. Проверьте не открыт ли файл данных другой программой.

2.5.3 Предупреждения

Номер ошибки	Сообщение, выдаваемое на экран	Описание ошибки	Возможные пути устранения
4	Дисбаланс конвективного переноса инд.ячейки n:n:n род.инд. n : разн., объем a : а втек.об., выт.об., относ.разн., разн./сум. a: a: a : а втек.масс., выт.масс a : а див.скор. a	Сообщение генерируется блоком расчета конвективного переноса. Оно вызвано нарушением баланса массы в данной ячейке.	Расчет явным методом или измельчить сетку в данной области.
7	Вставка подвижного тела: невозможно передать данные из удаляемой ячейки, смотри: инд.ячейки n:n:n род.инд. n	Произошла ошибка в генерации сетки для подвижного тела.	1. Если ошибка произошла на одной итерации и больше не возникает, продолжайте расчет. 2. Посмотрите для какой ячейки произошел сбой генерации сетки с помощью слоя ОтладкаЯчеек . Возможно, в этом месте имеются ошибки геометрической модели подвижногно тела, либо пересечение подвижных тел.

Номер ошибки	Сообщение, выдаваемое на экран	Описание ошибки	Возможные пути устранения
8	Адаптация: слишком сложная геометрия, Итерация = n Кол-во ячеек = n , перв. ячейка cell n, n, n	Слишком грубая сетка для данной расчетной области - программа не может сгенерить расчетную сетку в данном месте без дополнительной адаптации сетки.	1. Не обращайтесь внимания, если место, где происходит автоматическая адаптация несущественно для расчета. 2. Адаптируйте сетку в этом месте с помощью фильтров или граничных условий. 3. Упростите геометрию.
10	CheckMatrix:1 ThisИндекс $n:n:n$ Родитель n Напр n : Узел n Коэф a	Сообщение генерируется блоком расчета давления. Производится проверка на положительную определенность системы алгебраических уравнений.	Обратиться к разработчику.
24	Дисбаланс в Подобласти: Name . ПотокВход: a - ПотокВыход: a .	В подобласти не выполняются балансовые соотношения.	Проверить правильность задания граничных условий (скорее всего не задано выходное граничное условие).
25	Граница Name : невозможно создать граничное условие для переменной: Name . Проверьте граничное условие.	При считывании варианта созданного старой версией не удается создать граничное условие для конкретной переменной (такого условия больше не существует или оно больше не применимо для этой переменной).	Поправьте это условие в Редакторе граничного условия вручную.
26	Ошибка ModifyCell! Ячейка: $n:n:n$ Родитель n	Это сообщение указывает на то, что при генерации сетки в этой ячейке возникла какая-то ошибка.	Посмотреть список ошибок генератора сеток. Изменить начальную сетку или измельчить сетку в окрестностях данной ячейки.
28	CheckBoundary: Рядом другая модель! Ячейка: $n:n:n$ Родитель n Соседн.ячейка: $n:n:n$ Родитель n	Ошибка в структуре сетки. Граничат две ячейки, имеющие разные модели. Возникает в процессе расчета, например, на этапе адаптации.	Корректировка происходит автоматически. Обрывается связь между такими ячейками и они не рассматриваются как соседние.
30	CheckBoundary: Различные площади соседей! Ячейка: $n:n:n$ Родитель n Сторона n Площадь S Сосед.Площадь S	Граничащие ячейки имеют разную контактную площадь.	Сдвинуть начальную сетку или измельчить сетку в данной области.
31	CheckBoundary: Различные площади для нескольких соседей! Ячейка: $n:n:n$ Родитель n Сторона n Площ.части S Площ.части общ. S Норм.площадь S	Граничащие ячейки имеют разную контактную площадь.	Сдвинуть начальную сетку или измельчить сетку в данной области.

Номер ошибки	Сообщение, выдаваемое на экран	Описание ошибки	Возможные пути устранения
32	CheckBoundary: Неправильные несколько соседей! Ячейка: $n:n:n$ Родитель n Сторона n	Граничащие ячейки имеют разную контактную площадь.	Сдвинуть начальную сетку или измельчить сетку в данной области.
33	JustifyFaces: Нулевая грань, но существует сосед! Ячейка: $n:n:n$ Родитель n Сторона n	Если ячейка имеет на одной из граней две или более соседние ячейки, то у этих соседних ячеек на гранях, граничащих с исходной ячейкой, не может быть других соседних ячеек, кроме исходной.	Сдвинуть начальную сетку или измельчить сетку в данной области.
35	SetModel: Neighbors: Различные модели! Ячейка: $n:n:n$ Родитель n Объем a Сосед: $n:n:n$ Родитель n Объем a	Граничат две ячейки, имеющие разные модели.	Скорректировать геометрию.
40	RemoveCell: нулевой объем! Ячейка: $n:n:n$ Уровень n	Возникшая ячейка с нулевым объемом была удалена.	Удаление таких ячеек происходит автоматически. Если удаленная ячейка была важна для расчета, то можно сдвинуть начальную сетку или измельчить ее в данной области.
41	RemoveCell: ячейка была убрана Ячейка: $n:n:n$ Объем a	Образовавшаяся ячейка, не имеющая соседних ячеек, была удалена.	Удаление таких ячеек происходит автоматически. Если удаленная ячейка была важна для расчета, то можно скорректировать геометрию или измельчить сетку в данной области.
42	MinimumMatrix ThisИндекс $n:n:n$: Родитель $n a$ грань $a a a$ $a a a a a a$ Объем $a a$	Сообщение генерируется блоком расчета давления и выдается, когда отношение между коэффициентами системы алгебраических уравнений превосходит 10^5 . Как правило, это возникает в задачах с большим перепадом плотности.	Это влияет на процесс сходимости итераций для давления.
43	div > eps ThisИндекс $n:n$: $n:n$ div a err a N n	Сообщение о нарушении выполнения уравнения неразрывности.	Обратиться к разработчикам.
45	Число ячеек превысит МаксЧислоЯчеек: n после адаптации сетки. Адаптация сетки не будет выполнена.	Пользователь установил ограничение на максимальное количество ячеек после адаптации. При адаптации программа затребовала большее число ячеек и прервала проведение адаптации.	Изменить ограничение на максимальное количество ячеек.
46	Невозможно закольцевать контур в указанной плоскости! Немного измените координаты плоскости.	Невозможно построить график вдоль кривой в данной плоскости.	Изменить положение плоскости.

Номер ошибки	Сообщение, выдаваемое на экран	Описание ошибки	Возможные пути устранения
61	Установлено пересечение подвижного тела с расчетной областью, первая ячейка $I=n$ $J=n$ $K=n$ $P =n$	Сообщение о пересечении подвижного тела с областью расчета.	Изменить положение или размеры фильтра подвижного тела.
62	Площадь образа скользящей или периодической поверхности Name в ячейке отличается от оригинала Ячейка: n:n:n Родитель n Ошибка вычисления площади a %	Исходная площадь поверхности одной подобласти, попавшей в ячейку с индексами n:n:n , отличается от площади проекции этой поверхности на связанную с ней поверхность другой подобласти: $a = \frac{S_{original} - S_{projection}}{S_{original}} \cdot 100$	Скорректировать геометрию - для поверхностей, по которым на которых заданы связанные граничные условия: 1. проверить равны ли их площади, 2. сделать фасеточное представление подробнее.
65	Встречена и пропущена повторяющаяся плоскость начальной сетки (coord = value)	В считываемом файле была повторно встречена плоскость сетки по координате coord со значением value .	Исправить координаты сеточных линий.
66	Границы начальной сетки по координате coord отличаются от границ региона, поэтому она была автоматически трансформирована.	Считываемая сетка по координате coord не соответствует границам региона (вылезает из него, или наоборот, имеет меньший размер), и для соответствия региону она была "вписана" регион, то есть соответствующим образом сдвинута и промасштабирована.	Проверить масштабированные координаты сеточных линий и при необходимости исправить.
69	Частицы не рассчитываются	Фильтр Начальное распределение частиц создается при неотмеченном "уравнении" Частицы	Отметить Частицы в окне Изменить модель , загрузить Вещество частиц из базы данных и задать все параметры, определяющие частицы.
52001	Невозможно рассчитать среднюю нормаль Ячейка: n, n, n, Дочерняя ячейка n	В модуле радиации "Поверхность-поверхность" осредненная нормаль к поверхностям, входящим в ячейку, равна 0.	Изменить расчетную сетку.

3 Теория

3.1 Основные обозначения

Во всех моделях **FlowVision** используются следующие основные обозначения:

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность	Прим.
t	Время		[с]	
$T_{abs}=T+T_{ref}$	Абсолютная температура		[К]	
$T_{ref}=T_{abs}-T$	Опорная температура		[К]	
$T=T_{abs}-T_{ref}$	Относительная температура	Температура	[К]	
g	Вектор силы тяжести		[м·с ⁻²]	
h_{lev}	Высота столба жидкости, отсчитываемая от "дна" расчетной области		[м]	
h	Высота столба жидкости, отсчитываемая от "дна" расчетной области, на которой $P_{hst}=0$		[м]	
ρ_{hyd}	Гидростатическая плотность		[кг·м ⁻³]	
$P_{hyd} = \rho_{hyd}g(h_{lev} - h)$	Гидростатическое давление		[Па]	
P_{abs}	Абсолютное давление		[Па]	1
$P_{hst}=P_{abs}-P_{ref}$	Давление с учетом гидростатики	ДавлениеСГСТ	[Па]	
$P_{ref}=P_{abs}-P_{hst}$	Опорное давление		[Па]	
$P=P_{hst}-P_{hyd}$	Относительное давление	Давление	[Па]	
\mathbf{v}	Вектор относительной скорости	Скорость	[м·с ⁻¹]	
\mathbf{v}_{abs}	Вектор абсолютной скорости	АбсСкорость	[м·с ⁻¹]	
\mathbf{v}	Модуль скорости	МодСкорости	[м·с ⁻¹]	
\mathbf{v}_{abs}	Модуль абсолютной скорости	МодАбсСкорости	[м·с ⁻¹]	
\mathbf{v}_{rel}	Модуль относительной скорости	МодОтнСкорости	[м·с ⁻¹]	
$T_{tot} = T + \frac{V_{abs}^2}{2C_p}$	Полная температура	ПолнаяТемпература	[К]	2
$P_{tot} = \begin{cases} P_{abs} + \frac{\rho V_{abs}^2}{2} - P_{ref}, \text{ кроме FC} \\ P_{abs} \left(\frac{T_{tot} + T_{ref}}{T + T_{ref}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - P_{ref}, \text{ для FC} \end{cases}$	Полное давление	ПолноеДавление	[Па]	1,3
$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$	Число Прандтля			4
$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$	Число Рейнольдса			5
D	Коэффициент диффузии			
$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$	Число Шмидта			

Примечания:

1 FC – модель [Полностью сжимаемая жидкость](#).

2 определение C_p см. в разделе [Смесь веществ](#).

- 3 определение γ см. в разделе [Полностью сжимаемая жидкость](#).
- 4 определение C_p , μ и λ см. в разделе [Смесь веществ](#).
- 5 определение ρ и μ см. в разделе [Смесь веществ](#); U – характерный масштаб скорости, L – характерный размер.

Остальные обозначения вводятся в тех моделях, в рамках которых они используются.

3.2 Свойства веществ

FlowVision позволяет рассчитывать как течения чистых веществ, так и смесей. Во всех моделях, кроме [Модели горения](#) и [Модели 2-фазного горения](#) возможно задание двух веществ.

Физические свойства чистых веществ задаются в окнах **Физические параметры Вещество0**, **Вещество1**.

Состав смеси определяется заданием концентрации, причем концентрация может быть как массовой, так и объемной (подробнее см. раздел [Смесь веществ](#)). Для того, чтобы появилась возможность расчета двух веществ, необходимо в окне **Выбор модели** в таблице уравнений проставить галочки около уравнения для концентрации. Затем в окне **Физические параметры Параметры модели Массоперенос** выбрать модель массопереноса и при необходимости задать число Шмидта (если необходимо учесть диффузию одного компонента смеси в другом).

3.2.1 Чистые вещества

Существуют несколько возможностей задания свойств вещества:

1. константа,
2. линейная зависимость от температуры,
3. функция от любых рассчитываемых переменных,
4. внешняя функция,
5. табличное задание с помощью **Базы Веществ**.

Использование первых четырех возможностей и редактирование **Базы Веществ** см. в томе [Руководство пользователя](#).

В **Базе Веществ** свойства задаются табличным образом, как функции температуры и давления:

$$(1) \quad f = f(T_{abs}, P_{abs}),$$

Исключение составляет теплота образования:

$$(2) \quad h_i^0 = h_i(T_0),$$

которая задается при $T_0=298.15$ К.

Энтальпия i -ой компоненты смеси рассчитывается следующим образом:

$$(3) \quad h_i = h_i^0 + \int_{T_0}^{T_{abs}} C_p^{(i)} dT,$$

где $C_p(i)$ – удельная теплоемкость i -ой компоненты, Дж·кг⁻¹·К⁻¹.

Для вычисления плотности, кроме указанных способов, используется еще уравнение состояния идеального газа:

$$(4) \quad P_{abs} = \frac{\rho R_0 T_{abs}}{M},$$

где M – молекулярный вес, г·моль⁻¹,

$R_0 = 8314.41$ Дж·кмоль⁻¹·К⁻¹ – универсальная газовая постоянная.

3.2.2 Смесь веществ

Состав смеси определяется заданием концентрации (C), причем концентрация может быть как массовой, так и объемной:

- массовая концентрация свойства смеси определяются через массовые концентрации ее компонент (y_i):

$$y_0 = 1 - C \quad \text{– массовая концентрация Вещества\#0}$$

$$y_1 = C \quad \text{– массовая концентрация Вещества\#1}$$

- объемная концентрация свойства смеси определяются через молярные концентрации ее компонент (x_i):

$$x_0 = 1 - C \quad \text{– молярная концентрация Вещества\#0}$$

$$x_1 = C \quad \text{– молярная концентрация Вещества\#1}$$

Физические свойства многокомпонентной смеси определяются следующим образом:

Определение	Название	Переменная	Размерность
$\lambda = \sum_{i=0}^{N-1} x_i \lambda_i$	Коэффициент теплопроводности		[Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]
$\mu = \sum_{i=0}^{N-1} x_i \mu_i$	Динамическая вязкость		[кг·м ⁻¹ ·с ⁻¹]
$C_p = \sum_{i=0}^{N-1} y_i C_p^{(i)}$	Удельная теплоемкость		[Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹]
$\rho = \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{y_i}{\rho_i} \right)^{-1} = \sum_{i=0}^{N-1} x_i \rho_i$	Плотность	Плотность	[кг·м ⁻³]
$M = \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{y_i}{M_i} \right)^{-1}$	Молярная масса		
$h = \sum_{i=0}^{N-1} y_i h_i$	Энтальпия	Энтальпия	[м ² ·с ⁻²]

Примечания к таблице:

N – количество компонент смеси (подразумевается, что $N = 2$ для всех моделей, кроме модели **Горения**),

y_i – массовая концентрация i -ой компоненты смеси,

x_i – молярная концентрация i -ой компоненты смеси.

3.3 Модели FlowVision

Эта глава посвящена описанию математических моделей программного комплекса **FlowVision**. Модели, включенные в **FlowVision**, разделены на две группы – **базовые** и **специальные** модели.

Базовые модели предназначены для моделирования широкого класса гидродинамических явлений. Они описывают движение однородной жидкости при различных скоростях с учетом эффектов сжимаемости, турбулентности и теплопереноса:

- **Твердый материал** предназначена для моделирования теплопереноса и диффузионных процессов в твердом теле. Эта модель используется в задачах сопряженного теплообмена для учета теплопереноса между жидкостью и твердым телом;
- **Ламинарная жидкость** используется для моделирования течений вязкого газа (жидкости) при малых и умеренных числах Рейнольдса при небольших изменениях плотности (приближение Буссинеска);
- **Несжимаемая жидкость** предназначена для моделирования течения газа (жидкости) при больших (турбулентных) числах Рейнольдса и при малых изменениях плотности;
- **Слабосжимаемая жидкость** описывает движение газа при дозвуковых числах Маха и любых изменениях плотности;
- **Полностью сжимаемая жидкость** описывает движение газа при любых числах Маха (до-, транс-, сверх- и гиперзвуковые течения).

Специальные модели предназначены для моделирования движения жидкости (газа) при учете дополнительных физико-химических эффектов, характерных для узкоспециальных приложений:

- **Пористая среда** описывает движение газа при дозвуковых числах Маха и любых изменениях плотности с учетом пористости среды.
- **Модель двухфазного течения жидкости** предназначена для исследования двухфазных течений со свободной поверхностью. Эта модель используется для определения коэффициентов сопротивления кораблей и подводных аппаратов, заполнения форм расплавом металлов и т.д.;
- **Модель горения** используется для моделирования процессов сжигания различных газовых смесей (например, метановоздушных) в горелках и котлах ТЭЦ и определения выбросов оксидов азота.
- **Модель двухфазного горения** описывает процессы горения жидкого и твердого топлива при дозвуковых скоростях течения газа.

Существуют также дополнительные модели:

- **Модели радиационного теплопереноса:**
 - **ПП Излучение** – модель радиационного теплопереноса с поверхности на поверхность.
 - **Излучение в объеме** – модели радиационного теплопереноса в поглощающей и излучающей среде.
- **Модель зазора** – модель, предназначенная для учета сопротивления, создаваемого узким каналом.
- **Частицы** – модель предназначена для моделирования двухфазных течений с частицами. Несущая фаза может быть жидкостью или газом. Частицы могут быть твердыми или жидкими.

В главе описываются различные типы граничных условий, среди которых отметим следующие:

- *периодические условия* учитывают периодическое изменение решения. Их использование может существенно уменьшить расчетную область;
- *сопряженные условия* позволяют моделировать процессы теплообмена между жидкостью и твердым телом. Их использование допускает проведение сквозного расчета для подобластей с различными физическими свойствами.

3.3.1 Модели турбулентности

Во **FlowVision** доступны следующие модели турбулентности:

1. Стандартная k-ε модель,
2. Квадратичная k-ε модель,
3. Низкорейнольдсовая k-ε модель AKN,
4. Низкорейнольдсовая k-ε модель HL,
5. Низкорейнольдсовая k-ε модель LS,
6. SST (Shear Stress Transport),
7. SA (Spalart-Allmaras),

Все модели, кроме SA, можно использовать совместно с моделями **Горения** и **2-фазного горения**.

Выбор модели турбулентности осуществляется в папке **Физические параметры** **Параметры модели** на странице **Турбулентность**.

3.3.1.1 Обозначения

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
b	'Входная' или начальная турбулизация потока	Пульсация	
C_p	Удельная теплоёмкость		$m^2 c^{-2} K^{-1}$
C_r	Константа шероховатости	Константа шероховатости	
E	Постоянная в логарифмическом законе	E, лог. закон	
$g_c = \langle Y'^2 \rangle$	Дисперсия массовой концентрации Вещества1	ПульсацииКонцентрации	
h_s	Эквивалентная "песочная" шероховатость	Шероховатость	мкм
$h_s^+ = \frac{u_\tau h_s}{\nu}$	Безразмерная эквивалентная "песочная" шероховатость		
k	Турбулентная энергия	ТурбулентнаяЭнергия	$m^2 c^{-2}$
$k_\theta = \frac{1}{2} \langle \theta^2 \rangle$			K^2
l	'Входной' или начальный масштаб турбулентности	Масштаб турбулентности, м	м
Pr	Молекулярное число Прандтля		
Pr_t	Турбулентное число Прандтля	Прандтль	
Sc_t	Турбулентное число Шмидта	Шмидт	
$S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$	Удвоенный тензор скоростей деформации		c^{-1}
$T = \langle T \rangle + \theta$	Температура	Температура	К
u_τ	Скорость сдвига		$m c^{-1}$
$u^* = \beta^{*1/4} k^{1/2}$	Опорная скорость при вычислении вязкого напряжения на стенках в случае неравновесной турбулентности ($\nabla_n k _{wall} = 0$)		$m c^{-1}$
V_{ini}	Скорость потока на входе		$m c^{-1}$
V_{ini}	Начальная скорость потока		$m c^{-1}$
$Y = \langle Y \rangle + Y'$	Массовая концентрация Вещества1	Концентрация	
y	Расстояние до ближайшей стенки	РасстояниеДоСтенки	м
$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$	Безразмерное расстояние до ближайшей стенки	Уплюс	
$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} = \frac{\nu}{Pr}$			$m^2 c^{-1}$
$\alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t}$			$m^2 c^{-1}$
$\beta^* = C_\mu = 0.09$ ¹⁾	Часто используемый коэффициент		
ε	Скорость диссипации турбулентной энергии	ТурбулентнаяДиссипация	$m^2 c^{-3}$
$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu(\nabla\sqrt{k})^2$	Изотропная скорость диссипации турбулентной энергии	ТурбулентнаяДиссипация	$m^2 c^{-3}$
ε_θ	Скорость диссипации дисперсии температуры		$K^2 c^{-1}$
$\tilde{\varepsilon}_\theta = \varepsilon_\theta - 2\alpha(\nabla\sqrt{k_\theta})^2$	Приведённая скорость диссипации дисперсии температуры	ДиссипацияПульсаций Температуры	$K^2 c^{-1}$
Φ	Потенциал расстояния	Потенциал расстояния	m^2
φ	Демпфер градиента давления	Демпфер гр-та давления	

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
κ	Постоянная Кармана	Постоянная Кармана	
λ	Молекулярная теплопроводность		кг м с ⁻³ К ⁻¹
μ	Молекулярная динамическая вязкость		кг м ⁻¹ с ⁻¹
μ_t	Турбулентная динамическая вязкость	Турбулентная Вязкость	кг м ⁻¹ с ⁻¹
$\nu = \mu / \rho$	Молекулярная кинематическая вязкость		м ² с ⁻¹
$\nu_t = \mu_t / \rho$	Турбулентная кинематическая вязкость		м ² с ⁻¹
$\langle \theta^2 \rangle$	Дисперсия температуры	Пульсации Температуры	К ²
ρ	Плотность	Плотность	кг м ⁻³
$\tau = \rho u_t^2$	Вязкое напряжение на стенке	Мод Вязких Напряжений	Н м ⁻²
$\omega = \frac{\epsilon}{\beta_w^* k}$	Удельная скорость диссипации турбулентной энергии	Турбулентная Диссипация	с ⁻¹
$\Omega_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$	Удвоенный тензор вращения		с ⁻¹

1) В случае учёта сжимаемости $\beta^* = \beta_w^* (1 + 1.5F(M_t))$, где $\beta_w^* = 0.09$ – см. [Модель SST](#). В [Квадратичной k-ε модели](#) C_μ – переменная.

Индекс 'w' обозначает значение величины на стенке.

3.3.1.2 Стандартная KE модель

Турбулентная вязкость:

$$(1) \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

Уравнения для k и ε:

$$(2) \quad \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \epsilon$$

$$(3) \quad \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V \epsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_w \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Notation:

$$(4) \quad G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$$

$$(5) \quad D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot V + \frac{\rho k}{\mu} \right) \delta_{ij}$$

$$(6) \quad S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

Параметры:

$$\sigma_k = 1; \quad \sigma_\epsilon = 1.3; \quad C_\mu = 0.09; \quad C_1 = 1.44; \quad C_2 = 1.92$$

Литература: [1].

3.3.1.3 Нелинейная (квадратичная) KE модель

Отличия от стандартной k-ε модели:

а) другое выражение для D_{ij} ,

б) переменное C_μ .

Обозначения:

$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu} \right) \delta_{ij} - C_1 \frac{k}{\varepsilon} \left[S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} S_{kl} S_{kl} \right] - C_2 \frac{k}{\varepsilon} \left[\Omega_{ik} S_{kj} + \Omega_{jk} S_{ki} \right] - C_3 \frac{k}{\varepsilon} \left[\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \right]$$

$$C_\mu = \frac{C_{A0}}{C_{A1} + C_{A2} \tilde{S} + C_{A3} \tilde{\Omega}}$$

$$C_1 = \frac{C_{NL1}}{(C_{NL6} + C_{NL7} \tilde{S}^3) C_\mu}$$

$$C_2 = \frac{C_{NL2}}{(C_{NL6} + C_{NL7} \tilde{S}^3) C_\mu}$$

$$C_3 = \frac{C_{NL3}}{(C_{NL6} + C_{NL7} \tilde{S}^3) C_\mu}$$

$$\tilde{S} = \frac{k}{\varepsilon} S$$

$$\tilde{\Omega} = \frac{k}{\varepsilon} \Omega$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} S_{kl} S_{kl}}$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \Omega_{kl} \Omega_{kl}}$$

$$\Omega_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

Параметры:

$$C_{A0} = 0.667, \quad C_{A1} = 1.25, \quad C_{A2} = 1, \quad C_{A3} = 0.9$$

$$C_{NL1} = 0.75, \quad C_{NL2} = 3.75, \quad C_{NL3} = 4.75, \quad C_{NL6} = 1000, \quad C_{NL7} = 1$$

Литература: [2].

3.3.1.4 Низкорейнольдсовая KE модель АКН

Турбулентная вязкость:

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

Уравнения для k и ε :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} \varepsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Обозначения:

$$G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$$

$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu} \right) \delta_{ij}$$

$$S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

$$f_\mu = \left[1 - \exp \left(- \frac{y^k}{14} \right) \right]^2 \left[1 + \frac{5}{R_T^{3/4}} \exp \left\{ - \left(\frac{Re_t}{200} \right)^2 \right\} \right]$$

$$f_2 = \left[1 - \exp \left(- \frac{y^k}{3.1} \right) \right]^2 \left[1 - 0.3 \exp \left\{ - \left(\frac{Re_t}{6.5} \right)^2 \right\} \right]$$

$$(9) \quad Re_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$$

Параметры:

$$\sigma_k = 1.4; \quad \sigma_\varepsilon = 1.4; \quad C_\mu = 0.09; \quad C_1 = 1.5; \quad C_2 = 1.9$$

Литература: [3].

3.3.1.5 Низкорейнольдсовая KE модель HL

Турбулентная вязкость:

$$(1) \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} f_\mu$$

Уравнения для k и $\tilde{\varepsilon}$:

$$(2) \quad \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon - \frac{1}{2} \mu_t \nabla \left[\frac{k}{\tilde{\varepsilon}} \nabla \tilde{\varepsilon} \right]$$

$$(3) \quad \frac{\partial(\rho \tilde{\varepsilon})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} \tilde{\varepsilon}) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \tilde{\varepsilon} \right) + C_1 \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} \mu_t G - C_2 \rho \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{k} - \mu_t \nabla \left[\frac{\tilde{\varepsilon}}{k} \nabla k \right]$$

Обозначения:

$$(4) \quad \tilde{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu(\nabla \sqrt{k})^2$$

$$(5) \quad G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$$

$$(6) \quad D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}$$

$$(7) \quad S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

$$(8) \quad f_\mu = 1 - \exp(-0.01y_\lambda - 0.008y_\lambda^3)$$

$$(9) \quad \sigma_k = 1.4 - 1.1 \exp\left(-\frac{y_\lambda}{10}\right)$$

$$(10) \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 - 1.0 \exp\left(-\frac{y_\lambda}{10}\right)$$

$$(11) \quad y_\lambda = \frac{y}{\sqrt{\nu \frac{k}{\tilde{\varepsilon}}}}$$

Параметры:

$$C_\mu = 0.09; \quad C_1 = 1.44; \quad C_2 = 1.92$$

Литература: [4].

3.3.1.6 Низкорейнольдсовая KE модель LS

Турбулентная вязкость:

$$(1) \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} f_\mu$$

Уравнения для k и $\tilde{\varepsilon}$:

$$(2) \quad \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon$$

$$(3) \quad \frac{\partial(\rho \tilde{\varepsilon})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} \tilde{\varepsilon}) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \tilde{\varepsilon} \right) + C_1 \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} \mu_t G - C_2 f_2 \rho \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{k} + 2 \frac{\mu}{\rho} \mu_t (\Delta V_x + \Delta V_y + \Delta V_z)^2$$

Обозначения:

$$(4) \quad \tilde{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu(\nabla \sqrt{k})^2$$

$$(5) \quad G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$$

$$(6) \quad D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}$$

$$(7) \quad S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

$$(8) \quad f_{\mu} = \exp \left(- \frac{3.4}{(1 + 0.1 Re_t)^2} \right)$$

$$(9) \quad f_2 = 1 - 0.3 \exp(-Re_t^2)$$

$$(10) \quad Re_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$$

Параметры:

$\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$; $C_\mu = 0.09$; $C_1 = 1.44$; $C_2 = 1.92$

Литература: [3].

3.3.1.7 Модель SST (Shear Stress Transport)

Турбулентная вязкость:

$$(1) \quad \mu_t = \rho \frac{0.31k}{\max[0.31\omega, F_2 F_3 S]}$$

Уравнения для k и ω :

$$(2) \quad \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \tilde{P}_k - \rho \beta^* k \omega$$

$$(3) \quad \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla(\rho V \omega) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right) + \rho \alpha G - F_4 \rho \beta \omega^2 + D_\omega$$

Обозначения:

$$(4) \quad S = \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}}$$

$$(5) \quad S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

$$(6) \quad \tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta_\omega^* \rho k \omega), \quad P_k = \mu_t G$$

$$(7) \quad G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$$

$$(8) \quad D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}$$

$$(9) \quad D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega$$

$$(10) \quad F_1 = \tanh(\Phi_1^4)$$

$$(11) \quad F_2 = \tanh(\Phi_2^2)$$

$$(12) \quad \Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta_\omega^* \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega}, \frac{4 \sigma_{\omega,2} \rho k}{D_\omega^* y^2} \right) \right]$$

$$(13) \quad \Phi_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta_\omega^* \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right)$$

$$(14) \quad D_\omega^* = \max \left[2 \sigma_{\omega,2} \rho \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-10} \right]$$

$$(15) \quad F_3 = 1 - \tanh \left[\left(\frac{150 \mu}{\rho y^2 \omega} \right)^4 \right]$$

$$(16) \quad F_4 = \frac{1}{1 + 3.6 \cdot R_i}$$

$$(17) \quad Ri = \frac{\Omega}{S} \left(\frac{\Omega}{S} - 1 \right)$$

$$(18) \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \Omega_{ij} \Omega_{ij}}$$

$$(19) \quad \Omega_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

Здесь y – расстояние до ближайшей стенки.

$$(20) \quad \sigma_k = \frac{1}{F_1 \sigma_{k,1} + (1-F_1) \sigma_{k,2}}$$

$$(21) \quad \sigma_\omega = \frac{1}{F_1 \sigma_{\omega,1} + (1-F_1) \sigma_{\omega,2}}$$

$$(22) \quad \alpha = F_1 \cdot 5/9 + (1-F_1) \cdot 0.44$$

$$(23) \quad \beta^* = \beta_\omega^* (1 + \zeta^* F(M_t))$$

$$(24) \quad \beta = F_1 \cdot 0.075 + (1-F_1) \cdot 0.0828 - \beta_\omega^* \zeta^* F(M_t)$$

$$(25) \quad F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases}$$

$$(26) \quad M_t^2 = \frac{2k}{a^2}$$

Здесь a – скорость звука.

Параметры:

$$\sigma_{k,1} = 0.85, \quad \sigma_{\omega,1} = 0.5, \quad \sigma_{k,2} = 1, \quad \sigma_{\omega,2} = 0.856$$

$$\beta_\omega^* = 0.09$$

$$k = 0.41$$

$$\zeta^* = 1.5, \quad M_{t0} = 0.25$$

Литература: [5].

3.3.1.8 Модель SA (Spalart-Allmaras)

Турбулентная вязкость:

$$(1) \quad \mu_t = \rho \nu_t f_{\nu 1}$$

Уравнение для ν_t :

$$(2) \quad \frac{\partial(\rho \nu_t)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} \nu_t) = \frac{1}{\sigma_\nu} \left[\nabla((\mu + \rho \nu_t) \nabla \nu_t) + C_{b2} \rho |\nabla \nu_t|^2 \right] + C_{b1} \rho \tilde{\Omega} \nu_t - C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\nu_t}{y} \right)^2$$

Обозначения:

$$(3) \quad f_{\nu 1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{\nu 1}^3}$$

$$(4) \quad f_{\nu 2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{\nu 1}}$$

$$(5) \quad \chi = \frac{\nu_t}{\nu}$$

$$(6) \quad \tilde{\Omega} = \Omega + \frac{\nu_t}{\kappa^2 y^2} f_{\nu 2}$$

$$(7) \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \Omega_{kl} \Omega_{kl}}$$

$$(8) \quad \Omega_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

$$(9) \quad f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6}$$

$$(10) \quad g = r + C_{w2} (r^6 - r)$$

$$(11) \quad \Gamma = \frac{\nu_t}{\Omega k^2 y^2}$$

Параметры:

$$C_{b1} = 0.1355, \quad C_{b2} = 0.622, \quad \sigma_v = \frac{2}{3}, \quad C_{v1} = 7.1,$$

$$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{1+C_{b2}}{\sigma_v}, \quad C_{w2} = 0.3, \quad C_{w3} = 2, \quad k = 0.4187$$

Литература: [1].

3.3.1.9 Расстояние до ближайшей стенки

В коэффициенты моделей SST и SA входит расстояние до ближайшей твёрдой поверхности y . В пристенных ячейках эта величина рассчитывается естественным образом. В ячейках нерассечённых стенками y вычисляется по формуле:

$$(1) \quad y = -|\nabla\Phi| + \sqrt{|\nabla\Phi|^2 + 2\Phi}$$

где Φ – потенциал расстояния, определяемый из уравнения:

$$(2) \quad \nabla^2\Phi = -1$$

Граничные условия для уравнения (2) устанавливаются автоматически.

На стенке:

$$(3) \quad \Phi = 0$$

На остальных границах:

$$(4) \quad \nabla_n\Phi = 0$$

3.3.1.10 Пульсации температуры

3.3.1.10.1 Простая модель

Уравнения для k_θ :

$$(1) \quad \frac{\partial(k_\theta)}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}k_\theta) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\rho \left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_{k_\theta}} \right) \nabla k_\theta \right) + \alpha_t (\nabla T)^2 - \varepsilon_\theta$$

Обозначения:

$$(2) \quad \alpha = \frac{\nu}{Pr}$$

$$(3) \quad \alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t}$$

Модель предполагает, что турбулентное число Прандтля $Pr_t = \text{const}$ задаётся в интерфейсе. Величина ε_θ вычисляется из выражения:

$$(4) \quad Pr_t = \frac{C_\mu}{C_\lambda} \sqrt{\frac{1}{Pr} \frac{k_\theta}{\varepsilon}} = 0.9 \sqrt{\frac{1}{Pr} \frac{k_\theta}{\varepsilon}}$$

Данная модель является упрощением модели, описанной ниже.

3.3.1.10.2 Модель 'K-teta - E-teta'

Уравнения для k_θ и $\tilde{\varepsilon}_\theta$:

$$(1) \quad \frac{\partial(k_\theta)}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}k_\theta) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\rho \left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_{k_\theta}} \right) \nabla k_\theta \right) + \alpha_t (\nabla T)^2 - \varepsilon_\theta - \frac{1}{2} \alpha \nabla \left[\frac{k_\theta}{\tilde{\varepsilon}_\theta} \nabla \tilde{\varepsilon}_\theta \right]$$

$$(2) \quad \frac{\partial(\tilde{\varepsilon}_\theta)}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}\tilde{\varepsilon}_\theta) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\rho \left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_{\tilde{\varepsilon}_\theta}} \right) \nabla \tilde{\varepsilon}_\theta \right) + C_{P1} f_{P1} \frac{\tilde{\varepsilon}_\theta}{2k_\theta} \alpha_t (\nabla T)^2 + C_{P2} f_{P2} \frac{\tilde{\varepsilon}_\theta}{k} \nu_t G - C_{D1} f_{D1} \frac{\tilde{\varepsilon}_\theta^2}{2k_\theta} - C_{D2} f_{D2} \frac{\tilde{\varepsilon}_\theta \tilde{\varepsilon}_\theta}{k} - \alpha \nabla \left[\frac{\tilde{\varepsilon}_\theta}{k_\theta} \nabla k_\theta \right]$$

Обозначения и параметры:

$$(3) \quad \tilde{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu(\nabla\sqrt{k})^2$$

$$(4) \quad \tilde{\varepsilon}_\theta = \varepsilon_\theta - 2\alpha(\nabla\sqrt{k_\theta})^2$$

$$(5) \quad \alpha = \frac{\nu}{Pr}$$

$$(6) \quad \alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t} = C_\lambda f_\lambda k \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{Pr \frac{k}{\varepsilon} \frac{k}{\varepsilon}}$$

$$(7) \quad \nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$(8) \quad f_\lambda = 1 - \exp(-0.008y_\lambda - 0.004y_\lambda^2 - 0.005Pr^{1/4}y_\lambda^3)$$

$$(9) \quad f_\mu = 1 - \exp(-0.01y_\lambda - 0.008y_\lambda^3)$$

$$(10) \quad \sigma_{k0} = \sigma_k = 1.4 - 1.1 \exp\left(-\frac{y_\lambda}{10}\right)$$

$$(11) \quad \sigma_{\varepsilon 0} = \sigma_\varepsilon = 1.3 - 1.0 \exp\left(-\frac{y_\lambda}{10}\right)$$

$$C_\mu = 0.09$$

$$C_\lambda = 0.1$$

$$C_{P1} = 1.8$$

$$f_{P1} = 1 - \exp\left(-\frac{y_\lambda}{2}\right)$$

$$C_{P2} = 0.68 + 3.5 \exp(-4.7Pr)$$

$$f_{P2} = 1$$

$$C_{D1} = 2.2$$

$$f_{D1} = 1 - \frac{1}{4.4} \exp\left(-\frac{Re_t}{60}\right)$$

$$C_{D2} = 0.8$$

$$f_{D2} = 1$$

$$Re_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon}$$

$$y_\lambda = \frac{y}{\sqrt{\nu \frac{k}{\varepsilon}}}$$

Выражение для турбулентного числа Прандтля является следствием соотношений (6) и (7):

$$(12) \quad Pr_t = \frac{C_\mu f_\mu}{C_\lambda f_\lambda} \sqrt{\frac{1}{Pr} \frac{k_\theta}{\varepsilon} \frac{k}{\varepsilon}}$$

Т. о., переменное число Прандтля рассчитывается и затем используется в уравнении энергии и уравнениях (1), (2). Строго говоря, данная модель должна использоваться совместно с низко-рейнولدсовой k-ε моделью HL. В текущей реализации её можно использовать совместно со всеми имеющимися моделями турбулентности кроме SA.

Литература: [3].

3.3.1.11 Пульсации концентрации

Уравнение для g_c :

$$(1) \quad \frac{\partial g_c}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} g_c) = \frac{1}{\rho} \nabla(\mu_t \nabla g_c) + Q_g$$

Выражение для источника [6]:

$$(2) \quad Q_g = 2.8 \mu_t (\nabla g_c)^2 - 2 \frac{\rho \varepsilon g_c}{k}$$

3.3.1.12 Пристенные функции

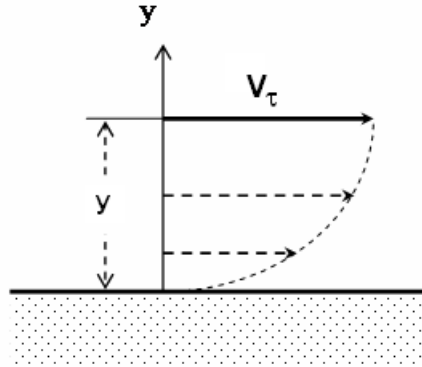
3.3.1.12.1 Скорость

Представим вектор скорости в *приграничной* ячейке в виде суммы двух векторов:

$$(1) \quad \mathbf{V} = \mathbf{V}_n + \mathbf{V}_\tau$$

где \mathbf{V}_n и \mathbf{V} – нормальная и касательная к границе составляющие вектора скорости.

Вблизи стенки касательная составляющая вектора скорости жидкости изменяется от величины \mathbf{V} до нуля (условие прилипания):



Касательная составляющая скорости жидкости вблизи стенки.

Введем безразмерное расстояние до стенки:

$$(2) \quad y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$$

где скорость сдвига u_τ :

$$(3) \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

Вязкий подслой:

$$(4) \quad y^+ < 2.5 + 3$$

Здесь

$$(5) \quad \tau = \rho u_\tau^2 = \mu \frac{|V_\tau|}{y}$$

или иначе $u^+ = y^+$,

$$\text{где } u^+ = \frac{|V_\tau|}{u_\tau}$$

Логарифмический подслой:

$$(6) \quad 30 < y^+ < 300$$

Здесь

$$(7) \quad u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+)$$

Уравнение (7) используется для нахождения u_τ по известным $|V_\tau|$ и y , после чего вычисляется вязкое напряжение по формуле (5).

Сшивка:

Буферный слой располагается в интервале:

$$(8) \quad 3 < y^+ < 30$$

Здесь производится сшивка линейного (вязкого) и логарифмического профилей скорости, определяемая уравнением:

$$(9) \quad y_*^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey_*^+)$$

Таким образом, для $y^+ < y_*^+$ вязкое напряжение на стенке вычисляется по формуле $\tau = \mu \frac{V_\tau}{y}$,

для $y^+ > y_*^+$ вязкое напряжение на стенке вычисляется по формуле $\tau = \rho u_\tau^2$.
 Значениям по умолчанию $\kappa = 0.41$, $E = 9$ соответствует $y_*^+ = 11.266$

3.3.1.12.2 Тепловой поток

При турбулентном теплообмене со стенкой температурный пограничный слой моделируется с использованием пристеночной функции, предложенной в работе [7].

Введем безразмерную величину:

$$(1) \quad T^+ = \frac{T - T_w}{q_w} \rho u_\tau C_p$$

где T_w – температура стенки, T – температура в ячейке, примыкающей к стенке, q_w – тепловой поток на стенке.

Вязкий подслой:

$$(2) \quad T_{lam}^+ = Pr \cdot y^+$$

Логарифмический подслой:

$$(3) \quad T_{turb}^+ = Pr_t \cdot \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) + 9.24 \left[\left(\frac{Pr}{Pr_t} \right)^{3/4} - 1 \right] \left[1 + 0.28 \exp \left(-0.007 \frac{Pr}{Pr_t} \right) \right] \right\}$$

Сшивка:

$$(4) \quad T^+ = \exp(\Gamma) \cdot T_{lam}^+ + \exp\left(\frac{1}{\Gamma}\right) \cdot T_{turb}^+,$$

где

$$(5) \quad \Gamma = - \frac{a(Pr \cdot y^+)^4}{1 + b \cdot Pr^3 y^+},$$

$a=0.01$, $b=5$.

3.3.1.12.3 Турбулентная энергия

Вязкий подслой:

$$(1) \quad k \sim y^2$$

Логарифмический подслой:

$$(2) \quad k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

Сшивка:

$$(3) \quad k = \frac{\left(\min \left(\frac{y^+}{y_*^+}, 1 \right) u_\tau \right)^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

3.3.1.12.4 Удельная турбулентная диссипация

Вязкий подслой:

$$(1) \quad \omega_{lam} = \frac{80\nu}{y^2} \quad \text{для Стандартной k-ε, Квадратичной k-ε, и SST моделей}$$

$$\omega_{lam} = \frac{22.222\nu}{y^2} \quad \text{для Низко-Рейнольдсовых k-ε моделей AKM, HL, LS}$$

Логарифмический подслой:

$$(2) \quad \omega_{turb} = \frac{u_\tau}{\sqrt{\beta^*} \kappa y}$$

Сшивка:

$$(3) \quad \omega = \exp(\Gamma) \cdot \omega_{\text{lam}} + \exp\left(\frac{1}{\Gamma}\right) \cdot \omega_{\text{turb}}$$

$$(4) \quad \Gamma = -\frac{a(y^+)^4}{1+by^+}$$

$a=0.01, b=5.$

3.3.1.12.5 Турбулентная диссипация

Вязкий подслой, логарифмический подслой, буферный подслой:

$$(1) \quad \varepsilon = \beta^* k\omega$$

3.3.1.13 Учет шероховатости

Шероховатость поверхности стенки приводит к увеличению сопротивления, оказываемого такой стенкой движению жидкости, по сравнению с гладкой стенкой. При этом шероховатость может быть равномерной ("песочной") и неравномерной. Оба вида шероховатости различают по форме бугорков, их размерам, промежуткам между ними и т.д. Ввиду того, что геометрические характеристики шероховатости не могут в достаточной степени определять сопротивление стенки, введено понятие об эквивалентной "песочной" шероховатости h_s , которая определяется путем измерения сопротивления. Под эквивалентной "песочной" шероховатостью понимается тот размер зерен песка, который дает такой же коэффициент сопротивления, как и фактическая шероховатость (песочная шероховатость использовалась Н. Никурадзе в опытах по определению сопротивления в шероховатых трубах). Во **FlowVision** эквивалентная "песочная" шероховатость задается в мкм.

Введем понятие безразмерной эквивалентной "песочной" шероховатости:

$$(1) \quad h_s^+ = \frac{u_\tau h_s}{\nu}$$

При течении в шероховатых трубах следует различать три режима [8]:

1. Режим без проявления шероховатости, при котором

$$0 \leq h_s^+ \leq 5$$

Сопротивление зависит только от Re.

Размеры зерен, образующих шероховатость при таком гидравлически гладком режиме, столь малы, что все выступы элементов шероховатости лежат внутри вязкого подслоя.

2. Переходный режим, при котором

$$5 \leq h_s^+ \leq 70$$

Сопротивление зависит от шероховатости и Re.

Элементы шероховатости частично выступают из вязкого подслоя. Дополнительное, по сравнению с гладкими трубами, сопротивление возникает в основном вследствие сопротивления формы элементов шероховатости, выступающих из вязкого подслоя.

3. Режим с полным проявлением шероховатости, при котором

$$h_s^+ > 70$$

Сопротивление определяется преимущественно шероховатостью.

Все элементы шероховатости выступают из вязкого подслоя. Преобладающая доля сопротивления стенки – сумма сопротивлений отдельных элементов шероховатости.

3.3.1.13.1 Скорость

Влияние шероховатости на профиль скорости учитывается посредством введения эффективной молекулярной вязкости [9]:

$$(1) \quad \mu_{\text{eff}} = \mu + C_r \rho u_\tau h_s$$

Здесь h_s – эквивалентная песочная шероховатость, задаваемая на странице **Скорость** граничного условия **Стенка**, C_r – **Константа шероховатости**, задаваемая на странице **Физические параметры**

Параметры модели **Дополнительно**. По умолчанию $C_r = 0.246$. В области действия линейного профиля, как и в случае гладкой стенки, u находится из уравнения:

$$(2) \quad \rho u_\tau^2 = \mu \frac{|V_x|}{y}$$

а в области действия логарифмического профиля – из уравнения:

$$(3) \quad \frac{|V_x|}{u_\tau} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{E y^+}{1 + C_r h_s^+} \right),$$

где

$$(4) \quad h_s^+ = \frac{u_\tau h_s}{\nu}$$

При этом безразмерное расстояние до стенки y^+ , где сшиваются линейный и логарифмический профили, меняется: чем больше h_s^+ , тем меньше y^+ .

3.3.1.13.2 Тепловой поток

Влияние шероховатости на тепловой поток учитывается коррекцией коэффициентов [a](#) и [b](#):

$$(1) \quad a = 0.01 \cdot c$$

$$(2) \quad b = \frac{5}{c}$$

где

$$(3) \quad c = \exp(C_r \cdot h_s^+)$$

3.3.1.13.3 Удельная турбулентная диссипация

Влияние шероховатости на удельную турбулентную диссипацию учитывается коррекцией коэффициентов [a](#) и [b](#):

$$(1) \quad a = 0.01 \cdot c$$

$$(2) \quad b = \frac{5}{c}$$

где

$$(3) \quad c = \exp(C_r \cdot h_s^+)$$

Таким образом,

$$(4) \quad \omega = \exp(\Gamma) \cdot \omega_{lam} + \exp\left(\frac{1}{\Gamma}\right) \cdot \omega_{turb}$$

$$(5) \quad \Gamma = -\frac{a(y^+)^4}{1 + by^+}$$

$$(6) \quad \omega_{lam} = \frac{80\nu}{y^2}$$

для Стандартной k-ε, Квадратичной k-ε, и SST моделей

$$\omega_{lam} = \frac{22.222\nu}{y^2}$$

для Низко-Рейнольдсовых k-ε моделей AKM, HL, LS

$$(7) \quad \omega_{turb} = \frac{u_\tau}{\sqrt{\beta^* k y}}$$

3.3.1.14 Влияние градиента давления

Влияние градиента давления учитывается с помощью дополнительного члена в эффективном напряжении трения на стенке:

$$(1) \quad \tau_{w,eff} = \rho u_\tau u^* + y \cdot \nabla_\tau P \cdot \varphi, \quad \varphi > 0$$

Здесь первое слагаемое – напряжение трения, полученное с помощью пристенной функции для V_τ . Если на стенке для k задано условие **Значение в ячейке рядом со стенкой**, то $u^* = u_\tau$. Если на стенке для k задано условие **Нулевой поток**, то

$$(2) \quad u^* = \beta^{*1/4} k^{1/2}$$

Коэффициент $\varphi = \text{Демпфер гр-та давления}$ позволяет управлять местом отрыва потока.

Если давление падает в направлении потока, $y \cdot \nabla_\tau P \cdot \varphi < 0$, и, таким образом, эффективное напряжение трения меньше значения, полученного с помощью пристенной функции для V_τ . Если давление растёт в направлении потока, $y \cdot \nabla_\tau P \cdot \varphi > 0$, поток тормозится, и происходит отрыв.

Чтобы отключить учёт градиента давления в эффективном напряжении трения, задайте значение параметра **Учёт градиента давления** (на странице **Параметры модели Дополнительно**) = 0. Чтобы учесть только положительный градиент давления (не учитывая отрицательный), задайте **Учёт градиента давления** = 1. Чтобы учесть и положительный, и отрицательный градиенты давления, задайте **Учёт градиента давления** = 2.

3.3.1.15 Параметры

Физические параметры задаются в папке **Физические параметры** **Параметры модели**.

На странице **Турбулентность**

- выбирается модель турбулентности,
- задаются значения Pr_t и Sc_t ,
- выбирается модель пульсаций температуры.

На странице **Дополнительно** задаются следующие параметры:

Обозначение	Название	Имя в FlowVision	Размерность
	Максимальная турбулентная кинематическая вязкость	Макс. турб. кин. вязкость	$m^2 \cdot c^{-1}$
	Параметр, включающий/выключающий градиент давления	Учёт гр-та давления	
φ	Демпфер градиента давления	Демпфер гр-та давления	
y_{min}^+	Минимальное безразмерное расстояние до ближайшей стенки	y+мин	
$h_{s,min}^+$	Минимальная безразмерная эквивалентная "песочная" шероховатость	Шероховатость+мин	
κ	Постоянная Кармана	Постоянная Кармана	
E	Постоянная E в логарифмическом законе	E, лог. закон	
C_r	Константа шероховатости в выражении для эффективной вязкости	Константа шероховатости	
	Параметр, выключающий/включающий расчёт расстояния до стенки в пристенных ячейках через потенциал расстояния *)	y_wall через потенциал расстояния (да = 1, нет = 0)	
	Минимальная турбулентная кинематическая вязкость	Мин. турб. кин. вязкость	$m^2 \cdot c^{-1}$
C_1	Коэффициент при генерационном члене в уравнении для ε в $k-\varepsilon$ моделях турбулентности	Ce1	

*) Значение '0' включает следующий способ вычисления расстояния:

$$(1) \quad y = \frac{1}{2} \left(|n_x| dx + |n_y| dy + |n_z| dz \right)$$

где dx, dy, dz - линейные размеры ячейки, $n_{x,y,z}$ - компоненты эффективной нормали:

$$(2) \quad \bar{n} = \frac{\bar{n}'}{|\bar{n}'|}$$

$$(3) \quad \bar{n}' = \sum_{i=chips} \bar{n}_i s_i$$

Суммирование в (3) производится по 'осколкам' фасеток, обрезанных данной ячейкой, s_i - площади 'осколков'.

3.3.1.16 Граничные условия

При использовании моделей турбулентности к списку граничных условий для **Скорости** на непроницаемой стенке добавляются условия:

- Стенка, логарифмический закон,**
- Вращающаяся стенка, логарифмический закон,**
- Тангенц. закрутка, лог. закон,**
- Танг. скорость, лог. закон,**

Шероховатая стенка.

В этих условиях надо задавать эквивалентную 'песочную' шероховатость > 0 , если известно, что стенка негладкая.

Специальные граничные условия (**Симметрия, Период, Скольжение**) для k , ε , ω , τ задаются так же, как для других скалярных переменных.

3.3.1.16.1 Модели KE**Вход**

- Вариант 1

Значение на стенке для k :

$$(1) \quad k = k_{inl}$$

Значение на стенке для ε :

$$(2) \quad \varepsilon = \varepsilon_{inl}$$

- Вариант 2

Пульсация для k :

$$(3) \quad k = \frac{(b|V_{inl}|)^2}{2}$$

Пользователь задает безразмерный параметр b :

$b < 0.03$ – низкая турбулизация потока,

$0.03 < b < 0.05$ – средняя турбулизация потока,

$0.05 < b < 0.$ – высокая турбулизация потока.

V_{inl} – скорость потока на входе.

Масштаб турбулентности, l для ε :

$$(3) \quad \varepsilon = C_\mu \frac{k^{3/2}}{l}$$

Пользователь задает размерный масштаб турбулентности, который можно оценить следующим образом:

$$(4) \quad l = I \cdot d$$

$I < 0.03$ – низкая турбулизация потока,

$0.03 < I < 0.1$ – средняя турбулизация потока,

$0.1 < I < 0.2$ – высокая турбулизация потока.

d – характерный линейный размер задачи.

Выход

Нулевой поток для k :

$$(5) \quad \nabla_n k = 0$$

Нулевой поток для ε :

$$(6) \quad \nabla_n \varepsilon = 0$$

Стенка

- Вариант 1 (равновесная турбулентность)

Значение в ячейке рядом со стенкой для k (пользователю ничего задавать не надо):

$$(7) \quad k = \frac{\left(\min \left(\frac{y^+}{y_t^+}, 1 \right) u_t \right)^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

Значение в ячейке рядом со стенкой для ε (пользователю ничего задавать не надо):

$$(8) \quad \varepsilon = \beta^* k \omega,$$

где

$$(9) \quad \omega = \exp(\Gamma) \cdot \omega_{lam} + \exp\left(\frac{1}{\Gamma}\right) \cdot \omega_{turb}$$

$$\Gamma = \frac{a(y^+)^4}{1 + by^+}$$

$$a = 0.01 \cdot c$$

$$b = \frac{5}{c}$$

$$c = \exp(C_r \cdot h_s^+)$$

$$(10) \quad \omega_{lam} = \frac{80\nu}{y^2} \quad \text{для Стандартной и Квадратичной k-\varepsilon моделей}$$

$$\omega_{lam} = \frac{22.222\nu}{y^2}$$

для Низкорейнольдсовых k-\varepsilon моделей AKM, HL, LS

$$(11) \quad \omega_{turb} = \frac{U_T}{\sqrt{\beta^* k y}}$$

Таким образом, значение ε в пристенной ячейке вычисляется через ω . Данная комбинация имеет смысл в сочетании с граничными условиями ..., **логарифмический закон для Скорости**.

- Вариант 2 (неравновесная турбулентность)

Нулевой поток для k :

$$(12) \quad \nabla_n k = 0$$

Значение в ячейке рядом со стенкой для ε (пользователю ничего задавать не надо) – см. выражения (8), (9) где

$$(13) \quad \omega_{turb} = \frac{u^*}{\sqrt{\beta^* k y}},$$

$$(14) \quad u^* = \beta^{*1/4} k^{1/2}$$

Данная комбинация имеет смысл в сочетании с граничными условиями ..., **логарифмический закон для Скорости**.

- Вариант 3 (низкорейнольдсовый режим)

Значение на стенке для k :

$$(15) \quad k = 0$$

Значение в ячейке рядом со стенкой для ε (пользователю ничего задавать не надо) - см. выражение (8), где

$$(16) \quad \omega = \omega_{lam}$$

ω_{lam} определена выражением (10).

Данная комбинация имеет смысл при сеточном разрешении ламинарного подслоя в сочетании с условием прилипания (**Стенка**) для **Скорости**.

- Вариант 4 (низкорейнольдсовый режим)

Значение на стенке для k :

$$(17) \quad k = 0$$

Значение на стенке для $\tilde{\varepsilon}$:

$$(18) \quad \tilde{\varepsilon} = 0$$

Данная комбинация имеет смысл для Низкорейнольдсовых k-\varepsilon моделей HL, LS при сеточном разрешении ламинарного подслоя в сочетании с условием прилипания (**Стенка**) для **Скорости**.

3.3.1.16.2 Модель SST

Вход

- Вариант 1

Значение на стенке для k :

$$(1) \quad k = k_{ini}$$

Значение на стенке для ω :

$$(2) \quad \omega = \omega_{ini}$$

- Вариант 2

Пульсация для k :

$$(3) \quad k = \frac{b |V_{ini}|^2}{2}$$

Пользователь задает безразмерный параметр b :

$b < 0.03$ – низкая турбулиизация потока,

$0.03 < b < 0.05$ – средняя турбулиизация потока,

$0.05 < b < 0.1$ – высокая турбулиизация потока.

V_{ini} – скорость потока на входе.

Масштаб турбулентности, m для ω :

$$(4) \quad \omega = \frac{k^{1/2}}{l}$$

Пользователь задает размерный масштаб турбулентности, который можно оценить следующим образом:

$$l = l \cdot d$$

$l < 0.03$ – низкая турбулизация потока,
 $0.03 < l < 0.1$ – средняя турбулизация потока,
 $0.1 < l < 0.2$ – высокая турбулизация потока.
 d – характерный линейный размер задачи.

Выход

Нулевой поток для k :

$$(5) \quad \nabla_n k = 0$$

Нулевой поток для ω :

$$(6) \quad \nabla_n \omega = 0$$

Стенка

- Вариант 1 (равновесная турбулентность)

Значение в ячейке рядом со стенкой для k (пользователю ничего задавать не надо):

$$(7) \quad k = \frac{\left(\min \left(\frac{y^+}{y_s^+}, 1 \right) u_\tau \right)^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

Значение в ячейке рядом со стенкой для ω (пользователю ничего задавать не надо):

$$(8) \quad \omega = \exp(\Gamma) \cdot \omega_{\text{lam}} + \exp(\Gamma^{-1}) \cdot \omega_{\text{turb}}$$

$$\Gamma = - \frac{a(y^+)^4}{1 + by^+}$$

$$a = 0.01 \cdot c$$

$$b = \frac{5}{c}$$

$$c = \exp(C_r \cdot h_s^+)$$

$$(9) \quad \omega_{\text{lam}} = \frac{80\nu}{y^2}$$

$$(10) \quad \omega_{\text{turb}} = \frac{u_\tau}{\sqrt{\beta^*} k y}$$

Данная комбинация имеет смысл в сочетании с граничными условиями ..., **логарифмический закон для Скорости**.

- Вариант 2 (неравновесная турбулентность)

Нулевой поток для k :

$$(11) \quad \nabla_n k = 0$$

Значение в ячейке рядом со стенкой для ω (пользователю ничего задавать не надо) – см. Выражение (8), где

$$(12) \quad \omega_{\text{turb}} = \frac{u^*}{\sqrt{\beta^*} k y},$$

$$(13) \quad u^* = \beta^{*1/4} k^{1/2}$$

Данная комбинация имеет смысл в сочетании с граничными условиями ..., **логарифмический закон для Скорости**.

- Вариант 3 (низкорейнольдсовый режим)

Значение на стенке для k :

$$(14) \quad k = 0$$

Значение в ячейке рядом со стенкой для ω (пользователю ничего задавать не надо):

$$(15) \quad \omega = \omega_{\text{lam}}$$

где ω_{lam} определена выражением (9). Данная комбинация имеет смысл при сеточном разрешении ламинарного подслоя в сочетании с условием прилипания (**Стенка**) для **Скорости**.

- Вариант 4 (низкорейнольдсовый режим)

Значение на стенке для k :

$$(16) \quad k = 0$$

Авт. усл-е на стенке для ω (пользователю ничего задавать не надо):

$$(17) \quad \omega_w = \begin{cases} \frac{u_t^2}{\nu} \frac{2500}{h_s^{+2}} & h_s^+ < 25 \\ \frac{u_t^2}{\nu} \frac{100}{h_s^+} & h_s^+ \geq 25 \end{cases}$$

$$h_s^+ = \max(h_s^+, h_{s,min}^+)$$

Данная комбинация имеет смысл при сеточном разрешении ламинарного подслоя в сочетании с условием прилипания (**Стенка**) для **Скорости**.

3.3.1.16.3 Модель SA

Вход

- Вариант 1

Значение на стенке для v_t :

$$(1) \quad v_t = v_{t,wall}$$

- Вариант 2

Нью турб. по двум параметрам для v_t :

$$(2) \quad v_t = \sqrt{0.5b} |V_{inl}|$$

Пользователь задает безразмерный параметр b :

$b < 0.03$ – низкая турбулизация потока,

$0.03 < b < 0.05$ – средняя турбулизация потока,

$0.05 < b < 0.1$ – высокая турбулизация потока.

V_{inl} – скорость потока на входе.

Пользователь задает размерный масштаб турбулентности, который можно оценить следующим образом:

$$(3) \quad l = I \cdot d$$

$I < 0.03$ – низкая турбулизация потока,

$0.03 < I < 0.1$ – средняя турбулизация потока,

$0.1 < I < 0.2$ – высокая турбулизация потока.

d – характерный линейный размер задачи.

Выход

Нулевой поток для v_t :

$$(4) \quad \nabla_n v_t = 0$$

Стенка

Значение на стенке для v_t :

$$(5) \quad v_t = 0$$

3.3.1.16.4 Пульсации

Для переменных **Пульсации Температуры**, **Диссипация Пульсаций Температуры** и **Пульсации Концентрации** в типах границ **Стенка**, **Вход/Выход**, **Свободный выход** имеют смысл граничные условия:

- **Значение на стенке**
- **Нулевой поток**

Кроме того, для **Диссипации Пульсаций Температуры** в типе границ **Стенка** определено условие

- **Значение в ячейке рядом со стенкой**

которое предполагает следующее соотношение в пристенных ячейках

$$(1) \quad \varepsilon_0 = \varepsilon \frac{k_0}{k} \frac{1}{Pr}$$

Отметим, что, согласно теории,

$$(2) \quad \frac{\varepsilon/k}{\varepsilon_0/k_0} \rightarrow Pr \quad \text{при } y \rightarrow 0$$

Отметим также, что закладка для **Диссипации Пульсаций Температуры** появляется в граничных условиях только если в папке **Физические параметры** **Параметры модели** на странице **Турбулентность** выбрана модель **Т-пульсации = 'K-teta - E-teta'**.

3.3.1.17 Начальные условия

Для всех моделей пользователь задает **начальную турбулилизацию потока**, через безразмерный параметр $0 \leq b_{ini} \leq 1$:

- $b < 0.03$ – низкая турбулизация потока,
- $0.03 < b < 0.05$ – средняя турбулизация потока,
- $0.05 < b < 0.1$ – высокая турбулизация потока.

и **начальный размерный масштаб турбулентности**, который можно оценить следующим образом:

- (1) $l = l \cdot d$
- $l < 0.03$ – низкая турбулизация потока,
- $0.03 < l < 0.1$ – средняя турбулизация потока,
- $0.1 < l < 0.2$ – высокая турбулизация потока.
- d – характерный линейный размер задачи.

Остальные величины определяются автоматически по этим двум параметрам в зависимости от используемой модели турбулентности:

Модели KE

$$(2) \quad k_{ini} = \frac{(b|V_{ini}|)^2}{2}$$

$$(3) \quad \varepsilon_{ini} = C_\mu \frac{k_{ini}^{3/2}}{l}$$

Здесь V_{ini} – начальная скорость потока.

Модель SST

$$(4) \quad k_{ini} = \frac{(b|V_{ini}|)^2}{2}$$

$$(5) \quad \omega_{ini} = \frac{k_{ini}^{1/2}}{l}$$

Модель SA

$$(6) \quad v_{t,ini} = \sqrt{0.5} |V_{ini}| b l$$

Значения по умолчанию:

$$b = 0.03, \quad l = 0.001$$

Для стабильного счёта на первых шагах по времени не рекомендуется задавать

$$b = 0, \quad l = 0$$

3.3.1.18 Литература

1. Wilcox, D. C. "Turbulence modeling for CFD," *DCW Industries, Inc.*, 460 p, 1994.
2. Lien, F.S., Chen, W.L., and Leschziner, 1996, M.A. "Low-Reynolds-Number Eddy-Viscosity Modelling Based on Non-Linear Stress-Strain/Vorticity Relations," *Proc. 3rd Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Crete, Greece*.
3. Jagadeesh, P. and Murali, K., 2005, "Application of Low-Re Turbulence Models for Flow simulations past Underwater Vehicle Hull Forms," *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, June 2005*, pp. 41-54.
4. Hwang, C.B., Lin, C.A., 1999, "A low Reynolds number two-equation k_0 - ε_0 model to predict thermal fields" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 3217-3230.

5. Menter, F.R., Kuntz, M., and Langtry, R., 2003, "Ten years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, Begell House, Inc.*
6. Gupta A.K., Lilley D.G., and Syred N., "Swirl Flows," *Abacus Press*, 1984.
7. Kader B.A., 1981, "Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24(9), pp.1541-1544.
8. Шлихтинг Г. "Теория пограничного слоя," *М.: Наука*, 712 с., 1974.
9. Souders, D. T. and Hirt C.W., "Modeling Roughness Effects in Open Channel Flows," *FSI-02-TN60*, 10 p.

3.3.2 Твердый материал

Данная модель предназначена для расчета теплопереноса и массопереноса примеси в твердой фазе. Уравнения массопереноса и энергии связаны между собой через зависимость коэффициентов переноса от температуры и концентрации примеси.

3.3.2.1 Обозначения

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность	Прим.
C	Массовая концентрация	Концентрация		
D	Коэффициент диффузии массовой концентрации		[м ² ·с ⁻¹]	
$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$	Число Шмидта			
Q	Источник тепла анизотропного фильтра сопротивления		[Вт·м ⁻³]	1

Примечания:

1 Подробнее см. том [Руководство пользователя](#).

Остальные параметры описаны в разделе [Основные обозначения](#).

3.3.2.2 Уравнения

В модель входят следующие уравнения:

Уравнение энергии

$$(1) \quad \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}$$

Уравнение диффузионного массопереноса, записанное для концентрации примеси C

$$(2) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \left(\frac{\mu}{Sc} \nabla C \right)$$

3.3.2.3 Параметры

Физические параметры задаются в папке **Физические параметры** **Параметры модели**. В данной модели отсутствуют.

3.3.2.4 Граничные условия

В модели определены следующие типы границ:

- [Стенка](#);
- [Симметрия](#);
- [Периодическое](#);
- [Сопряженное](#).

Ниже приведено соответствие между типом границы и граничными условиями:

Тип границы	Граничные условия, устанавливаемые по умолчанию		Допустимые граничные условия	
	Температура	Концентрация	Температура	Концентрация
Стенка	Нулевой поток	Нулевой поток	Нулевой поток	Нулевой поток
			Значение на стенке	Значение на стенке
			Поток	Поток
			Диффузионный поток	Диффузионный поток
			Поток с сопротивлением	Поток с сопротивлением
Симметрия	Симметрия	Симметрия	Симметрия	Симметрия
Периодическое	Периодичное	Периодичное	Периодичное	Периодичное
			Периодическое с перепадом	Периодическое с перепадом
Сопряженное	L-Сопряженное	Нулевой поток	L-Сопряжение	Нулевой поток
				Значение на стенке
			Сопротивление	Поток
				Диффузионный поток
			Поток с сопротивлением	

3.3.2.4.1 Тип Стенка

На границах расчетной области w типа **Стенка** для **Температуры** и **Концентрации** определены следующие граничные условия:

Значение на стенке

На границе задано фиксированное значение f_w

$$(1) \quad f|_w = f_w$$

Нулевой поток

Условие равенства нулю потока означают

$$(2) \quad \left. \frac{\partial f}{\partial n} \right|_w = 0$$

Поток

На границе задано фиксированное значение диффузионного потока J_w

$$(3) \quad D_f \left. \frac{\partial f}{\partial n} \right|_w = J_w$$

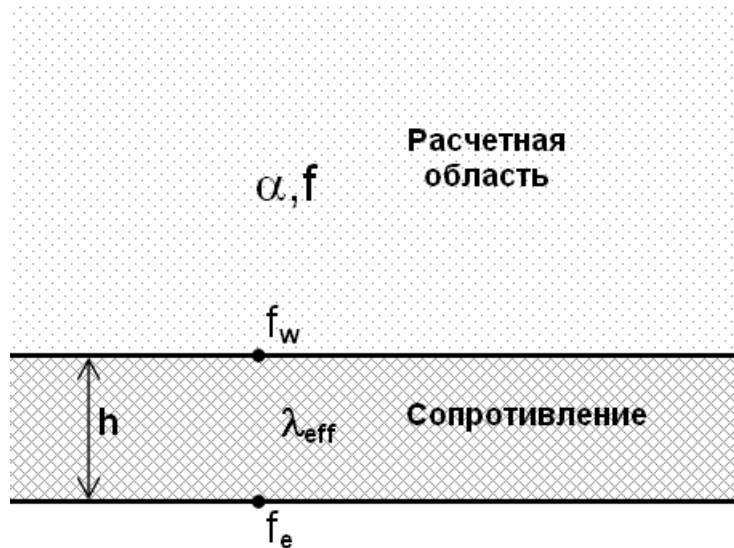
Диффузионный поток

На границе задано фиксированное значение f_w и коэффициент тепло-массоотдачи α

$$(4) \quad D_f \left. \frac{\partial f}{\partial n} \right|_w = \alpha (f_w - f)$$

Поток с сопротивлением

Это граничное условие используется в тех случаях, когда к стенке расчетной области примыкает прослойка, которая может быть заменена тепловым сопротивлением.



f = **Температура** или **Концентрация**

На границе задано фиксированное значение f_e (значение на внешней границе прослойки, заменяемой тепловым сопротивлением) и значение коэффициента тепло-массоотдачи α_{eff} , которое определяется таким образом:

$$(5) \quad \alpha_{eff} = \frac{\lambda_{eff}}{h},$$

где λ_{eff} – коэффициент диффузии или теплопроводности прослойки.

Поток с внешней границы прослойки J_e определяется таким образом:

$$(6) \quad J_e = \alpha_{eff}(f_e - f_w).$$

А поток с внешней границы расчетной области J_w определяется из выражения (4).

Т.к. потоки J_e и J_w равны, то получаем следующее выражение для потока J_w :

$$(7) \quad J_w = \frac{\alpha \alpha_{eff}}{\alpha + \alpha_{eff}} (f_e - f)$$

3.3.2.4.2 Тип Симметрия

На границах расчетной области w типа **Симметрия** для **Температуры** и **Концентрации** определены следующие граничные условия:

Симметрия

Условие симметрии соответствует условию [Нулевой поток](#) и означает

$$(1) \quad \left. \frac{\partial f}{\partial n} \right|_w = 0$$

3.3.2.4.3 Тип Периодическое

На границах расчетной области w типа **Периодическое** для **Температуры** и **Концентрации** определены следующие граничные условия:

Периодическое

Это граничное условие используется в случае *периодического* изменения расчетных величин и определяет равенство значений переменных на соответствующих границах

$$(1) \quad f|_{w_0} = f|_{w_1}.$$

Тип границы **Периодическое** может быть задан на паре граничных поверхностей w_0 и w_1 , переходящих друг в друга при соответствующем отображении (сдвиге и/или повороте).

Периодическое с перепадом

Это граничное условие отличается от предыдущего лишь заданием величины, определяющей разницу расчетной величины между соответствующими значениями на граничных поверхностях w_0 и w_1 .

$$(2) \quad f|_{w_0} = f|_{w_1} + \Delta f.$$

Величина перепада Δf задается на каждом граничном условии из пары, причем на одном из них со знаком

"+", а на втором – со знаком "-".

3.3.2.4.4 Тип Сопряженное

На границах расчетной области w типа **Сопряженное** для **Концентрации** определены те же граничные условия, что и для типа **Стенка**.

На границах расчетной области w типа **Сопряженное** для **Температуры** определены следующие граничные условия:

L-Сопряжение

Используется для расчета сопряженного тепло-массообмена между двумя подобластями (0 и 1)

$$(1) \quad f_w = (f_0 + f_{ref}^{(0)})|_{w_0} = (f_1 + f_{ref}^{(1)})|_{w_1},$$

$$(2) \quad \lambda_0 \frac{\partial f_0}{\partial n}|_{w_0} = \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial n}|_{w_1}.$$

Здесь f = **Температура**.

Сопротивление

Используется для учета тепло-массоотдачи с коэффициентом α . Значение на границе f_w вычисляется в соответствии с (1)

$$(3) \quad \alpha_0 (f_w - f_0)|_{w_0} = \alpha_1 (f_1 - f_w)|_{w_1}.$$

Здесь f = **Температура**.

Смешанное граничное условие

Заметим, что возможно задание *смешанного* типа границы **L-Сопряжение**, а именно: на поверхности w_0 задано условие **L-Сопряжение**, а на поверхности w_1 – условие **Сопротивление**

$$(4) \quad \lambda_0 \frac{\partial f_0}{\partial n}|_{w_0} = \alpha_1 (f_1 - f_w)|_{w_1}$$

Здесь f = **Температура**.

Эффективная стенка

Данное условие позволяет избежать интегрирования уравнения теплопроводности в тонкой стенке. Стенка заменяется поверхностью, на обеих сторонах которой задаётся условие **Эффективная стенка** для переменной **Температура**. В предположении линейности профиля температуры поперёк стенки, сшивка решений по тепловому потоку по обе стороны от стенки определяется соотношением:

$$(5) \quad \lambda_0 \frac{\partial f_0}{\partial n}|_{w_0} = \alpha_w (f_{w1} - f_{w0}) = \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial n}|_{w1}$$

Здесь f = **Температура**. На закладках **Температура** двух связываемых граничных условий пользователь задаёт одинаковые значения параметров α_w = **1/Сопротивление** и **Теплоёмкость** стенки.

3.3.2.5 Начальные условия

В начальный момент времени значения **Температуры** и **Концентрации** равны T_{ini} и C_{ini} соответственно (относительные величины). Их значения задаются в папке физических параметров **FlowVision Физические параметры**.

Элемент дерева	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Начальные значения	Температура	T_{ini}	[K]
	Концентрация	C_{ini}	

3.3.3 Ламинарная жидкость

Данная модель описывает течения вязкой жидкости/газа при малых числах Маха ($M < 0.3$), малых и умеренных числах Рейнольдса. Допускаются малые изменения плотности, что позволяет естественным образом учесть подъёмную силу. В модель входят уравнения Навье-Стокса, энергии и уравнение конвективно-диффузионного переноса концентрации примеси.

3.3.3.1 Обозначения

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность	Прим.
ω	Вектор угловой скорости вращения		[с ⁻¹]	
B	Силы вращения (Кориолиса и центробежная)		[м·с ⁻²]	
R	Силы изотропного и (или) анизотропного фильтра сопротивления		[кг·м ⁻² ·с ⁻²]	1
Sc	Число Шмидта	Шмидт		

Примечания:

1 Подробнее см. том [Руководство пользователя](#).

Остальные параметры описаны в разделе [Основные обозначения](#) и [Обозначения](#) модели твердого тела.

3.3.3.2 Уравнения

В модель входят следующие уравнения:

Уравнения Навье-Стокса

$$(1) \quad \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu \nabla \mathbf{V}) + \mathbf{S}$$

$$(2) \quad \nabla \mathbf{V} = 0,$$

где источник **S** равен

$$(3) \quad \mathbf{S} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{hyd}}}{\rho}\right) \mathbf{g} + \mathbf{B} + \frac{\mathbf{R}}{\rho}.$$

Во вращающейся системе координат силы вращения (Кориолиса и центробежная) имеют вид:

$$(4) \quad \mathbf{B} = -2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V} - \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}.$$

Уравнение энергии

$$(5) \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}h) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}.$$

3.3.3.2.1 Модели массопереноса

Перенос смешиваемых компонент

Обозначение	Название	Имя в FlowVision	Размерность
C	Массовая концентрация	Концентрация	
Sc	Число Шмидта	Шмидт	

Концентрация **C** трактуется как массовая концентрация вещества Substance1. Для концентрации решается уравнение конвективно-диффузионного переноса:

$$(1) \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}C) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\frac{\mu}{Sc} \nabla C \right).$$

Перенос несмешиваемых компонент

Обозначение	Название	Имя в FlowVision	Размерность
C	Объемная концентрация	Концентрация	
Sc	Число Шмидта	Шмидт	

В большинстве задач переменная **C** – это массовая концентрация инертной примеси (**Вещество1**). Данный режим задается по умолчанию. Однако существуют задачи, в которых **C** определяется как объемная концентрация второго вещества (**Вещество1**) и для концентрации решается уравнение чисто конвективного переноса. Это задачи с поверхностью раздела между двумя несмешиваемыми жидкостями (или жидкостью и газом).

Для концентрации решается уравнение чисто конвективного переноса:

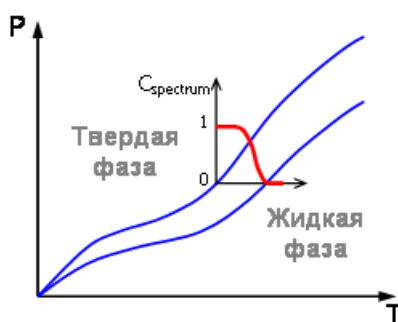
$$(2) \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}C) = 0$$

Модель плавления-кристаллизации

Обозначение	Название	Переменная в FlowVision	Размерность
C	Объемная концентрация	Концентрация	
T _{Melting} (P)	Температура плавления		[K]
C _{Spectrum} (P,T)	Спектр затвердевания		

Концентрация твердой фазы (C) и температура (T) находятся из решения системы уравнений, состоящей из [определения энтальпии](#) и спектра затвердевания:

$$(3) \quad C = C_{\text{Spectrum}}$$



Внимание!

1. В этой модели предполагается, что **Вещество0** – жидкая фаза, **Вещество1** – твердая фаза.
2. При решении задач, связанных с затвердеванием, необходимо использовать опцию **Глобальные параметры** → **Опции** → **Совм. решение** (подробнее см. [Совместное решение](#)).

3.3.3.3 Параметры

Физические параметры задаются в папке **Физические параметры** **Параметры модели**.

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Общие	Минимум плотности ¹		[кг·м ⁻³]
	Максимум плотности ¹		[кг·м ⁻³]
	Давл. минимум ¹	P _{min}	[Па]
	Давл. максимум ¹	P _{max}	[Па]
	Темп. минимум ¹	T _{min}	[K]
	Темп. максимум ¹	T _{max}	[K]
	Скорость максимум ¹	V _{max}	[м·с ⁻¹]
	Минимальный зазор ²		[м]
	Максимальный зазор ²		[м]
	Сглаживание плотности 0,1...³		
	Крит. мал. ячейки V ⁴		
	Крит. мал. ячейки A ⁴		
Гидростатика	Плотность ⁵	ρ _{hyd}	[кг·м ⁻³]
	Плотность 1 ⁵	ρ _{1,hyd}	[кг·м ⁻³]
	x уровень жидкости ⁶		[м]
	y уровень жидкости ⁶		[м]
	z уровень жидкости ⁶		[м]

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Дополнительно	Масштабирование скорости ⁷	<i>using</i>	
	friction coef ⁸		
	min export pressure ⁹		
	max export pressure ⁹		
	ref abs export pressure, Pa abs ¹⁰		[Па]
	MaxMovingBodySpeed ¹¹		[м·с ⁻¹]
	Artificial sound speed ¹²	V_{art}	[м·с ⁻¹]
Сопротивление щели	Учитывать (>0) ¹³	<i>using</i>	
Массоперенос	Массовая концентрация		
	Число Шмидта ¹⁴	Sc	
	Объемная концентрация		
	Кристаллизация		

Примечания к таблице:

¹ На переменную f накладываются следующие ограничения

$$(1) \quad f_{min} \leq f \leq f_{max}$$

² Эти параметры используются только для модели зазора. Если зазор становится меньше минимального, то его значение автоматически полагается равным заданному минимуму, а если зазор становится больше максимального значения, то в этой ячейке модель зазора не используется.

³ В задачах, где участвуют жидкости с большой разницей плотностей, на границе фронта плотность представляется ступенчатой функцией. В таких случаях можно использовать сглаживание плотности.

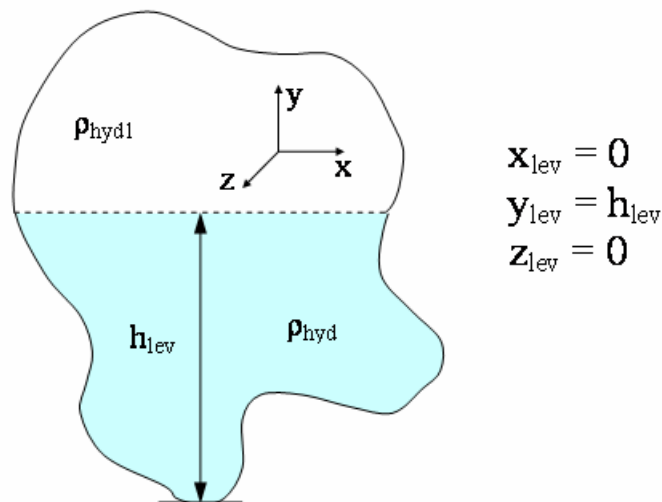
$$(2) \quad \rho_i^{(s)} = \frac{1}{N_i} \sum_{j \in \Omega_i} \rho_j^{(s-1)}, \quad s = 1, \dots, n$$

где i – номер ячейки, j – номер соседней ячейки, N_i – количество соседних ячеек, n – уровень сглаживания.

⁴ Данные параметры позволяют управлять определением маленькой ячейки, соответственно, по объёму ячейки и площади грани.

⁵ Плотность ρ_{hyd} определяет гидростатическое давление первой жидкости, $\rho_{1,hyd}$ – второй жидкости. При этом предполагается, что внизу находится жидкость с плотностью ρ_{hyd} . Во внешних задачах с естественной конвекцией ρ_{hyd} равна плотности на бесконечности. Во внутренних задачах с естественной конвекцией ρ_{hyd} берётся равной средней по расчетному объёму плотности.

⁶ Уровни жидкости задаются для жидкости с плотностью ρ_{hyd} . Следует отметить, что уровень жидкости отсчитывается не от начала координат, а от нижней границы жидкости, причем предполагается, что свободная поверхность перпендикулярна одной из координатных осей.



⁷ Если задан коэффициент масштабирования скорости (k), то переменные будут умножены на соответствующие коэффициенты:

скорости – $V_{new} = V_{old} \cdot k$

давление – $P_{new} = P_{old} \cdot k^2$

Для моделей, в которых присутствует расчет турбулентности:

турбулентная энергия – $k_{new} = k_{old} \cdot k^2$

турбулентная диссипация – $\varepsilon_{new} = \varepsilon_{old} \cdot k^3$

- 8 Этот параметр изменяет силу трения на стенке при турбулентном обтекании. Сила трения, рассчитываемая при этом, умножается на этот коэффициент. Если этот коэффициент будет равен 0, то это соответствует стенке с проскальзыванием.
- 9 Ограничение давления **PressureWHST** снизу и сверху. Имеет смысл вводить для фильтрации слишком низких и высоких скачков давлений при расчете задач с подвижными телами, движущимися под действием гидродинамических сил и при совместном решении задач взаимодействия жидкости и деформируемого тела.
- 10 Опорное давление при интегрировании сил, действующих на супергруппу (по умолчанию = 0).
- 11 Ограничение скорости поверхности подвижного тела.
- 12 Искусственная сжимаемость. В этом случае для несжимаемой жидкости вводится искусственная скорость звука V_{art} . При этом в уравнение для давления добавляется производная давления по времени. Заметим, что искусственная сжимаемость не соответствует истинной сжимаемости, введенной для модели полностью сжимаемой жидкости. Искусственная сжимаемость позволяет сгладить скачки давления при расчете некоторых нестационарных течений, особенно в случае движения тел внутри расчетной области. Рекомендуется задавать V_{art} минимум в 2-3 раза больше максимальной скорости в области расчета. Иногда искусственная сжимаемость позволяет существенно улучшить сходимость стационарных вариантов.
- 13 Если параметр *using* на странице **Сопротивление щели** положителен, то происходит учет модели зазора.
- 14 Параметр число Шмидта определяет коэффициент диффузии второго вещества в первом и

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$$

рассчитывается по следующей формуле:

3.3.3.4 Граничные условия

В модели определены следующие типы границ:

- [Стенка](#);
- [Симметрия](#);
- [Вход/Выход](#);
- [Свободный выход](#);
- [Периодическое](#);
- [Сопряженное](#);
- [Скользкая поверхность](#).

Ниже приведено соответствие между типом границы и граничными условиями:

Тип границы	Граничные условия, устанавливаемые по умолчанию		Допустимые граничные условия	
	Температура и Концентрация	Скорость	Температура и Концентрация	Скорость
Стенка	Нулевой поток	Стенка	см. модель Твердый материал	Стенка
				Стенка с проскальзыванием
				Утечка
				Тангенциальная закрутка
				Вращающаяся стенка
Симметрия	Симметрия	Стенка с проскальзыванием	см. модель Твердый материал	Стенка с проскальзыванием

Тип границы	Граничные условия, устанавливаемые по умолчанию		Допустимые граничные условия	
	Температура и Концентрация	Скорость	Температура и Концентрация	Скорость
Вход/выход	Значение на стенке	Нормальная скорость	Нулевой поток	Нормальная скорость
			Значение на стенке	Вектор скорости
				Давление
				Закрутка скорости
Полная температура	Полное давление			
Свободный выход	Нулевой поток	Нулевое давление/выход	Нулевой поток	Нулевое давление/выход
			Значение на стенке	Давление/выход
				Давление, нет втока
Свободная граница				
Периодическое	Периодичное	Периодичное	см. модель Твердый материал	Периодичное
Сопряженно е	L-Сопряженн е	Стенка	см. модель Твердый материал	Стенка
				Стенка с проскальзыванием
				Утечка
				Тангенциальная закрутка
Скользкая поверхность	Скользкий	Скользкий	Скользкий	Скользкий

3.3.3.4.1 Тип Стенка

На границах расчетной области w типа **Стенка** для **Температуры** и **Концентрации** определены те же граничные условия, что и в модели [Твердый материал](#).

Для **Скорости** определены следующие граничные условия:

Стенка

На границе области задано условие *прилипания*

$$(1) \quad V|_w = 0$$

Вращающаяся стенка

Аналогично условию **Стенка**, с той лишь разницей, что это условие необходимо использовать в том случае, когда решается задача с вращением в абсолютной системе координат.

Стенка с проскальзыванием

На границе области задано условие *проскальзывания*. Это значит, что компоненты вектора скорости V_i ($i = 1+3$) удовлетворяют *одному* из условий:

$$(2) \quad \begin{aligned} V_i|_w &= 0 & \text{если } n_i \neq 0 \\ (\nabla V_i \cdot \mathbf{n})|_w &= 0 & \text{если } n_i = 0 \end{aligned}$$

где n_i – компоненты вектора нормали \mathbf{n} к границе w .

Тангенциальная закрутка

Это граничное условие задает вектор скорости, имеющий касательную V_k составляющую к граничной поверхности (нормальная составляющая отсутствует $V_n=0$):

$$(3) \quad V_k = \omega r$$

Направление вращения определяется правилом буравчика и знаком ω (степень закрутки):

- $\omega > 0$ – "прямое" вращение;
- $\omega < 0$ – "обратное" вращение.

Направление касательной составляющей скорости определяется по правилу буравчика, примененного к

вектору. Реальная расчетная граница представлена плоскими фасетками. Поэтому скорость, определённая по правилу буравчика, может иметь нормальную к фасетке составляющую. В расчетах эта составляющая полагается равной нулю. Возникающую при этом ошибку можно уменьшить, повысив качество фасеточного представления поверхности.



Вид закрученного потока в случае $V_n=0$.

Закрутка скорости с расширением

Это граничное условие предназначено для задания закрученного вдува через цилиндрическую поверхность. Оно определяет касательную к границе составляющую скорости V_k аналогично предыдущему граничному условию. Кроме того, пользователь может задать нормальную составляющую V_n .



Вид закрученного потока в случае $V_n \neq 0$.

Утечка

Это граничное условие предназначено для задания расхода через стенку с зазорами. Если не используется пользовательская dll, то задается только массовый расход через единицу площади, остальные параметры могут быть использованы только в пользовательской библиотеке.

3.3.3.4.2 Тип Симметрия

На границах расчетной области в типа **Симметрия** для **Температуры** и **Концентрации** определены те же граничные условия, что и в модели [Твердый материал](#).

Для **Скорости** определены следующие граничные условия:

Стенка с проскальзыванием

Соответствует аналогичному условию в типе [Стенка](#).

3.3.3.4.3 Тип Вход/Выход

На границах расчетной области в типа **Вход/выход** для **Температуры** и **Концентрации** определены два граничных условия:

Значение на стенке

Соответствует аналогичному условию в модели [Твердый материал](#).

Нулевой поток

Соответствует аналогичному условию в модели [Твердый материал](#).

Это граничное условие используется *только для выходной границы* расчетной области

Для **Скорости** и **Давления** определены следующие граничные условия:

Нормальная скорость

На границе области задана *нормальная* компонента вектора скорости (V_{nw})

(1) $V|_w = V_{nw}$

Если $V_{nw} \geq 0$, то граничное условие трактуется как "вход".

Если $V_{nw} < 0$, то граничное условие трактуется как "выход".

При этом в процессе расчета отрицательная величина V_{nw} переустанавливается в соответствии со следующим правилом:

(2)
$$V_w^{out} = - \frac{\sum V_w^{in} S^{in}}{\sum S^{out}}$$

которое обеспечивает выполнение условия баланса массы – "сколько массы втекло – столько массы вытекло". Здесь S^{in} и S^{out} – площади "входных"/"выходных" граничных поверхностей соответственно.

Вектор скорости

На границе области задан *вектор* скорости

(3) $V|_w = V_w$

Давление

На границе области задается значение давления.

Скорость на границе расчетной области устанавливается по следующему правилу:

- В расчетной ячейке, примыкающей к границе, определяется направление вектора скорости.
- Если вектор скорости направлен внутрь расчетной области, то устанавливается нормальная компонента вектора скорости (V_{nw}), равная модулю вектора скорости в ячейке.
- Если вектор скорости направлен из расчетной области, то устанавливаются нормальные производные компонент вектора скорости равные нулю.

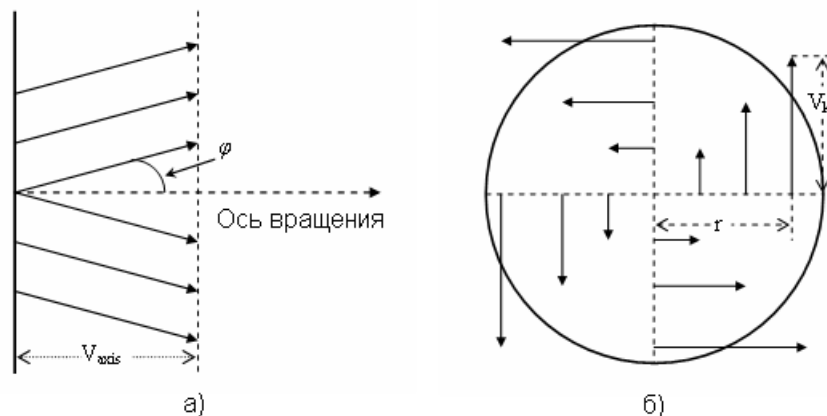
(4) $P|_w = P_w$

$(\mathbf{V}, \mathbf{n}) > 0 \quad V|_w = V_{nw} = |\mathbf{V}|$

(5) $(\mathbf{V}, \mathbf{n}) \leq 0 \quad \nabla(\mathbf{V}, \mathbf{n})|_w = 0$

Закрутка скорости

Данное граничное условие предназначено для задания закрученного вокруг оси (\mathbf{A}, \mathbf{P}) потока жидкости с углом раствора φ . Здесь \mathbf{A} – направляющий вектор оси вращения, \mathbf{P} – любая из точек, лежащих на оси вращения.



Вид на закрученный поток сбоку (а) и против направления потока (б).

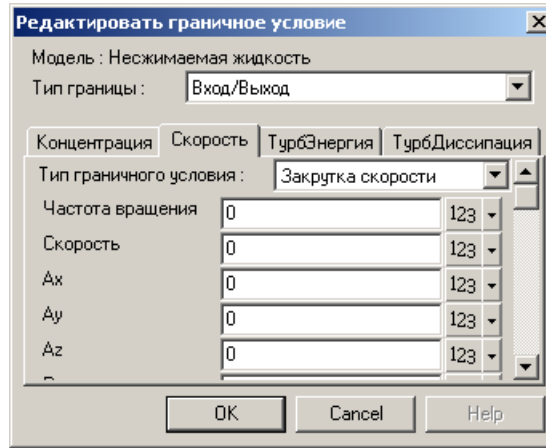
Закрученный поток характеризуется осевой составляющей V_{axis} и степенью закрутки ω

(6) $V_k = \omega r$

Направление вращения определяется правилом буравчика и знаком ω :

- $\omega > 0$ – "прямое" вращение;
- $\omega < 0$ – "обратное" вращение.

Окно задания данного граничного условия имеет вид:



Приведем соответствие между используемыми обозначениями и интерфейсом FlowVision:

Имя в FlowVision	Обозначение
Частота вращения	ω
Скорость	V_{axis}
(Ax, Ay, Az)	A
(Px, Py, Pz)	P
Угол разлета	φ

Полное давление

На закладке **Скорость** задаётся значение полного давления (P_0).

В случае входа статическое давление определяется по формуле:

$$(7) \quad P = P_0 - \rho \frac{|V|^2}{2}$$

Скорость полагается нормальной входному сечению. Модуль скорости рассчитывается. Скорость, в общем случае, переменна по сечению. Следовательно, давление также переменна по сечению

В случае выхода

$$(8) \quad P = P_0$$

Скорость сносится из центра соответствующей приграничной ячейки на границу.

3.3.3.4.4 Тип Свободный выход

На границах расчетной области в типа **Свободный выход** для **Температуры** и **Концентрации** определены два граничных условия:

Значение на стенке

Соответствует аналогичному условию в модели [Твердый материал](#).

Нулевой поток

Соответствует аналогичному условию в модели [Твердый материал](#).

Для **Скорости** и **Давления** определены следующие граничные условия:

Нулевое давление/выход

Давление на границе области полагается равным нулю.

Скорость на границе расчетной области устанавливается по следующему правилу:

- В расчетной ячейке, примыкающей к границе, определяется направление вектора скорости.
- Если вектор скорости направлен внутрь расчетной области, то нормальная составляющая скорости обнуляется.
- Если вектор скорости направлен из расчетной области, то устанавливаются нормальные производные компонент вектора скорости равные нулю.

$$(1) \quad P|_w = 0$$

$$(V, n) > 0 \quad V|_w = V_{tw}$$

$$(2) \quad (V, n) \leq 0 \quad \nabla(V_i, n)|_w = 0$$

здесь **n** – нормаль к границе, V_{tw} - тангенциальная составляющая скорости на границе.

Давление/выход

На границе области задается значение давления.

Скорость на границе расчетной области устанавливается таким же образом, как в условии **Нулевое давление/выход**.

$$(3) \quad P|_{\omega} = P_{\omega}$$

$$(\mathbf{V}, \mathbf{n}) > 0 \quad V|_{\omega} = V_{\omega}$$

$$(4) \quad (\mathbf{V}, \mathbf{n}) \leq 0 \quad \nabla(V_i, \mathbf{n})|_{\omega} = 0$$

здесь \mathbf{n} – нормаль к границе.

Давление, нет втока

На границе области задается значение давления.

Скорость на границе расчетной области устанавливается по следующему правилу:

- В расчетной ячейке, примыкающей к границе, определяется направление вектора скорости.
- Если вектор скорости направлен внутрь расчетной области, то компоненты скорости обнуляются.
- Если вектор скорости направлен из расчетной области, то устанавливаются нормальные производные компонент вектора скорости равные нулю.

$$(5) \quad P|_{\omega} = P_{\omega}$$

$$(\mathbf{V}, \mathbf{n}) > 0 \quad V|_{\omega} = 0$$

$$(6) \quad (\mathbf{V}, \mathbf{n}) \leq 0 \quad \nabla(V_i, \mathbf{n})|_{\omega} = 0$$

Свободная граница

На границе области нормальные производные компонент вектора скорости и давления равны нулю.

$$(7) \quad \frac{\partial P}{\partial \mathbf{n}}|_{\omega} = 0$$

$$(8) \quad (\nabla V_i, \mathbf{n})|_{\omega} = 0, \quad i = 1+3$$

здесь \mathbf{n} – нормаль к границе.

*Данное граничное условие можно задавать при дозвуковом режиме течения, если имеется несколько выходных отверстий и хотя бы на одном из них задано условие для **Давления**. В противном случае (если давление нигде не задано) постановка задачи некорректна.*

3.3.3.4.5 Тип Периодическое

На границах расчетной области ω типа **Периодическое** для **Температуры** и **Концентрации** определены те же граничные условия, что и в модели [Твердый материал](#).

Для **Скорости** и **Давления** определены следующие граничные условия:

Периодическое

Обозначим через \mathbf{T} отображение (сдвиг и/или поворот), переводящее пару граничных поверхностей ω_0 и ω_1 друг в друга.

Периодическое граничное условие устанавливает равенство соответствующих векторов скорости и давления на поверхностях ω_0 и ω_1 .

$$(1) \quad \mathbf{T}(V|_{\omega_0}) = V|_{\omega_1}, \quad V|_{\omega_0} = \mathbf{T}^{-1}(V|_{\omega_1})$$

$$(2) \quad P|_{\omega_0} = P|_{\omega_1}$$

Периодическое с перепадом давления

Это граничное условие отличается от предыдущего лишь заданием величины ΔP , определяющей разницу давлений на граничных поверхностях ω_0 и ω_1 .

$$(3) \quad P|_{\omega_0} = P|_{\omega_1} + \Delta P$$

Величина перепада ΔP задается на каждом граничном условии из пары, причем на одном из них со знаком "+", а на втором – со знаком "-".

3.3.3.4.6 Тип Сопряженное

На границах расчетной области в типа **Сопряженное** для **Температуры** и **Концентрации** определены те же граничные условия, что и в типе **Сопряженное** модели [Твердый материал](#).

Для **Скорости** определены те же граничные условия, что и в типе [Стенка](#) за исключением граничного условия **Вращающаяся стенка**.

Внимание! Нельзя использовать в одной задаче одновременно граничные условия типа **Сопряженное** и **Скользкая поверхность**!

3.3.3.4.7 Тип Скользящая поверхность

Граничное условие **Скользкая поверхность** предназначено для расчета течения жидкости и газа в устройствах, в которых есть вращающиеся и неподвижные части (ротор-статор).

У областей расчета ротора и статора должны быть выделены одинаковые поверхности сопряжения. На этих поверхностях устанавливается граничное условие **Скользкая поверхность**, которое затем связывается.

Внимание! Для каждой пары областей ротора и статора может быть задана только одна **Скользкая поверхность**!

Внимание! Нельзя использовать в одной задаче одновременно граничные условия типа **Сопряженное** и **Скользкая поверхность**!

3.3.3.5 Начальные условия

В дополнение к [Начальным условиям](#) модели **Твердый материал** в данной модели можно задать начальные значения компонентов вектора скорости и давления. Их значения задаются в папке **Физические параметры**:

Элемент дерева	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Начальные значения	Давление	P_{ini}	[Па]
	хСкорость	$V_{x,ini}$	[м·с ⁻¹]
	уСкорость	$V_{y,ini}$	[м·с ⁻¹]
	zСкорость	$V_{z,ini}$	[м·с ⁻¹]
	Скор/ в АбсСистКоор (>0)	<i>using</i>	

Параметр *using* используется только во вращающейся системе координат. Если он положителен, то начальная скорость равна V_{ini} в абсолютной (неподвижной) системе координат. В противном случае начальная скорость равна V_{ini} во вращающейся системе координат. Подробнее о выборе системы координат см. [Руководство пользователя](#).

3.3.4 Несжимаемая жидкость

Данная модель описывает течения вязкой жидкости/газа при малых числах Маха ($M < 0.3$), малых и больших (турбулентных) числах Рейнольдса. Допускаются малые изменения плотности, что позволяет естественным образом учесть подъемную силу. В модель входят уравнения Навье-Стокса, энергии и уравнение конвективно-диффузионного переноса концентрации примеси.

3.3.4.1 Обозначения

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
μ_t	Турбулентная вязкость	ТурбулентнаяВязкость	[кг·м ⁻¹ ·с ⁻¹]
Pr_t	Турбулентное число Прандтля		
Sc_t	Турбулентное число Шмидта		

Остальные параметры описаны в разделах [Основные обозначения](#) и [Обозначения моделей ламинарной жидкости](#) и [твердого тела](#).

3.3.4.2 Уравнения

Модель турбулентной несжимаемой жидкости основана использовании турбулентной вязкости μ_t .
 Определение μ_t зависит от выбранной [модели турбулентности](#).

Помимо уравнений для 'турбулентных' переменных, в модели присутствуют следующие уравнения:

Уравнения Навье-Стокса

$$(1) \quad \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \left((\mu + \mu_t) (\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T) \right) + \mathbf{S}$$

$$(2) \quad \nabla \mathbf{V} = 0,$$

где источник \mathbf{S} равен

$$(3) \quad \mathbf{S} = \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho} \right) \mathbf{g} + \mathbf{B} + \frac{\mathbf{R}}{\rho}.$$

Во вращающейся системе координат силы вращения (Кориолиса и центробежная) имеют вид:

$$(4) \quad \mathbf{B} = -2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V} - \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}.$$

Уравнение энергии

$$(5) \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}h) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}.$$

3.3.4.2.1 Модели массопереноса

Перенос смешиваемых компонент

Обозначение	Название	Имя в FlowVision	Размерность
C	Массовая концентрация	Концентрация	

Концентрация C трактуется как массовая концентрация вещества Substance1. Для концентрации решается уравнение конвективно-диффузионного переноса:

$$(1) \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}C) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla C \right).$$

Перенос несмешиваемых компонент

См. [Ламинарную модель](#).

Модель плавления-кристаллизации

См. [Ламинарную модель](#).

3.3.4.3 Параметры

В дополнение к [Параметрам](#) модели ламинарной жидкости в данной модели присутствуют следующие параметры в папке **Физические параметры** **Параметры модели**:

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение
Турбулентность	Модель	Стандартная k-ε-модель
		Низко-Re k-ε-модель AKN
		Квадратичная k-ε-модель
		SA
		SST
		Низко-Re k-ε-модель HL
		Низко-Re k-ε-модель LS
	Прандтль	Pr_t
	Шмидт	Sc_t
	Т-пульсации	Простая модель
	K-teta - E-teta	

3.3.4.4 Граничные условия

В данной модели используются те же типы границ, что и в модели [Ламинарная жидкость](#). Для **Температуры** и **Концентрации** используется то же соответствие между типом границы и граничными условиями, что и в модели [Ламинарная жидкость](#). Описание граничных условий для турбулентных функций переноса приведено в моделях [Турбулентности](#).

Ниже приведено соответствие между типом границы и граничными условиями лишь для **Скорости**.

Тип границы	Граничные условия, устанавливаемые по умолчанию	Допустимые граничные условия
Стенка	Стенка, логарифмический закон	Стенка
		Стенка с проскальзыванием
		Утечка
		Тангенциальная закрутка
		Вращающаяся стенка
		Стенка, логарифмический закон
		Тангенц. закрутка, лог. закон
		Вращающаяся стенка, логарифмический закон
Танг. скорость, лог. закон		
Симметрия	Стенка с проскальзыванием	см. модель Ламинарная жидкость
Вход/выход	Нормальная скорость	см. модель Ламинарная жидкость
Свободный выход	Нулевое давление/выход	см. модель Ламинарная жидкость
Периодическое	Периодичное	см. модель Ламинарная жидкость
Сопряженное	Стенка, логарифмический закон	Стенка
		Стенка с проскальзыванием
		Утечка
		Тангенциальная закрутка
		Стенка, логарифмический закон
		Тангенц. закрутка, лог. закон
		Танг. скорость, лог. закон
Скользящая поверхность	Скользящий	см. модель Ламинарная жидкость

Граничные условия для **Скорости** для всех типов границы, кроме **Стенка** и **Сопряженное** полностью соответствуют модели [Ламинарная жидкость](#).

3.3.4.4.1 Тип Стенка

Граничные условия **Стенка**, **Вращающаяся стенка**, **Стенка с проскальзыванием**, **Утечка**, **Тангенциальная закрутка** описаны в модели [Ламинарная жидкость](#).

В описываемую модель добавлены перечисленные ниже граничные условия для **Скорости** и **Давления**. Все они предполагают задание эквивалентной 'песочной' шероховатости - см. [Учет шероховатости](#).

Шероховатая стенка

Данное граничное условие эквивалентно условию **Стенка** в модели [Ламинарная жидкость](#).

Стенка, логарифмический закон

Подробное описание определения скорости в ближайшей к стенке ячейке см. [Определение скорости на](#)

[стенке.](#)

Вращающаяся стенка, логарифмический закон

Аналогично условию **Стенка, логарифмический закон**, с той лишь разницей, что это условие необходимо использовать в том случае, когда решается задача с вращением в абсолютной системе координат.

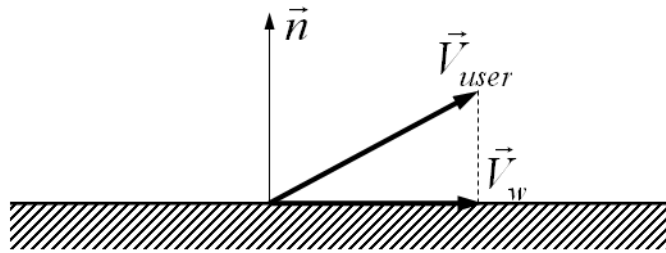
Тангенц. закрутка, лог. закон

Аналогично граничному условию **Тангенциальная закрутка** с той разницей, что для расчета касательной к граничной поверхности составляющей скорости используются формулы для гидравлически гладкой или шероховатой стенки.

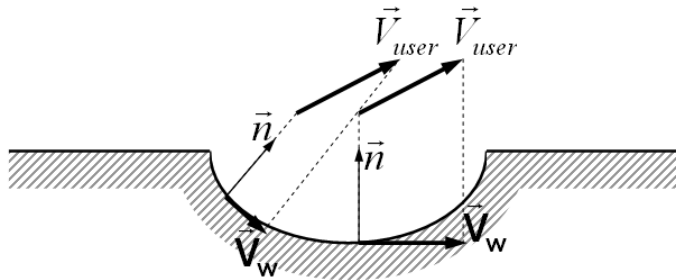
Танг. скорость, лог. закон

Задаёт касательную скорость на стенке:

$$(1) \quad \vec{V}_w = \vec{V} - \vec{n}(\vec{n}\vec{V})$$



При использовании этого условия на поверхностях, которые имеют ненулевую кривизну вдоль направления движения, следует обратить внимание на то, что при задании постоянного вектора скорости, касательная скорость на самой поверхности будет зависеть от кривизны поверхности.



3.3.4.5 Начальные условия

В дополнение к **Начальным условиям** модели **Ламинарная жидкость** в данной модели можно задать начальные значения турбулентной энергии и диссипации. Их значения задаются в папке **Физические параметры**:

Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Пульсация	b	
Масштаб турбулентности, м	l	[м]

Рекомендуется использовать значения из граничного условия на входе (задание см. в описании модели турбулентности).

Замечание. Если начальные значения b_{ini} и l_{ini} равны нулю, они генерируются автоматически в зависимости от распределения скоростей, получаемого в конце первого шага по времени.

3.3.5 Слабосжимаемая жидкость

Данная модель описывает движение вязкой жидкости/газа при дозвуковых числах Маха и любых изменениях плотности.

3.3.5.1 Обозначения

См. [Обозначения](#) модели несжимаемой жидкости.

3.3.5.2 Уравнения

В модели присутствуют следующие уравнения:

Уравнения Навье-Стокса

$$(1) \quad \frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \left((\mu + \mu_t) (\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T) \right) + \mathbf{S}$$

$$(2) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0$$

где источник \mathbf{S} равен

$$(3) \quad \mathbf{S} = (\rho - \rho_{hyd}) \mathbf{g} + \rho \mathbf{B} + \mathbf{R}$$

Уравнение энергии

$$(4) \quad \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q$$

3.3.5.2.1 Модели массопереноса

Перенос смешиваемых компонент

Обозначение	Название	Переменная в FlowVision	Размерность
C	Массовая концентрация	Концентрация	

Концентрация C трактуется как массовая концентрация вещества Substance1. Для концентрации решается уравнение конвективно-диффузионного переноса:

$$(1) \quad \frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} C) = \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla C \right)$$

Равновесная модель кавитации (кипения)

Обозначение	Название	Переменная в FlowVision	Размерность
C	Массовая концентрация газовой фазы в смеси	Концентрация	
$P_{sat}(T_{abs})$	Давление насыщения		[Па]

Давление насыщения

Давление насыщения $P_{sat}(T_{abs})$ – обратная функция **Точки кипения**, загружаемой из **Базы Веществ** (см. том [Руководство пользователя](#)).

Условие кавитации

В данной модели всегда выполнено следующее условие

$$(2) \quad P_{abs} \geq P_{sat}(T_{abs})$$

Если $P_{abs} > P_{sat}(T_{abs})$, то массовая концентрация газовой фазы в смеси равна 0. Если же $P_{abs} = P_{sat}(T_{abs})$, то из своего [определения](#) для данного значения T_{abs} известна энтальпия.

Внимание! При решении задач, связанных с кавитацией, необходимо использовать опцию **Глобальные параметры** → **Опции** → **Совм. решение** (подробнее см. [Совместное решение](#)).

3.3.5.2 Модель расчета средних квадратов пульсаций

См. модель [Несжимаемая жидкость](#).

3.3.5.3 Параметры

См. [Параметры](#) модели несжимаемого течения жидкости, кроме страницы **Массоперенос**.

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение
Массоперенос	Модель	Массовая концентрация
		Кавитация

3.3.5.4 Граничные условия

В данной модели используются те же типы границ и граничных условий, что и в модели [Несжимаемая жидкость](#), кроме типа границы **Вход/Выход**.

Ниже приведено соответствие между типом границы и граничными условиями лишь для **Скорости** для типа границы **Вход/Выход**.

Тип границы	Граничные условия, устанавливаемые по умолчанию	Допустимые граничные условия
Вход/выход	Норм. массовая скорость	Норм. массовая скорость
		Вектор масс. скорости
		Закрутка масс. скорости
		Давление
		Полное давление

3.3.5.4.1 Тип Вход/выход

Для типа границы **Вход/Выход** для **Скорости** определены следующие граничные условия:

Давление

Соответствует аналогичному условию в модели [Ламинарная жидкость](#).

Полное давление

Соответствует аналогичному условию в модели [Ламинарная жидкость](#).

Массовая скорость

На границе области задана нормальная компонента вектора массовой скорости

$$(1) \quad \rho V|_w = \rho_w V_{nw}$$

Если $\rho_w V_{nw} > 0$, то это граничное условие трактуется как "вход".

Если $\rho_w V_{nw} < 0$, то это граничное условие трактуется как "выход".

При этом в процессе расчета отрицательная величина V_{nw} переустанавливается в соответствии со следующим правилом:

$$(2) \quad V_w^{out} = - \frac{\sum V_w^{in} S^{in}}{\sum S^{out}}$$

которое обеспечивает выполнение условия баланса массы – "сколько массы втекло – столько массы вытекло". Здесь S^{in} и S^{out} – площади "входных"/"выходных" граничных поверхностей соответственно.

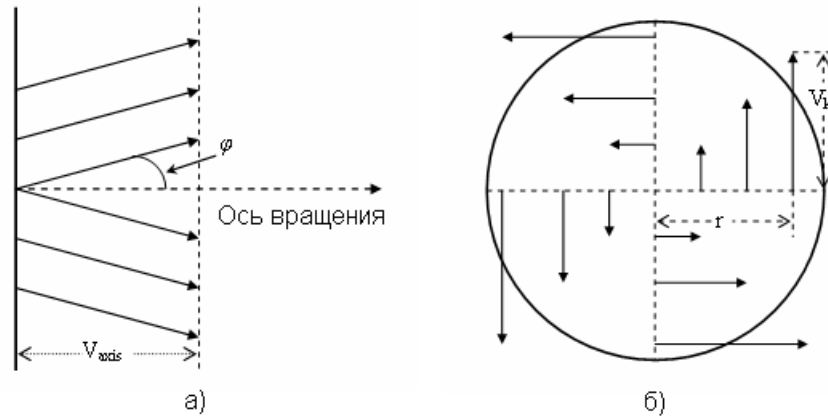
Вектор массовой скорости

На границе области задан *вектор* массовой скорости

$$(3) \quad \rho V|_w = \rho V_w$$

Закрутка массовой скорости

Данное граничное условие предназначено для задания закрученного вокруг оси (**A**,**P**) потока жидкости с углом раствора φ . Здесь **A** – направляющий вектор оси вращения, **P** – любая из точек, лежащих на оси вращения.



Вид на закрученный поток а) сбоку и б) против направления потока.

Закрученный поток характеризуется осевой составляющей ρV_{axis} и степенью закрутки ω

$$(4) \quad V_k = \omega r$$

Направление вращения определяется правилом буравчика и знаком ω :

- $\omega > 0$ – "прямое" вращение;
- $\omega < 0$ – "обратное" вращение.

Приведем соответствие между используемыми обозначениями и интерфейсом **FlowVision**.

Имя в FlowVision	Обозначение
Частота вращения	ω
Масс. скорость	ρV_{axis}
(Ax, Ay, Az)	A
(Px, Py, Pz)	P
Угол разлета	φ

3.3.5.5 Начальные условия

См. [Начальные условия](#) модели Несжимаемая жидкость.

3.3.6 Пористая среда

Данная модель описывает движение вязкой жидкости/газа при дозвуковых числах Маха и любых изменениях плотности в среде с *постоянной* пористостью.

Пористость определяется следующим образом:

$$(1) \quad \gamma = 1 - \frac{S_c}{S}$$

где S – общая площадь проходного сечения (включая и каркас и живое сечение), S_c – площадь сечения каркаса.

Рекомендуемые значения для пористости:

$$(2) \quad 0.2 \leq \gamma \leq 1$$

3.3.6.1 Обозначения

Обозначение	Название величины	Размерность
	Пористость	
ρ^1	Плотность жидкости	[кг·м ⁻³]
ρ_c	Плотность каркаса	[кг·м ⁻³]
β	Объемный коэффициент теплообмена	[Вт·м ⁻³ ·К ⁻¹]
C_{pc}	Теплоемкость каркаса	[Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹]
Q_c	Источник тепла в каркасе	[Вт·м ⁻³]
L_c	Теплопроводность каркаса	[Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]

Обозначение	Название величины	Размерность
V_c	Скорость теплоносителя	[м·с ⁻¹]

¹ В Пост-процессоре Вы видите эффективную плотность жидкости $\rho = \rho_{sub} \cdot \gamma$, где ρ_{sub} - истинная плотность жидкости.

Остальные параметры описаны в разделе [Обозначения](#) модели несжимаемой жидкости.

3.3.6.2 Уравнения

В модели присутствуют следующие уравнения:

Уравнения Навье-Стокса

см. [модель слабосжимаемой жидкости](#)

Уравнение энергии в жидкой среде

$$(1) \quad \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla(\rho V h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q - \frac{Q_{exc}}{\gamma}$$

Если известна мощность тепловыделения W в жидкой среде, то источник тепла Q в уравнении (1) вычисляется таким образом:

$$(2) \quad Q = \frac{W}{\gamma Vol_{Filter}}$$

где значение Vol_{Filter} – объем, в котором задается тепловыделение, определяется в фильтре анизотропного сопротивления и может быть получен из окна Инфо фильтра (подробнее см. описание анизотропного фильтра сопротивления в [Руководстве пользователя](#)).

Уравнение энергии в каркасе

$$(3) \quad C_{pc} \left\{ \frac{\partial \rho_c T_c}{\partial t} + V_c \rho_c \nabla T_c \right\} = \nabla(L_c \cdot \nabla T_c) + Q_c + \frac{Q_{exc}}{1-\gamma}$$

где индекс c указывает на каркас; L_c – теплопроводность каркаса (представляет собой тензор);

(4) $Q_c = \frac{W}{(1-\gamma) \cdot Vol_{Region}}$, где W – мощность тепловыделения, Vol_{Region} – объем подобласти, где рассчитывается температура каркаса;

Q_{exc} – источник (передача тепла между пористым каркасом и жидкостью):

$$(5) \quad Q_{exc} = \beta(T - T_c),$$

где $\beta = \frac{\alpha F}{Vol_{region}}$ – объемный коэффициент теплообмена, где α – коэффициент теплоотдачи, F – площадь поверхности каркаса. Форма этого параметра зависит от конкретной модели пористости и задается пользователем.

3.3.6.2.1 Модели массопереноса

Перенос смешиваемых компонент

См. модель [Слабосжимаемая жидкость](#).

3.3.6.3 Параметры

В дополнение к [Параметрам](#) модели **Слабосжимаемой жидкости** присутствуют следующие параметры:

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Массоперенос	Массовая концентрация	C	
Пористость	Пористость	γ	

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Каркас	Плотность	ρ_c	[кг·м ⁻³]
	Козф.	β	[Вт·м ⁻³ ·К ⁻¹]
	Ср	C_{pc}	[Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹]
	Источник	Q_c	[Вт·м ⁻³]
Теплопроводность каркаса	L_11,...,L_33	L_c	[Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]
Скорость теплоносителя	xСкорость,...,zСкорость	V_c	[м·с ⁻¹]

3.3.6.4 Граничные условия

См. граничные условия в модели [Слабосжимаемая жидкость](#).

Если включен расчет уравнения **Температура каркаса**, то во всех типах границ для соответствующей переменной **Температуры каркаса** становятся доступны следующие граничные условия:

Нулевой поток

Аналогично соответствующему условию для **Температуры** в модели [Твердый материал](#).

Значение на стенке

Аналогично соответствующему условию для **Температуры** в модели [Твердый материал](#) с той лишь разницей, что для **Температуры каркаса** это граничное условие может быть использовано только на входе.

3.3.6.4.1 Тип Скользящая поверхность

Для типа границы **Скользящая поверхность** для **Температуры каркаса** доступно дополнительно условие **Скользящая поверхность**, но оно может использоваться только в том случае, если в обеих связываемых подобластях рассчитывается **Температура каркаса** и каркасы обеих подобластей связаны друг с другом.

На границе двух сред с разной пористостью потери импульса не учитываются, т.е. выполняется следующее соотношение:

$$P_1 + \rho_1 \gamma_1 (V_n^{(1)})^2 = P_2 + \rho_2 \gamma_2 (V_n^{(2)})^2, \text{ где } V_n - \text{нормальная скорость на границе двух сред.}$$

3.3.6.5 Начальные условия

В дополнении к [Начальным условиям](#) модели несжимаемого течения жидкости при включении расчета уравнения **Температура каркаса** добавляется начальное условие для температуры каркаса.

3.3.7 Полностью сжимаемая среда

Данная модель описывает нестационарное/стационарное движение смеси двух [идеальных газов](#) при любых числах Маха (до-, транс-, сверх- и гиперзвуковые течения), а также процесс конденсации пара.

3.3.7.1 Обозначения

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
$\gamma = \frac{C_p}{C_p - R_0/M}$	Показатель адиабаты смеси		
$c = \sqrt{\gamma \frac{P_{abs}}{\rho}}$	Скорость звука		[м·с ⁻¹]
$M = \frac{ V }{c}$	Число Маха	Число Маха	
$H = h + \frac{V^2}{2}$	Полная энтальпия	Энтальпия	[м ² ·с ⁻²]

Остальные параметры описаны в разделе **Обозначения** модели [Несжимаемая жидкость](#).

3.3.7.2 Уравнения

В модели присутствуют следующие уравнения:

Уравнения Навье-Стокса

см. модель [Слабосжимаемой жидкости](#)

Уравнение энергии

$$(1) \quad \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}H) = \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \mu_t \right) \nabla H \right) + Q$$

3.3.7.2.1 Модели массопереноса

Перенос смешиваемых компонент

см. модель [Слабосжимаемая жидкость](#).

Равновесная модель конденсации

Обозначение	Название	Переменная в FlowVision	Размерность
C	Массовая концентрация жидкой фазы в смеси	Концентрация	
$P_{\text{sat}}(T_{\text{abs}})$	Давление насыщения		[Па]

Давление насыщения

Давление насыщения $P_{\text{sat}}(T_{\text{abs}})$ – обратная функция **Точки кипения**, загружаемой из **Базы Веществ** (см. том [Руководство пользователя](#)).

Условие конденсации

В данной модели всегда выполнено следующее условие

$$(2) \quad P_{\text{abs}} \leq P_{\text{sat}}(T_{\text{abs}})$$

Если $P_{\text{abs}} < P_{\text{sat}}(T_{\text{abs}})$, то массовая концентрация жидкой фазы в смеси равна 0. Если же $P_{\text{abs}} = P_{\text{sat}}(T_{\text{abs}})$, то из своего [определения](#) для данного значения T_{abs} известна энтальпия.

Внимание! При решении задач, связанных с конденсацией, необходимо использовать опцию **Глобальные параметры** → **Опции** → **Совм. решение** (подробнее см. [Совместное решение](#)).

3.3.7.2.2 Модель расчета средних квадратов пульсаций

см. модель [Слабосжимаемая жидкость](#).

3.3.7.3 Параметры

В дополнение к [Параметрам](#) модели несжимаемого течения жидкости в данной модели присутствуют следующие параметры в папке **Физические параметры** **Параметры модели**:

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение
Дополнительно	Mach Incompressible	
Массоперенос	Массовая концентрация	
	Конденсация	using

Примечание к таблице:

Если величина **Числа Маха** в ячейке меньше величины **Mach Incompressible**, то в данной ячейке расчет идет без учета сжимаемости.

3.3.7.4 Граничные условия

В дополнение к типам границ, определённым для модели [Слабосжимаемая жидкость](#), в данной модели присутствуют типы

- **Риман**
- **Симметрия физ.**

Ниже приведено соответствие между типами границ и граничными условиями:

Тип границы	Граничные условия, устанавливаемые по умолчанию		Допустимые граничные условия	
	Температура и Концентрация	Скорость	Температура и Концентрация	Скорость
Вход/выход	Значение на стенке	Нормальная скорость с давлением	Нулевой поток	Норм. массовая скорость
				Вектор масс. скорости
				Закрутка масс. скорости
			Значение на стенке	Давление
				Нормальная скорость с давлением
				Вектор скорости с давлением
Полная температура	Полное давление			
Риман	Риман	Риман	Риман	Риман
Симметрия физ.	Симметрия физ.	Симметрия физ.	Симметрия физ.	Симметрия физ.

3.3.7.4.1 Тип Вход/выход

Полное давление

Данное условие задаёт дозвуковой вход-выход.

На закладке **Температура** задаётся полная температура (T_0) или статическая температура (T). На закладке **Скорость** задаётся полное давление (P_0).

В случае входа скорость полагается нормальной входному сечению. Модуль скорости приходит по характеристике, движущейся вверх по потоку. Скорость, в общем случае, переменна по сечению. Следовательно, давление также переменна по сечению.

Если задана полная температура, статическая температура находится из соотношения

$$(1) \quad h(T_0) = h(T) + \frac{|V|^2}{2}$$

В частном случае постоянной теплоемкости

$$(2) \quad T_0 = T + \frac{|V|^2}{2C_p}$$

Статическое давление (P) находится из соотношения

$$(3) \quad P_0 = P \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

При малых числах Маха:

$$(4) \quad P_0 = P + \rho \frac{|V|^2}{2}$$

В случае выхода

$$(5) \quad P = P_0$$

Вектор скорости и полная энтальпия (H) сносятся из центра приграничной ячейки на границу.

Значения скалярных переменных $C, k, \varepsilon, \omega, k_\theta, \varepsilon_\theta$, заданные на соответствующих закладках, используются в случае входа. В случае выхода на границу сносятся значения этих переменных в центре приграничной ячейки.

Нормальная скорость с давлением

На закладке **Скорость** задаются модуль нормальной (к поверхности) скорости:

$$(5) \quad V = V_n \mathbf{n}$$

и статическое давление. Отметим, что это граничное условие (вместе со значениями T_w и C_w) задаёт массовую скорость ρV .

Вектор скорости с давлением

На закладке **Скорость** задаются задётся *вектор* скорости:

$$(6) \quad \{V_x, V_y, V_z\}$$

и статическое давление. Отметим, что это граничное условие (вместе со значениями T_w и C_w) также задаёт массовую скорость ρV .

3.3.7.4.2 Тип Свободный выход

В дополнение к [Граничным условиям](#), определённым для модели **Слабосжимаемая жидкость**, в данной модели можно использовать следующее сверхзвуковое граничное условие:

Свободная граница

На границе области нормальные производные компонент вектора скорости и давления равны нулю.

$$(7) \quad \left. \frac{\partial P}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\text{w}} = 0$$

$$(8) \quad (\nabla V_i, \mathbf{n})|_{\text{w}} = 0, \quad i = 1+3,$$

здесь \mathbf{n} – нормаль к границе.

Это граничное условие устанавливается только на сверхзвуковых выходных сечениях ($M > 1$).

3.3.7.4.3 Тип Риман

Данный тип граничных условий позволяет моделировать до-, транс- и сверхзвуковые втекание и вытекание через данную поверхность. Условия учитывают направление распространения возмущений. Поэтому возмущения не отражаются от 'Римановских' поверхностей. Условия рекомендуются для задач внешнего обтекания и моделирования взрывов. При использовании Римановских условий отпадает необходимость далеко отодвигать внешние границы.

На закладке **Температура** задаётся статическая температура на бесконечности (T_∞). На закладке **Скорость** задаются *вектор* скорости:

$$(1) \quad \{V_x, V_y, V_z\}_\infty$$

и статическое давление на бесконечности (P_∞). Значения скалярных переменных $C, k, \varepsilon, \omega, k_\theta, \varepsilon_\theta$ на бесконечности задаются на соответствующих закладках.

На границе полагаются выполненными следующие соотношения:

Нормальная компонента скорости и скорость звука:

$$(2) \quad V_{n,b} = \frac{1}{2}(R_1 + R_2)$$

$$(3) \quad c_b = \frac{1}{4}(R_1 - R_2)(\gamma_b - 1)$$

Здесь

$$(4) \quad R_1 = V_{n,\text{cell}} + \frac{2c_{\text{cell}}}{\gamma_{\text{cell}} - 1} \quad \text{если } V_{n,\text{cell}} + c_{\text{cell}} < 0 \quad \text{- сверхзвуковой выход}$$

$$(5) \quad R_1 = V_{n,\infty} + \frac{2c_\infty}{\gamma_\infty - 1} \quad \text{если } V_{n,\text{cell}} + c_{\text{cell}} \geq 0 \quad \text{- дозвуковой выход}$$

$$(6) \quad R_2 = V_{n,\infty} - \frac{2c_\infty}{\gamma_\infty - 1} \quad \text{если } V_{n,\text{cell}} - c_{\text{cell}} > 0 \quad \text{- сверхзвуковой вход}$$

$$(7) \quad R_2 = V_{n,cell} - \frac{2c_{cell}}{\gamma_{cell} - 1} \quad \text{если } V_{n,cell} - c_{cell} \leq 0 \quad \text{- ДОЗВУКОВОЙ ВХОД}$$

$$(8) \quad \gamma_b = \sqrt{\gamma_{\infty} \gamma_{cell}}$$

Сверхзвук:

$$(9) \quad |V_{n,b}| > c_b$$

$$(10) \quad V_{i,b} = V_{i,\infty} \quad \text{если } V_{n,b} > 0 \quad \text{- ВХОД}$$

$$(11) \quad V_{i,b} = V_{i,cell} \quad \text{если } V_{n,b} \leq 0 \quad \text{- ВЫХОД}$$

$$(12) \quad P_b = P_{\infty} \quad \text{если } V_{n,b} > 0 \quad \text{- ВХОД}$$

$$(13) \quad P_b = P_{cell} \quad \text{если } V_{n,b} \leq 0 \quad \text{- ВЫХОД}$$

$$(14) \quad T_b = T_{\infty} \quad \text{если } V_{n,b} > 0 \quad \text{- ВХОД}$$

$$(15) \quad T_b = T_{cell} \quad \text{если } V_{n,b} \leq 0 \quad \text{- ВЫХОД}$$

Дозвук:

$$(16) \quad |V_{n,b}| \leq c_b$$

$$(17) \quad V_{i,b} = V_{i,\infty} + n_i \frac{P_{\infty} - P_b}{\rho_b c_b} \quad \text{если } V_{n,b} > 0 \quad \text{- ВХОД}$$

$$(18) \quad V_{i,b} = V_{i,cell} - n_i \frac{P_{cell} - P_b}{\rho_b c_b} \quad \text{если } V_{n,b} \leq 0 \quad \text{- ВЫХОД}$$

$$(19) \quad \rho_b = \left(\frac{c_b^2}{\gamma_b S} \right)^{\frac{1}{\gamma_b - 1}}$$

$$(20) \quad P_b = \rho_b \frac{c_b^2}{\gamma_b}$$

$$(21) \quad T_b = \frac{c_b^2}{\gamma_b \frac{R_A}{m_b}}$$

Здесь

$$(22) \quad S = \frac{P_{\infty}}{\rho_{\infty}^{\gamma_{\infty}}} \quad \text{если } V_{n,b} > 0$$

$$(23) \quad S = \frac{P_{cell}}{\rho_{cell}^{\gamma_{cell}}} \quad \text{если } V_{n,b} \leq 0$$

$$(24) \quad m_b = m_{\infty} \quad \text{если } V_{n,b} > 0$$

$$(25) \quad m = m_{cell} \quad \text{если } V_{n,b} \leq 0$$

Остальные скалярные величины:

$$(26) \quad f_b = f_{\infty} \quad \text{если } V_{n,b} > 0$$

$$(27) \quad f = f_{cell} \quad \text{если } V_{n,b} \leq 0$$

т. е. сносятся потоком на границу.

Полная энтальпия:

$$(28) \quad H = h(T_b, C_b) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 V_{i,b}^2$$

Предположения и обозначения:

Нормаль к границе направлена внутрь расчётной области.

R_1, R_2 - инварианты Римана,

γ - показатель адиабаты (отношение теплоёмкостей),

c - скорость звука,

S - энтропия,

m - молярная масса,

$f = C, k, \varepsilon, \omega, k_\theta, \varepsilon_\theta$

Индексами обозначены соответственно

∞ - значение на бесконечности,

b - значение на границе,

cell - значение в центре масс приграничной ячейке,

n - нормальная составляющая скорости,

$i=1,2,3$ - компоненты скорости.

Остальные обозначения определены выше.

3.3.7.4.4 Тип Симметрия физ.

Данный тип задаёт 'ййлерову' (невязкую нетеплопроводную) стенку с учётом возмущений, приходящих по нормальной звуковой характеристике.

На закладках ничего задавать не нужно.

На границе полагаются выполненными следующие соотношения:

$$(1) \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} H = 0$$

$$(2) \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} C = 0$$

$$(3) \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} T = 0 \quad (\text{следствие (1) и (2)})$$

$$(4) \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} k = \vec{n} \cdot \vec{\nabla} \varepsilon = \vec{n} \cdot \vec{\nabla} \omega = \vec{n} \cdot \vec{\nabla} k_\theta = \vec{n} \cdot \vec{\nabla} \varepsilon_\theta = 0$$

$$(5) \quad (\vec{n} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}_\tau = 0$$

$$(6) \quad V_{n,b} = 0$$

$$(7) \quad P_b = P_{\text{cell}} \exp\left(-V_{n,\text{cell}} \frac{\gamma_{\text{cell}}}{c_{\text{cell}}}\right)$$

Здесь γ - показатель адиабаты (отношение теплоёмкостей), c - скорость звука.

Индексами обозначены соответственно

b - значение на границе,

cell - значение в центре масс приграничной ячейки,

n - нормальная составляющая скорости,

τ - тангенциальная составляющая скорости.

Остальные обозначения определены выше.

3.3.7.5 Начальные условия

См. [Начальные условия](#) модели Несжимаемая жидкость.

3.3.8 Модель двухфазного течения жидкости

Модель предназначена для исследования двухфазных течений со свободной поверхностью. Эта модель используется для определения коэффициентов сопротивления кораблей и подводных аппаратов, заполнения форм расплавом металлов и т.д. Модель использует функцию VOF, принимающую значения 0 (газ) и 1 (жидкость). Свободная поверхность представляется набором фасеток, отсекающих расчетную область. Рассчитываются все ячейки, в которых присутствует жидкость.



Аппроксимация свободной поверхности

3.3.8.1 Обозначения

В приводимых ниже обозначениях индекс 'f' относится к жидкости. Газ не рассчитывается.

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
F	Степень заполнения жидкостью ячейки ("Volume of Fluid"): 0 – пустая ячейка; 1 – полностью заполненная ячейка	Относ. объем жидкости в ячейке	
ρ_f	Плотность жидкости		[кг·м ⁻³]
D_f	Коэффициент диффузии в жидкости		[кг·м ⁻¹ ·с ⁻¹]
C_p^f	Удельная теплоемкость жидкости		[Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹]
λ_f	Коэффициент теплопроводности жидкости		[Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]
μ_f	Динамическая вязкость жидкости		[кг·м ⁻¹ ·с ⁻¹]

Остальные параметры описаны в разделе **Обозначения** модели [Несжимаемая жидкость](#).

3.3.8.2 Уравнения

В модели присутствуют следующие уравнения:

Уравнения Навье-Стокса

$$(1) \quad \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T) + \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right) \mathbf{g}$$

$$(2) \quad \nabla \mathbf{V} = 0.$$

Уравнение энергии

см. модель [Несжимаемая жидкость](#)

Уравнение переноса функции заполнения F

$$(3) \quad \frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{V} \nabla F = 0$$

Коэффициенты μ , λ , D , C_p и плотность ρ вычисляются в соответствии со следующей формулой

$$(4) \quad f = F f_f$$

3.3.8.2.1 Модели массопереноса

См. модель [Несжимаемая жидкость](#).

3.3.8.2.2 Модель расчета средних квадратов пульсаций

См. модель [Слабосжимаемая жидкость](#).

3.3.8.3 Параметры

В дополнение к [Параметрам](#), относящимся к модели несжимаемого течения жидкости, в данной модели присутствуют следующие параметры в папке **Физические параметры** **Параметры модели**:

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Уровень жидкости	Начальный x уровень жидкости	x_{ini}	[М]
	Начальный y уровень жидкости	y_{ini}	[М]
	Начальный z уровень жидкости	z_{ini}	[М]

Следует отметить, что начальный уровень жидкости перпендикулярен одной из координатных осей, а жидкость в начальный момент занимает объем между плоскостями $X=X_{min}$ и $X=X_{ini}$, либо $Y=Y_{min}$ и $Y=Y_{ini}$, либо $Z=Z_{min}$ и $Z=Z_{ini}$, где индекс 'min' означает минимальное значение соответствующей координаты в данной расчетной области.

$$\begin{array}{ll}
 \text{В первом случае:} & x_{ini} = X_{ini} - X_{min} \quad y_{ini} = 0 \quad z_{ini} = 0 \\
 \text{Во втором случае:} & x_{ini} = 0 \quad y_{ini} = Y_{ini} - Y_{min} \quad z_{ini} = 0 \\
 \text{В третьем случае:} & x_{ini} = 0 \quad y_{ini} = 0 \quad z_{ini} = Z_{ini} - Z_{min}
 \end{array}$$

Отметим также что начальный объем, занимаемый жидкостью, может быть задан с помощью фильтра [Установить переменную](#) для переменной F .

3.3.8.4 Граничные условия

В данной модели используются те же граничные условия, что и в модели [Несжимаемая жидкость](#). Для функции заполнения F определены те же граничные условия, что и для **Температуры**, и установлено аналогичное соответствие с типом границы.

3.3.8.5 Начальные условия

См. [Начальные условия](#) модели **Ламинарная жидкость**.

3.3.9 Модель горения

Данная модель описывает процессы горения *газовых* смесей при *дозвуковых* числах Маха.

3.3.9.1 Базовые понятия

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
f	Концентрация топлива	Горючее	
o	Концентрация окислителя	Окислитель	
p	Концентрация продуктов сгорания	Продукты полного сгорания	
n	Нейтральный газ	Нейтральный газ	
z	Функция Зельдовича	Концентрация	
δ	Исходная концентрация окислителя		
ρ̃	Концентрация дымовых газов	Дымовые газы	
ρ̂	Концентрация образовавшихся продуктов сгорания		

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
i	Массовый стехиометрический коэффициент		
W	Осредненная скорость брутто-реакции	Интенсивность горения	[кг·м ⁻³ ·с ⁻¹]

Рассмотрим газовую смесь, состоящую из топлива (f), окислителя (o), продуктов сгорания (p) и нейтрального газа (n):

$$(1) \quad f + o + p + n = 1$$

Пусть продукты сгорания образуются в результате **брутто-реакции**. Эта модель означает, что концентрации топлива, окислителя, продуктов сгорания и нейтрального газа удовлетворяют **уравнению для скалярных величин**, в котором источник равен:

- для топлива $Q_f = -W$;
- для окислителя $Q_o = -iW$;
- для продуктов сгорания $Q_p = (1+i)W$;
- для нейтрального газа $Q_n = 0$.

Под дымовыми газами подразумеваются те же продукты сгорания, **подаваемые** в горелку (рециркуляция). Модель (2) означает, что продукты сгорания могут лишь образовываться, но никак не исчезать. Это обстоятельство позволяет представить концентрацию продуктов сгорания в виде суммы концентраций дымовых газов (\tilde{p}) и образовавшихся продуктов сгорания (\hat{p})

$$(2) \quad p = \tilde{p} + \hat{p}$$

При этом функции \tilde{p} и \hat{p} удовлетворяют **уравнению для скалярных величин** с нулевым ($Q_{\tilde{p}} = 0$) и исходным ($Q_{\hat{p}} = Q_p$) источниками соответственно.

Введем в рассмотрение переменную Зельдовича:

$$(3) \quad z = f + \frac{p - \tilde{p}}{1+i}$$

удовлетворяющую **уравнению для скалярных величин** с нулевым источником ($Q_z = 0$). Поскольку

граничные условия для p и \tilde{p} совпадают, то граничные условия для z и f также одинаковы. Отсюда следует, что функция Зельдовича имеет смысл исходной (восстановленной) концентрации топлива.

Исходную концентрацию окислителя (\tilde{o}) найдем из условия аналогичного (1)

$$(4) \quad z + \tilde{o} + \tilde{p} + n = 1$$

Таким образом, в общем случае решаются **уравнения для скалярных величин** для f, z, \tilde{p} , n, одно из которых неоднородное, а три – однородные. Переменные o и p находятся из следующих соотношений:

$$(5) \quad o = \tilde{o} - i(z - f)$$

$$(6) \quad p = \tilde{p} + (1+i)(z - f)$$

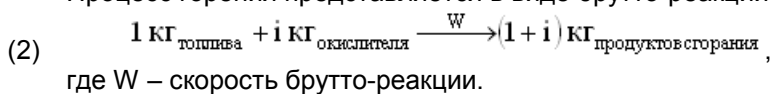
3.3.9.2 Уравнения

Модель горения основана на следующих уравнениях **слабосжимаемой модели**:

- **уравнения Навье-Стокса**;
- **уравнение энергии**;
- уравнение состояния (см. **Чистые вещества**);
- уравнения для скалярных величин, описывающих концентрацию топлива, окислителя, продуктов сгорания, нейтрального газа, оксидов азота и маркера.

$$(1) \quad \frac{\partial(\rho\xi)}{\partial t} + \nabla(\rho V\xi) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \xi \right) + Q_{\xi}$$

- Процесс горения представляется в виде брутто-реакции



3.3.9.3 Скорость брутто-реакции

В зависимости от выбора [скорости брутто-реакции](#) W различают:

- **Модель Зельдовича (модель "что смешалось, то сгорело")**
Скорость W предполагается бесконечно большой. В этой модели окислитель и горючее не существуют одновременно в одной точке пространства.
- **Кинетическая модель горения**
Скорость W определяется кинетикой процесса, что справедливо при ламинарном течении смеси топлива и окислителя. W выбирается в виде закона Аррениуса W_{kin} .
- **Турбулентная модель горения**
Скорость W определяется скоростью турбулентного смешения W_{mix} топлива и окислителя. Эта модель справедлива для предварительно неперемешанных топлива и окислителя.
- **Пульсационная модель горения**
Скорость W определяется уровнем относительных пульсаций γ , принимающих значение 0 при полностью перемешанном горючем и окислителе и значение 1 при неперемешанных компонентах

$$\frac{1}{W} = \frac{1-\gamma}{W_{kin}} + \frac{\gamma}{W_{mix}}$$

3.3.9.3.1 Модель горения Зельдовича

Обозначение	Название	Имя в FlowVision	Размерность
α	коэффициент избытка окислителя	Alpha	

Рассмотрим простейшую модель горения, в которой постулируется [бесконечная скорость брутто-реакции](#) W . Это означает, что топливо и окислитель не могут сосуществовать в одной точке (ячейке). В этом случае решаются три однородные [уравнения для скалярных величин](#) $Z, \tilde{\rho}, p$. Топливо находится из следующего соотношения

$$(1) \quad f = \begin{cases} (1-\alpha)Z, & \alpha \leq 1 \\ 0, & \alpha > 1 \end{cases}$$

где коэффициент избытка окислителя α определен так:

$$(2) \quad \alpha = \frac{\tilde{o}}{iZ}$$

Переменные o и p находятся из соотношений: [\(5\) для \$o\$](#) и [\(6\) для \$p\$](#) .

3.3.9.3.2 Кинетическая модель горения

Обозначение	Название	Имя в FlowVision	Размерность
A	Константа в законе Аррениуса	Kin_const_A	[кг ⁻¹ ·м ³ ·с ⁻¹]
B	Константа в законе Аррениуса	Kin_const_B	[К]

Для перемешанной до молекулярного уровня смеси топлива и окислителя [скорость \$W\$ брутто-реакции](#) имеет вид закона Аррениуса

$$(1) \quad W_{kin} = A e^{-\frac{B}{T}} \rho^2 f \cdot \frac{o}{i}$$

Кинетические константы в законе Аррениуса взяты из работы [Волков Э.П., Кудрявцев Н.Ю. Моделирование образования окислов азота в турбулентном диффузионном факеле, Инженерно-физический журнал, 1989, Т.56, N 6, с. 885-894]

$$(2) \quad A=10^{10}, B = 18400$$

3.3.9.3.3 Турбулентная модель горения

Для неперемешанной смеси топлива и окислителя [скорость \$W\$ брутто-реакции](#) определяется скоростью турбулентного смешения (модель Магнуссена) [Magnussen B.F., and Hjertager B.H. *On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, Sixteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 719-729, 1976*]

$$(1) \quad W_{\text{mix}} = 23.6 \left(\frac{\mu \epsilon}{\rho k^2} \right)^{\frac{1}{2}} \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left(f, \frac{0}{1} \right)$$

3.3.9.3.4 Пульсационная модель горения

Обозначение	Название	Имя в FlowVision	Размерность
g	Средний квадрат пульсаций функции Зельдовича	Пульсация	
γ	Относительные пульсации функции Зельдовича	Gamma	
T_{ign}	Температура воспламенения		[K]

Степень смешения топлива и окислителя характеризует уровень относительных пульсаций функции Зельдовича $0 \leq \gamma \leq 1$.

Определим [скорость \$W\$ брутто-реакции](#) через [кинетическую скорость горения перемешанной смеси](#) и [предельную скорость процесса перемешивания следующим](#) образом [Аксенов А.А., Похилко В.И., Тишин А.П. *Исследование двухступенчатого сжигания метана в вихревой горелке. Труды 2-ой Российской национальной конференции по теплообмену, Москва, 26-30 октября 1998, т.3, с.161-164*]:

$$(1) \quad \frac{1}{W} = \frac{1-\gamma}{W_{\text{kin}}} + \frac{\gamma}{W_{\text{mix}}}$$

где

$$(2) \quad \gamma = \min \left(1, \frac{\sqrt{g}}{z} \right)$$

Пульсации функции Зельдовича рассчитываются аналогично пульсациям **Концентрации** в модели [Слабосжимаемой жидкости](#).

На практике топливо и окислитель химически реагируют лишь тогда, когда температура смеси выше некоторого порогового значения T_{ign} и $\alpha_{\text{min}} \leq \alpha \leq \alpha_{\text{max}}$. Поэтому источник для топлива f выберем равным:

$$(3) \quad Q_f = \begin{cases} 0 & T < T_{\text{ign}} \vee \alpha < \alpha_{\text{min}} \vee \alpha > \alpha_{\text{max}} \\ -W & T \geq T_{\text{ign}} \wedge \alpha_{\text{min}} \leq \alpha \leq \alpha_{\text{max}} \end{cases}$$

3.3.9.4 Инициализация процесса горения

Для реализации кинетической или пульсационной модели горения необходимо, чтобы в какой-то части расчетной области температура смеси стала больше температуры воспламенения T_{ign} . Добиться этого можно, используя фильтр **Зажигание** – см. том [Руководство пользователя](#). Этот фильтр устанавливает в выбранной области модель горения Зельдовича. Для этого фильтра по умолчанию установлен **одноразовый** тип применения. Это означает, что после его использования в выбранной области восстанавливается исходная модель горения.

3.3.9.5 Установка свойств реагентов

В данной модели используются 4 вещества. Их свойства должны загружаться в определенном порядке:

Первое вещество	Топливо
Второе вещество	Окислитель
Третье вещество	Продукты сгорания
Четвертое вещество	Нейтральный газ

Все свойства реагентов смеси берутся из **Базы Веществ** (см. том [Руководство пользователя](#)).

Смесь	Имя в Базе Веществ		
	Топливо	Окислитель	Продукты сгорания
Природный газ и воздух	Природный газ (ПГ)	Воздух (В)	Продукты сгорания (ПГ+В)
Угарный газ и воздух	Угарный газ (СО)	Воздух (В)	Продукты сгорания (СО+В)
Метан и воздух	Метан	Воздух (В)	Продукты сгорания (СН ₄ +В)
Пропан-бутан и воздух	Пропан-бутан (ПБ)	Воздух (В)	Продукты сгорания (ПБ+В)
Водород и воздух	Водород	Воздух (В)	Продукты сгорания (Н ₂ +В)
(СН ₄ +Н ₂) и воздух	СН ₄ +Н ₂	Воздух (В)	Продукты сгорания ((СН ₄ +Н ₂)+воздух)
(2Н ₂ +СО) и воздух	2Н ₂ +СО	Воздух (В)	Продукты сгорания ((2Н ₂ +СО)+воздух)

По умолчанию установлены свойства смеси – природный газ и воздух.

3.3.9.6 Образование оксидов азота NO

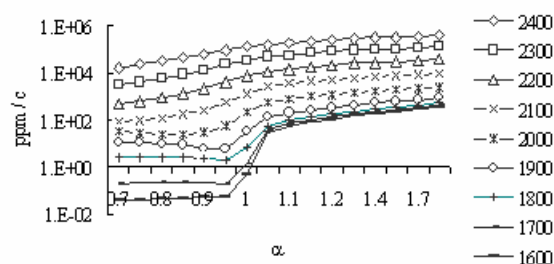
При горении природного газа в воздухе возможно моделирование образования оксидов азота NO. Поскольку концентрация оксидов азота NO не влияет на основные газодинамические параметры (скорость, температуру и т.п.) их расчет проводится при "замороженных" значениях газодинамических переменных.

Обозначение	Название	Имя в FlowVision	Размерность
NO	Концентрация оксидов азота	NOx	[ppm]
	Табулированные значения скорости образования NO	Источник NOx	[ppm·с ⁻¹]

Как известно, основной вклад в образование оксидов азота NO вносят так называемые термические оксиды азота. Их учет осуществляется путем решения [уравнения для скалярных величин](#) с источником

$$Q_{NO} = \rho Q_{NO}^{tab}$$

Табулированные значения скорости образования оксидов азота Q_{NO}^{tab} приведены ниже



Зависимость скорости образования NO от температуры (°K) и коэффициента избытка окислителя α.

Приведенные на рисунке зависимости $Q_{NO}(\alpha, T)$ были получены из решения системы ОДУ, описывающей полный механизм образования оксидов азота [Тишин А.П., Худяков В.А., Артамонов А.К. Исследование возможностей уменьшения концентрации оксидов азота при сжигании топлив в теплоэнергоагрегатах. Изд. ЦНИИМАШ, г. Калининград М.О., 1994, 60 с.].

3.3.9.7 Параметры

В дополнение к [Параметры](#) модели несжимаемого течения жидкости в **Модели Горения** присутствуют следующие параметры:

Имя страницы в окне Параметры Модели	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Стехиометрический коэффициент	Стехиометрический коэффициент	<i>i</i>	

Имя страницы в окне Параметры Модели	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Кинетические константы	Kin_const_A	Kin_const_A.dll	[кг ⁻¹ ·м ³ ·с ⁻¹]
	Kin_const_B	B	[К]
Источник NO	Коэффициент коррекции температуры	Имя соответствующей dll	
	Источник NO	Имя соответствующей dll	
Пороги воспламеняемости	Темп. воспл., К	T _{ign}	[К]
	alpha_min	α _{min}	
	alpha_min	α _{max} Имя соответствующей dll, начинающееся с LFL	
Хим. кинетика	модель		

По умолчанию установлены:

- параметры для смеси – природный газ и воздух.
- **Пульсационная модель** для определения скорости брутто-реакции.

Значения параметров модели горения для разных смесей:

Смесь	Стехиометрический коэффициент	Температура воспламенения (°К)*	Нижняя граница воспламенения (α _{max})	Верхняя граница воспламенения (α _{min})
Природный газ и воздух	16.92	923	1.9 или dll **	0 ***
Угарный газ и воздух	2.468	883	1.9 или dll **	0 ***
Метан и воздух	17.24	923	1.9 или dll **	0 ***
Пропан-бутан и воздух	15.67	750	1.9 или dll **	0 ***
Водород и воздух	34.29	803	9.8	0.15
(CH ₄ +H ₂) и воздух	19.14			
(2H ₂ +CO) и воздух	6.472			

* Значения взяты из источника [Стаскевич Н.И. и др. Справочник по газоснабжению и использованию газа", Недра, 1990, 762с].

** В работе [Johan E. Hustad and Otto K. Sonju, *Experimental Studies of Lower Flammability Limits of Gases and Mixtures of Gases at Elevated Temperatures. Combustion and Flame*, 71: 283-294 (1988)] имеются экспериментальные данные, которые устанавливают нижнюю границу воспламенения, т.е. минимальную молярную концентрацию топлива x_{LFL}.

Для смеси метана с воздухом эта зависимость имеет вид:

$$(1) \quad x_{LFL} = 0.053 \cdot (1 - 0.00085 \cdot (T - 298))$$

Используя [определение коэффициента избытка окислителя](#) можно выразить нижнюю границу воспламенения через α_{max}.

При T=298K нижняя граница воспламенения (1) равна α_{max} 1.9.

*** Для богатых смесей данных нет. Поэтому верхняя граница воспламенения по умолчанию равна α_{min}=0.

3.3.9.8 Граничные условия

См. [Граничные условия](#) модели слабосжимаемого течения.

3.3.9.9 Начальные условия

См. [Начальные условия](#) модели несжимаемой жидкости.

3.3.10 Модель 2-фазного горения

Данная модель описывает процессы горения жидкого и твёрдого топлива при дозвуковых скоростях течения газа. В основе модели лежат следующие основные предположения:

- 1) Капли жидкого топлива испаряются в расчетном объёме, горение паров топлива протекает в газовой фазе;
- 2) Частицы твёрдого топлива сначала выпускают летучие, а затем горит коксовый остаток. Горение летучих протекает в газовой фазе, горение кокса – на поверхности частицы. В процессе пиролиза (выхода летучих) размер частицы остаётся неизменным (меняется её плотность). В процессе горения коксового остатка плотность частицы остаётся неизменной (меняется её диаметр). Массовая доля золы в коксовом остатке остаётся неизменной (зола уносится с поверхности частицы);
- 3) Газовая фаза представлена пятью компонентами: летучие, O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O ;
- 4) Частица – капсула, содержащая predetermined массовые доли летучих, кокса, золы и влаги. Если частица жидкая, то массовые доли кокса, золы и влаги задаются равными нулю;
- 5) Обобщенная формула жидкого топлива и летучих: $C_xH_yO_z$;
- 6) Летучие полагаются составленными из 6-ти компонентов: CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , H_2O , пары смолы;
- 7) Окислитель: O_2 ;
- 8) Продукты сгорания: CO_2 и H_2O .
- 9) Процессы, протекающие с участием азота и серы, содержащимися в твёрдом топливе, не моделируются. Однако, интегральный тепловой эффект этих процессов учитывается.

Модель предназначена для расчёта газо-термодинамических характеристик горелок, работающих на жидком углеводородном топливе, pulverized угле, сланцах и целлюлозосодержащей биомассе (древесных опилках, измельченной скорлупе орехов, отходах сахарного производства, и т.п.).

Модель 2-фазного горения дублирует **Модель горения**, когда (газофазное) горючее представимо обобщенной формулой $C_xH_yO_z$, окислитель – произвольная смесь O_2 и N_2 .

3.3.10.1 Обозначения

Индексы

Обозначение	Смысл
*	Консервативный скаляр (массовая концентрация восстановленного (исходного) газового компонента)
0	Начальное значение
g	Характеристика газовой фазы
in	Значение характеристики частицы в точке входа в ячейку
out	Значение характеристики частицы в точке выхода из ячейки
p	Характеристика частицы
t	Турбулентная характеристика
V	Летучие
W	Влага

3.3.10.1.1 Состав топлива

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
ash	Массовая доля золы в исходном топливе	зола (в угле)	
char	Массовая доля кокса в исходном топливе	кокс (в угле)	
volotiles	Массовая доля летучих в исходном топливе	летучие (в угле)	
water	Массовая доля влаги в исходном топливе		

3.3.10.1.2 Состав летучих

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
CH_4	Массовая доля метана в летучих	CH4 (в летучих)	
H_2	Массовая доля водорода в летучих	H2 (в летучих)	
CO	Массовая доля CO в летучих	CO (в летучих)	
CO_2	Массовая доля углекислого газа в летучих	CO2 (в летучих)	
H_2O	Массовая доля водяного пара в летучих		
tar	Массовая доля паров смолы в летучих	пары смолы (в летучих)	

3.3.10.1.3 Состав золы

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
Al_2O_3	Массовая доля Al_2O_3 в золе	Al2O3 (в золе)	
Al_2O_3	Массовая доля Fe_2O_3 в золе	Fe2O3 (в золе)	
SiO_2	Массовая доля SiO_2 в золе		

3.3.10.1.4 Газовые компоненты

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
$C_xH_yO_z^*$	Восстановленная массовая концентрация летучих (консервативный скаляр)	Летучие_Восстановленные	
$C_xH_yO_z$	Истинная массовая концентрация летучих	Летучие_Истинные	
O_2^*	Восстановленная массовая концентрация O_2 (консервативный скаляр)	O2_Восстановленный	
O_2	Истинная массовая концентрация O_2	O2_Истинный	
CO_2^*	Восстановленная массовая концентрация CO_2 (консервативный скаляр)	CO2_Восстановленный	
CO_2	Истинная массовая концентрация CO_2	CO2_Истинный	
H_2O^*	Восстановленная массовая концентрация H_2O (консервативный скаляр)	H2O_Восстановленный	
H_2O	Истинная массовая концентрация H_2O	H2O_Истинный	
N_2	Истинная массовая концентрация N_2	N2_Истинный	

3.3.10.1.5 Другие обозначения

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
A_{pyr}	Предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса для пиролиза (кинетическая модель)		
A_{char}	Предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса для горения кокса (кинетическая модель)		

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
A_{chem}	Предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса для горения летучих в газовой фазе (кинетический режим)		
C_{Dj}	Коэффициент сопротивления частиц, летящих по j-ой траектории		[Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹]
D_i	Эффективный коэффициент молекулярной диффузии вещества i (вычисляется как коэффициент бинарной диффузии вещества i в азоте)		
d_p	Диаметр частицы		[м]
E_{rad}	Плотность энергии излучения	Плотность Энергии Излучения	[Вт·м ⁻²]
E_{pyr}	Энергия активации в законе Аррениуса для пиролиза (кинетическая модель)		[К]
E_{char}	Энергия активации в законе Аррениуса для горения кокса (кинетическая модель)		[К]
E_{chem}	Энергия активации в законе Аррениуса для горения летучих в газовой фазе (кинетический режим)		[К]
h	Энтальпия		[Дж·кг ⁻¹]
h_i^0	Энтальпия образования вещества i при 25 С	Теплота образования	[Дж·кг ⁻¹]
h_{lat}	Скрытая теплота процесса		[Дж·кг ⁻¹]
i_{char}	Стехиометрический коэффициент гетерогенной брутто-реакции горения кокса		
i_{chem}	Стехиометрический коэффициент гетерогенной брутто-реакции горения летучих		
k	Турбулентная энергия	Турбулентная энергия	[м ² ·с ⁻²]
LHV	Низшая теплота сгорания топлива	LHV	[Дж·кг ⁻¹]
M_i	Молярная масса вещества i		
m_p	Масса частицы		[кг]
	Скорость вдува массы с единицы поверхности частицы		[кг·м ⁻² ·с ⁻¹]
Δm	Вдув массы с модельной частицы за один шаг траектории		[кг]
Δm_i	Вдув массы газового компонента i с модельной частицы за один шаг траектории		[кг]
m_i	Масса вещества i в частице		[кг]
m_v	Масса летучих в частице		[кг]
m_v^0	Начальная масса летучих в частице		[кг]
m_w	Масса влаги в частице		[кг]
m_w^0	Начальная масса влаги в частице		[кг]
N_{pj}	Число частиц, пролетающих в секунду по траектории j		[с ⁻¹]
Nu	Число Нуссельта		

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
Q_i^p	Источник массы компонента i за счёт частиц	Источник Летучих, частицы [кг/м³с] или Источник O₂, частицы [кг/м³с] или Источник CO₂, частицы [кг/м³с] или Источник H₂O, частицы [кг/м³с]	[кг·м ⁻³ ·с ⁻¹]
Q_i^{chem}	Источник массы компонента i за счёт химических реакций		[кг·м ⁻³ ·с ⁻¹]
Q_p^{mass}	Источник массы за счёт частиц	Источник массы (частицы), кг/м³с	[кг·м ⁻³ ·с ⁻¹]
Q_p^{mom}	Источник импульса за счёт частиц (объемная сила, вектор)		[кг·м ⁻³ ·с ⁻¹]
Q_p^{enth}	Источник энтальпии за счёт частиц	Источник энтальпии (частицы), Вт/м³	[кг·м ⁻¹ ·с ⁻³]
R_A	Универсальная газовая постоянная		[Дж·К ⁻¹ ·моль ⁻¹]
r_p	Радиус частицы		[м]
Sc	Число Шмидта		
Sh	Число Шервуда		
$volotiles_{adf}$	Массовая фракция летучих в соответствующем сухом беззольном топливе		
W	Скорость брутто-реакции газофазного горения		[кг·м ⁻³ ·с ⁻¹]
W_{kin}	Скорость брутто-реакции газофазного горения в кинетическом режиме		[кг·м ⁻³ ·с ⁻¹]
W_{mix}	Скорость турбулентного перемешивания летучих и окислителя		[кг·м ⁻³ ·с ⁻¹]
X_i	Объемная (или молярная) концентрация газового компонента i		
Y_i	Массовая концентрация газового компонента i		
Y_i^{chem} $i=CO_2, H_2O$	Массовая концентрация газового компонента i , полученного в гомогенной брутто-реакции горения летучих		
x, y, z	Коэффициенты, определяющие либо формулу летучих, либо формулу жидкого топлива, либо формулу паров смолы		
	Относительный уровень пульсаций		
ε	Скорость диссипации турбулентной энергии	Турбулентная Диссипация	[м ³ ·с ⁻³]
ε_p	Степень черноты поверхности частиц	Чернота частиц	
Ω_{cell}	Объем расчетной ячейки		[м ³]
$k_k^{local}, k=1 \div 4$	Характеристическое время процесса k при локальных условиях (в данной ячейке) в эмпирической модели пиролиза и горения кокса		[с]
$k'_k, k=1 \div 4$	Безразмерное время, прошедшее с начала процесса k в эмпирической модели пиролиза и горения кокса		
σ_0	Постоянная Стефана-Больцмана		[Вт·м ⁻² ·К ⁻⁴]
α_{min}	Нижний порог воспламенения по коэффициенту избытка окислителя		

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
α_{max}	Нижний порог воспламенения по коэффициенту избытка окислителя		
T_{ign}	Нижний температурный порог воспламенения горючей смеси		[K]

3.3.10.2 Топливо

3.3.10.2.1 Жидкое топливо

Модель предполагает, что жидкое топливо представимо обобщённой формулой $C_xH_yO_z$. Для расчёта горелки, работающей на жидком топливе, пользователь должен:

- загрузить из **Базы Веществ** соответствующее жидкое вещество в элемент дерева **Liquid fuel**,
 - загрузить из **Базы Веществ** его пары в элемент **Volatiles**,
 - задать **Летучие** = a
Кокс = 0
Зола = b
- на закладке-странице **Жидкое/твёрдое топливо** окна **Параметры модели**.
- там же задать значения x,y,z соответственно в позициях x (**CxHyOz, жидкое топливо**), y (**CxHyOz, жидкое топливо**), z (**CxHyOz, жидкое топливо**).

Значения a и b связаны соотношением:

$$(1) \quad a + b = 1$$

Если a=1, b=0, то моделируется капельное топливо. Если a<1, b>0, то моделируется жидкое топливо в зольном каркасе. В этом случае нужно ещё задать состав золы (См. раздел **Твёрдое топливо**).

Пользователь задаёт модель испарения жидкого топлива на странице **Физические Параметры Частицы Эмпирические модели**.

При $Y_{i,sat}(T_p) > 0.99$ и $T_g > T_{p,boil}$ топливо испаряется в режиме кипения по модели [Faeth, G.M., Lazar, R.S., *AIAA Journal*, 1971, No 9, p. 2165]:

$$(2) \quad \dot{m} = Nu \frac{\lambda_g}{d} \frac{1}{C_{p,p}} \ln \left(1 + \frac{C_{p,vol}(T_g - T_{p,boil})}{h_{int}(T_{p,boil})} \right)$$

$$(3) \quad Nu = 2 + 0.556 Re^{1/2} Pr^{1/3} \left(1 + \frac{1.237}{Re Pr^{4/3}} \right)^{-0.5}$$

Здесь индекс 'vol' обозначает летучие (пары жидкого топлива).

Остальные эмпирические модели и обозначения - см. раздел **Частицы**. При испарении жидкого топлива в зольном каркасе диаметр частицы не меняется, уменьшается её кажущаяся плотность.

3.3.10.2.2 Твёрдое топливо

Для расчёта горелки, работающей на твёрдом топливе:

1. Пользователь должен загрузить из **Базы Веществ** пары смолы в элемент **Tar vapor**.
2. В реализованной модели предполагается, что твёрдое топливо состоит из летучих (*volotiles*), кокса (*char*), золы (*ash*), и влаги (*water*). Соответственно, пользователь задаёт массовый состав твёрдого топлива через параметры **Летучие (в угле)**, **Кокс (в угле)**, **Зола (в угле)**. Массовая фракция жидкой воды в топливе вычисляется из соотношения:

$$water = 1 - volotiles - char - ash$$

3. Летучие, в свою очередь, представляются шестью газовыми компонентами. Это H₂, CH₄, H₂O, CO, CO₂, и пары смолы (*tar*). Две возможности предусмотрены для определения состава летучих.
 - а) Если параметр **Состав летучих рассчитывать?** = 1, то состав летучих рассчитывается автоматически по формулам, рекомендованным в [Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. *Моделирование горения твёрдого топлива*, М.: Наука, 1994. 320 с] (с. 108):

$$(1) \quad H_2 = 0.157 - 0.868 \cdot volotiles_{adj} + 1.338 \cdot volotiles_{adj}^2$$

$$(2) \quad CH_4 = 0.201 - 0.469 \cdot volotiles_{adj} + 0.241 \cdot volotiles_{adj}^2$$

$$(3) \quad H_2O = 0.409 - 2.389 \cdot volotiles_{daf} + 4.845 \cdot volotiles_{daf}^2$$

$$(4) \quad CO = 0.423 - 2.653 \cdot volotiles_{daf} + 4.845 \cdot volotiles_{daf}^2$$

$$(5) \quad tar = 0.135 - 0.900 \cdot volotiles_{daf} + 1.906 \cdot volotiles_{daf}^2$$

где

$$(6) \quad volotiles_{daf} = \frac{volotiles_{daf}}{1 - water - ash}$$

При этом значения параметров **CH4 (в летучих), H2 (в летучих), CO (в летучих), CO2 (в летучих), Пары смолы (в летучих)** игнорируются.

- б) Если параметр **Состав летучих рассчитывать? = 0**, то состав летучих задаётся вручную в позициях **CH4 (в летучих), H2 (в летучих), CO (в летучих), CO2 (в летучих), Пары смолы (в летучих)**. Массовая фракция водяного пара в летучих вычисляется из соотношения:

$$H_2O = 1 - CH_4 - H_2 - CO - CO_2 - tar$$

4. Состав золы всегда задаётся вручную параметрами Al₂O₃ и Fe₂O₃. Массовая фракция SiO₂ в золе вычисляется с помощью соотношения:

$$SiO_2 = 1 - Al_2O_3 - Fe_2O_3$$

5. Модель предполагает, что смола представима обобщенной формулой C_xH_yO_z. Пользователь должен задать значения x, y, z для паров смолы соответственно в позициях **x (C_xH_yO_z, пары смолы), y (C_xH_yO_z, пары смолы), z (C_xH_yO_z, пары смолы)**. Значения x, y, z для комплексного вещества летучих рассчитываются.

3.3.10.2.3 Теплота сгорания топлива

Для жидкого топлива, представимого обобщенной формулой C_xH_yO_z, низшая теплота сгорания (LHV) определяется следующим образом:

$$(1) \quad LHV_{liq.fuel} = h_{liq.fuel}^0 - h_{CO_2}^0 \frac{44x}{12x + y + 16z} - h_{H_2O}^0 \frac{9y}{12x + y + 16z}$$

Для твёрдого топлива, состоящего из летучих (представимых формулой C_xH_yO_z), кокса (C), влаги и золы, LHV определяется так:

$$(2) \quad LHV_{sol.fuel} = \left(h_{vol}^0 - h_{CO_2}^0 \frac{44x}{12x + y + 16z} - h_{H_2O}^0 \frac{9y}{12x + y + 16z} \right) \cdot volotiles - \left(h_{char}^0 - \frac{11}{3} h_{CO_2}^0 \right) \cdot char + \left(h_{water}^0 - h_{H_2O}^0 \right) \cdot water$$

В этих формулах h_i^0 – энтальпии образования веществ при 25°C.

Для жидкого топлива величину LHV задавать не нужно – она вычисляется и высвечивается в последней строчке окна свойств топлива.

Для твёрдого топлива LHV надо задавать. По ней вычисляется $h_{char}^0(25^\circ C)$. Соответственно общепринятому стандарту, $h_{char}^0(25^\circ C) = 0$. Однако, вследствие упрощенного представления состава твёрдого топлива, возникает погрешность между реальной и модельной теплотами сгорания топлива. Значение $h_{char}^0(25^\circ C) = 0$, вычисленное по заданной LHV с помощью выражения (2), позволяет скорректировать эту погрешность.

3.3.10.3 Дисперсная фаза

Частица – либо капля жидкого топлива, либо твёрдый шарик, содержащий предопределённые массовые доли воды, летучих, кокса и золы.

Характеристики частиц задаются обычным образом в окне свойств элемента [Частицы](#).

Жидкая капля нагревается и испаряется. До достижения температуры кипения испарение происходит в конвективном режиме. По достижении температуры кипения – в режиме кипения.

Твёрдая частица, нагреваясь, "выпускает" летучие и превращается в коксовый остаток, содержащий кокс и золу. Как только летучие вышли, включается модель горения кокса. В процессе деволатизации (выхода летучих) размер частицы остаётся неизменным (меняется плотность частицы). В процессе горения кокса плотность частицы остаётся неизменной (частица уменьшается).

Горение газообразного горючего (Летучих) рассчитывается моделью газовой фазы.

3.3.10.4 Газовая фаза

Газовая фаза представлена пятью компонентами: *volotiles*, O₂, N₂, CO₂, H₂O.

Модель горения основана на следующих уравнениях **слабосжимаемой модели**:

- [уравнения Навье-Стокса](#);
- уравнение состояния (см. [Чистые вещества](#));
- уравнение энергии (см. определение энтальпии в разделе [Чистые вещества](#));
- 5 конвективно-диффузионных уравнений

$$(1) \quad \frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} Y_i) = \nabla \left(\left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \right) + Q_i^p + Q_i^{\text{chem}}$$

для: C_xH_yO_z, C_xH_yO_z^{*}, O₂^{*}, CO₂^{*}, H₂O^{*}. Для первого из этих пяти уравнений $Q_i^{\text{chem}} = -W$, для остальных $Q_i^{\text{chem}} = 0$.

Локальный состав газовой смеси рассчитывается по полученным значениям этих пяти неизвестных. Молекулярный транспорт (коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии) рассчитывается по стандартным комбинационным правилам. Интегралы столкновения вычисляются на основе потенциала Леннарда-Джонса.

3.3.10.5 Взаимодействие между фазами

Всегда предполагается взаимное влияние фаз, то есть несущая фаза определяет траектории частиц, частицы в свою очередь оказывают влияние на течение через источники массы, импульса (т. е. силу сопротивления, действующую на несущую фазу) и энергии. Источники рассчитываются следующим образом.

Источники массы газовых компонентов ($i=volotiles, O_2, CO_2, H_2O$):

$$(1) \quad Q_i^p = \sum_{j \rightarrow \text{trajectories}} (m_{i,in} - m_{i,out})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{\text{cell}}}$$

Источник массы:

$$(2) \quad Q_{\text{mass}}^p = \sum_{j \rightarrow \text{trajectories}} (m_{p,in} - m_{p,out})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{\text{cell}}}$$

Источник импульса:

$$(3) \quad \bar{Q}_{\text{mom}}^p = - \sum_{j \rightarrow \text{trajectories}} \frac{\pi r_p^2}{2} C_{Dij} \rho_g |\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_p|_j (\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_p)_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{\text{cell}}}$$

Источник энтальпии:

$$(4) \quad Q_{\text{enth}}^p = \sum_{j \rightarrow \text{trajectories}} (m_{p,in} h_{p,in} - m_{p,out} h_{p,out})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{\text{cell}}}$$

3.3.10.6 Модели пиролиза и горения кокса

Во **FlowVision** реализованы две модели, описывающие процессы пиролиза (выхода летучих) и горения кокса:

- Кинетическая модель
- Эмпирическая модель

В обоих моделях предполагается, что сначала испаряется вода, затем выходят все летучие, а потом горит кокс. Пользователь задаёт модель испарения воды на странице **Физические Параметры Частицы Эмпирические модели**. При испарении воды диаметр частицы не меняется, уменьшается её кажущаяся плотность.

В режимах сушки, прогрева и пиролиза коэффициент сопротивления частиц рассчитывается по одной из моделей, описанных разделе [Частицы](#). (Там же см. модели испарения.)

В режиме горения кокса:

$$(1) \quad C_D = \frac{52}{Re} \quad Re < 50$$

$$C_D = 2Re^{-0.2} \quad Re \geq 50$$

Данная модель предложена в [Бабий, В.И., Куваев, Ю.Ф., "Горение угольной пыли и расчёт пылеугольного факела," *М. Энергоатомиздат*, 1986, 208 с.].

3.3.10.6.1 Кинетическая модель горения

Модель активизируется значением параметра: **Модель процессов в твердом топливе = 0**.

Пиролиз

Влага формально добавляется к летучим с учетом теплоты её испарения. Текущая масса летучих в частице определяется выражением:

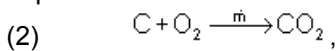
$$(1) \quad m_v = m_v^0 \times \exp\left(-\int_0^t A_{\text{pyr}} \exp\left(-\frac{E_{\text{pyr}}}{T_p}\right) dt\right)$$

Значения $A_{\text{pyr}}=87$ (**Параметр 1**) и $E_{\text{pyr}}=3321$ (**Параметр 2**) устанавливаются по умолчанию. В реальности горение кокса начинается до окончания процесса пиролиза. Во избежание искусственного затягивания пиролиза, предусмотрен механизм мгновенного выпуска остатка летучих: в кинетической модели **Параметр 5** задаёт массовую долю летучих (от их исходного количества), до достижения которой процесс управляется формулой (1), а затем оставшиеся летучие выпускаются за один последующий шаг траектории.

Реализация: Солвер частиц рассчитывает текущую массу летучих по уравнению (1) до достижения значения $m_v = m_v^0 \times \text{Параметр 5}$, после чего оставшиеся летучие, имеющие массу m_v , выпускаются на следующем шаге траектории частицы.

Горение кокса

Горение кокса описывается одной гетерогенной брутто-реакцией:



для которой стехиометрический коэффициент равен:

$$(3) \quad i_{\text{char}} = 8/3.$$

Очевидно,

$$(4) \quad \dot{m}_{\text{CO}_2} = (i_{\text{char}} + 1)\dot{m}$$

$$(5) \quad \dot{m}_{\text{O}_2} = -i_{\text{char}} \dot{m}$$

Скорость уноса массы с единицы поверхности частицы \dot{m} определяется следующим образом:

$$(6) \quad \dot{m} = k_{\text{eff}} Y_{\text{O}_2} \rho_g \frac{\text{char} + \text{ash}}{\text{char}}$$

То есть предполагается, что унос золы управляется той же кинетикой, что и унос углерода. Эффективная скорость процесса определяется так:

$$(7) \quad k_{\text{eff}}^{-1} = k_{\text{kin}}^{-1} + k_{\text{dif}}^{-1},$$

где

$$(8) \quad k_{\text{kin}} = A_{\text{char}} \exp\left(-\frac{E_{\text{char}}}{T_p}\right) \frac{R_A T_g}{101325 \cdot M_{\text{O}_2}}$$

$A_{\text{char}} = \text{Параметр 3}$, $E_{\text{char}} = \text{Параметр 4}$,

$$(9) \quad k_{\text{dif}} = \text{Sh} \frac{D_{\text{O}_2}}{d_p}$$

Коэффициент диффузии в последнем выражении рассчитывается как коэффициент бинарной диффузии кислорода в азоте при взвешенной температуре (правило "1/3"):

$$(10) \quad T_{1/3} = \frac{1}{3} T_g + \frac{2}{3} T_p.$$

Реализация: Солвер частиц интегрирует ОДУ

$$(11) \quad \frac{dd_p}{dt} = -2 \frac{\dot{m}}{\rho_p}$$

3.3.10.6.2 Эмпирическая модель

Описание модели можно найти в [Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчёт пылеугольного факела, М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.].

Модель активизируется значением параметра: **Модель процессов в твердом топливе = 1**

Модель разбивает процессы, протекающие в частице, на 4 этапа: этап прогрева частицы, этап пиролиза, этап прогрева коксового остатка и этап горения кокса. Текущее безразмерное время с начала каждого процесса рассчитывается так:

$$(1) \quad \tau'_k = \sum_{n=0}^{\text{current step}} \frac{\Delta t_n}{\tau_k^{\text{local}}}, \quad k = 1 \div 4$$

где локальное (в данной ячейке) характерное время процесса k определяется соответствующим выражением. Процесс считается завершенным, когда $\tau'_k = 1$.

Начальный прогрев частицы

Локальное время начального прогрева частицы определяется выражением:

$$(2) \quad \tau_1^{\text{local}} = k_1 \cdot 5.3 \cdot 10^{14} T_g^{-4} d_p^{0.8}$$

Реализация: Солвер частиц рассчитывает текущее безразмерное время прогрева по формуле (1). По достижении значения $\tau'_1 = 1$ управление передается блоку пиролиза. Жидкая вода формально испаряется пропорционально τ'_1 :

$$(3) \quad m_{wv} = m_{wv}^0 (1 - \tau'_1)$$

Пиролиз

По завершении прогрева частицы начинается выход летучих. Локальное время выхода летучих определяется выражением:

$$(4) \quad \tau_2^{\text{local}} = k_2 \cdot 0.5 \cdot 10^6 d_p^2$$

Реализация: Солвер частиц рассчитывает текущее безразмерное время пиролиза по формуле (1) и интегрирует ОДУ:

$$(5) \quad \frac{dm_v}{dt} = - \frac{m_v^0}{\tau_2}$$

По достижении значения $m_v=0$ управление передается блоку прогрева коксового остатка.

Прогрев коксового остатка

По завершении выхода летучих начинается прогрев коксового остатка. Локальное время прогрева коксового остатка определяется как:

$$(6) \quad \tau_3^{\text{local}} = \tau_1^{\text{local}} + \tau_2^{\text{local}}$$

где

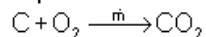
$$(7) \quad \tau_3^{\text{local}} = k_3 \cdot 1.12 \cdot 10^{10} \frac{\rho_p d_p^{1.2}}{T_g^3} \left(\frac{0.21}{X_{O_2}} \right)^n$$

Реализация: Солвер частиц рассчитывает текущее безразмерное суммарное время первых трёх процессов τ'_3 по формуле (1). По достижении значения $\tau'_3 = 1$ управление передаётся блоку горения кокса.

Горение кокса

Горение кокса начинается, как только значение τ'_3 оказывается больше 1. Отметим, что по завершении пиролиза (выхода летучих) τ'_3 уже может быть больше 1. В этом случае расчёт горения кокса начинается сразу после расчёта выхода летучих.

Горение кокса описывается одной гетерогенной брутто-реакцией:



со стехиометрическим коэффициентом:

$$i_{char} = 8/3$$

Характерное локальное время горения кокса определяется следующим выражением:

$$(8) \quad \tau_4^{\text{local}} = k_4 \cdot 2.21 \cdot 10^8 \frac{\rho_p d_p^2}{T_g^{0.9} X_{O_2}} \frac{char}{char + ash}$$

Реализация: Солвер частиц интегрирует ОДУ:

$$(9) \quad \frac{dd_p^2}{dt} = - \frac{2}{\rho_p} \frac{T_g^{0.9} X_{O_2}}{k_4 \cdot 2.21 \cdot 10^8} \frac{char + ash}{char}$$

То есть предполагается, что унос золы управляется той же кинетикой, что и унос углерода. Изменение диаметра частицы определяет изменение её массы Δm на текущем шаге. Вдув CO_2 и отсос O_2 определяются стехиометрией процесса:

$$(10) \quad \Delta m_{CO_2} = (i_{char} + 1) \Delta m \frac{char}{char + ash}$$

$$(11) \quad \Delta m_{O_2} = -i_{char} \Delta m \frac{char}{char + ash}$$

3.3.10.7 Теплообмен частицы с газом

Солвер частиц интегрирует ОДУ, описывающее прогрев частицы

$$(1) \quad m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = \pi d_p^2 \left(Nu \frac{\lambda}{d_p} (T_g - T_p) + \varepsilon_p (E_{rad} - \sigma_0 T_p^4) - \dot{m} h_{lat} (T_p) \right)$$

независимо от используемых моделей пиролиза и горения кокса. Значение плотности лучистой энергии E_{rad} определяется используемой моделью излучения.

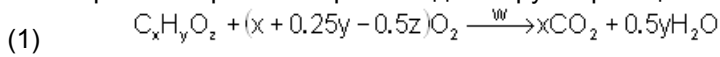
Реализация: Модель объемного высвечивания (самая простая модель излучения) предполагает, что $E_{rad} = 0$. В этом случае солвер частиц рассчитывает E_{rad} как локальную термодинамически равновесную плотность энергии излучения:

$$(2) \quad E_{rad} = \sigma_0 T_g^4$$

Коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии газа в пограничном слое около частицы вычисляются с учетом правила "1/3", определяемого уравнением [\(10\) Кинетической модели горения кокса](#).

3.3.10.8 Модели горения летучих

Газообразное горючее сгорает в одной брутто-реакции:



для которой стехиометрический коэффициент равен:

$$(2) \quad i_{chem} = \frac{32 \cdot (x + 0.25y - 0.5z)}{12x + y + 16z}$$

В зависимости от выбора скорости брутто-реакции W различают:

1. Модель Зельдовича
2. Кинетическую модель горения
3. Модель Магнуссена
4. Пульсационную модель горения
5. Модель Сполдинга
6. Обобщенная модель Магнуссена

3.3.10.8.1 Модель горения Зельдовича (модель "что смешалось, то сгорело")

Скорость брутто-реакции W предполагается бесконечно большой. В этой модели окислитель и горючее не существуют одновременно в одной точке пространства. Поэтому решаются только уравнения для консервативных скаляров $C_x H_y O_z^*$, O_2^* , CO_2^* , H_2O^* . Локальный состав рассчитывается по значению $C_x H_y O_z^*$.

Модель активизируется выбором в папке **Параметры модели Хим. кинетика Модель**.

3.3.10.8.2 Кинетическая модель горения

Скорость брутто-реакции W определяется кинетикой процесса, что справедливо при ламинарном течении газовой смеси или горении предварительно-перемешанной смеси. W выбирается в виде закона Аррениуса:

$$(1) \quad W_{kin} = A_{chem} \exp\left(-\frac{E_{chem}}{T_g}\right) \rho^2 Y_{C_x H_y O_z} \cdot \frac{Y_{O_2}}{i_{chem}}$$

Кинетические константы в законе Аррениуса взяты из работы [Волков Э.П., Кудрявцев Н.Ю. Моделирование образования окислов азота в турбулентном диффузионном факеле, *Инженерно-физический журнал*, 1989, Т.56, N 6, с. 885-894]:

$$A_{chem} = 10^{10}, \quad E_{chem} = 18400$$

Эта модель справедлива для предварительно перемешанных и неперемешанных реагентов.

Локальный состав рассчитывается по разности значений $C_x H_y O_z^*$ и $C_x H_y O_z$.

Модель активизируется выбором в папке **Параметры модели Хим. кинетика Модель**.

3.3.10.8.3 Модель Магнуссена

Скорость брутто-реакции W определяется скоростью турбулентного смешения летучих и окислителя [Magnussen B.F., and Hjertager B.H. On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, 1976, Sixteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 719-729].

$$(1) \quad W_{\text{mix}} = 23.6 \left(\frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2} \right)^{1/4} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(Y_{\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z}, \frac{Y_{\text{O}_2}}{i_{\text{chem}}} \right)$$

Эта модель справедлива для предварительно неперемешанных реагентов.

Локальный состав рассчитывается по разности значений $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z^*$ и $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$.

Модель активизируется выбором в папке **Параметры модели Хим. кинетика Модель**.

3.3.10.8.4 Пульсационная модель горения

Скорость брутто-реакции W определяется относительной дисперсией γ концентрации восстановленных летучих. Величина $\gamma=0$ при полностью перемешанных реагентах, $\gamma=1$ при неперемешанных реагентах.

$$(1) \quad \frac{1}{W} = \frac{1-\gamma}{W_{\text{kin}}} + \frac{\gamma}{W_{\text{mix}}}$$

Здесь величины W_{kin} – скорость брутто-реакции в [кинетической модели горения](#), W_{mix} – скорость брутто-реакции в [модели Магнуссена](#).

$$(2) \quad \gamma = \min \left(1, \frac{|\nabla Y_{\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z}|}{Y_{\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z}^*} \sqrt{1.4 \frac{\mu_t k}{\rho \varepsilon}} \right)$$

Эта модель справедлива для предварительно неперемешанных реагентов.

Локальный состав рассчитывается по разности значений $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z^*$ и $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$.

Модель активизируется выбором в папке **Параметры модели Хим. кинетика Модель**.

3.3.10.8.5 Модель Сполдинга

Скорость брутто-реакции W определяется выражением:

$$(1) \quad W = \min \left(W_{\text{kin}}, \rho |\nabla Y_{\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z}| \sqrt{1.4 \frac{\mu_t k}{\rho \varepsilon}} \right)$$

и выражением W_{kin} – скорость брутто-реакции в [кинетической модели горения](#).

Эта модель справедлива для предварительно неперемешанных реагентов.

Локальный состав рассчитывается по разности значений $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z^*$ и $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$.

Модель активизируется выбором в папке **Параметры модели Хим. кинетика Модель**.

3.3.10.8.6 Обобщенная модель Магнуссена

Скорость брутто-реакции W определяется выражением:

$$(1) \quad W_{\text{mix}} = 23.6 \left(\frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2} \right)^{1/4} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(Y_{\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z}, \frac{Y_{\text{O}_2}}{i_{\text{chem}}}, 2 \frac{Y_{\text{CO}_2}^{\text{react}} + Y_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{react}}}{i_{\text{chem}} + 1} \right)$$

Здесь индекс 'react' указывает на то, что подаваемые на вход(ы) CO_2 и H_2O в расчет скорости реакции не учитываются. Данная модель справедлива для предварительно неперемешанных и перемешанных реагентов. Обычно применяется для описания горения частично перемешанных реагентов.

Локальный состав рассчитывается по разности значений $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z^*$ и $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$.

Модель активизируется выбором в папке **Параметры модели Хим. кинетика Модель**.

3.3.10.9 Инициализация 2-фазного горения

Для того, чтобы 'запустить' процессы испарения капель, пиролиза твёрдых частиц, горения кокса, и горения летучих, пользователь должен только задать достаточно высокую начальную температуру газовой фазы. Желательно, чтобы она была близка к средней температуре в работающей горелке. Отметим что расчёт 'холодного' 2-фазного течения в горелке не имеет смысла, поскольку траектории частиц в 'холодном' и 'горячем' расчётах - совершенно различные.

3.3.10.10 Установка свойств реагентов

Список из 16 рабочих веществ в данной модели фиксирован и выглядит так:

```

x=0 Oxigen (gas)
y=z
x=0 Nitrogen (gas)
y=z
x=0 Carbon dioxide (gas, equilibrium)
y=z
x=0 Water vapor (equilibrium)
y=z
x=0 Volotiles
y=z
x=0 Ash
y=z
x=0 Tar vapor
y=z
x=0 Liquid fuel
y=z
x=0 Methane (gas)
y=z
x=0 Hydrogen (gas)
y=z
x=0 Carbon monoxide (gas)
y=z
x=0 Water
y=z
x=0 Graphite
y=z
x=0 SiO2 (solid)
y=z
x=0 Fe2O3 (solid)
y=z
x=0 Al2O3 (solid)
y=z

```

Если моделируется горение жидкого топлива, пользователь должен загрузить (из **Базы Веществ**) **Liquid fuel (Жидкое топливо)** и **Volotiles (Летучие)**. При этом, летучие должны быть паром жидкого топлива, а вещества **Ash, Tar vapor, Methane, Hydrogen, Carbon monoxide, Water, Graphite, SiO2, Fe2O3, и Al2O3** не используются.

Если моделируется горение твёрдого топлива, пользователь должен загрузить (из **Базы Веществ**) **Tar vapor (Пар смолы)**. При этом вещества **Volotiles** и **Ash** автоматически создаются на основании заданного состава каждого из этих веществ, а вещество **Liquid fuel** не используется. Нужно также ввести значения параметров **x (C_xH_yO_z, tar vapor)**, **y (C_xH_yO_z, tar vapor)**, **z (C_xH_yO_z, tar vapor)**.

Свойства веществ, присутствующих в **Базе Веществ**, – см. том [Руководство пользователя](#).

3.3.10.11 Параметры

В общем случае параметры модели 2-фазного горения – это

- 1) параметры, определяющие модель [слабосжимаемой жидкости](#),
- 2) параметры, определяющие модель [излучения в объёме](#),
- 3) параметры, определяющие модель [частиц](#),
- 4) общие параметры,
- 5) параметры, определяющие топливо, модель пиролиза, модель горения кокса и модель горения летучих.

В окне **Параметры модели**, на странице **Общие** добавлены 4 параметра, лимитирующие сверху значения восстановленных O₂, CO₂, H₂O и летучих. Параметры, определяющие топливо, модель пиролиза и модель горения кокса собраны на закладке-странице **Жидкое/твёрдое топливо** в окне **Параметры модели**. Параметры, определяющие газофазное горения собраны на закладке **Хим. кинетика** в том же окне:

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Общие	O ₂ max	Максимальное допустимое значение восстановленного кислорода	
	CO ₂ max	Максимальное допустимое значение восстановленной двуокиси углерода	
	H ₂ O max	Максимальное допустимое значение восстановленного водяного пара	
	VOLATILES max	Максимальное допустимое значение восстановленных летучих	

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение	Размерность
Жидкое/твердое топливо	Летучие (в угле) ¹	<i>volatiles</i>	
	Кокс (в угле) ¹	<i>char</i>	
	Зола (в угле) ¹	<i>ash</i>	
	Состав летучих рассчитывать? ²		
	CH ₄ (в летучих) ³	CH ₄	
	H ₂ (в летучих) ³	H ₂	
	CO (в летучих) ³	CO	
	CO ₂ (в летучих) ³	CO ₂	
	Пары смолы (в летучих) ³	<i>tar</i>	
	Al ₂ O ₃ (in ash) ⁴	Al ₂ O ₃	
	Fe ₂ O ₃ (in ash) ⁴	Fe ₂ O ₃	
	Плотность твердого топлива [кг/м ³]	начальная плотность твердого топлива	[кг·м ⁻³]
	x (C _x H _y O _z , жидкое топливо)	значение x в формуле C _x H _y O _z для жидкого топлива	
	y (C _x H _y O _z , жидкое топливо)	значение y в формуле C _x H _y O _z для жидкого топлива	
	z (C _x H _y O _z , жидкое топливо)	значение z в формуле C _x H _y O _z для жидкого топлива	
	x (C _x H _y O _z , пары смолы)	значение x в формуле C _x H _y O _z для паров смолы	
	y (C _x H _y O _z , пары смолы)	значение y в формуле C _x H _y O _z для паров смолы	
	z (C _x H _y O _z , пары смолы)	значение z в формуле C _x H _y O _z для паров смолы	
	Модель процессов в твердом теле ⁵		
	Параметр 1	первый параметр в модели пиролиза и горения кокса	
Параметр 2	второй параметр в модели пиролиза и горения кокса		
Параметр 3	третий параметр в модели пиролиза и горения кокса		
Параметр 4	четвертый параметр в модели пиролиза и горения кокса		
Параметр 5	пятый параметр в модели пиролиза и горения кокса		
LHV [Дж/кг]	<i>LHV</i>	[Дж·кг ⁻¹]	
Хим. кинетика	Модель горения летучих	модель	
	Темп. воспл., К	<i>T_{ign}</i>	[К]
	alpha_min	<i>α_{min}</i>	
	alpha_max	<i>α_{max}</i>	
	kin_const_A	<i>A_{chem}</i>	[кг·м ⁻³ ·с ⁻¹]
	kin_const_B	<i>B_{chem}</i>	[К]

Примечания:

¹ water = 1 - volatiles - char - ash

² значение 1 означает "да" – состав летучих рассчитывается автоматически по эмпирическим формулам,

предложенным в [Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твёрдого топлива, М.: Наука, 1994. 320 с], при этом последующие 5 параметров игнорируются; значение 0 означает "нет" – состав летучих задаётся вручную в 5-ти последующих позициях.

$$3 \quad H_2O = 1 - CH_4 - H_2 - CO - CO_2 - tar$$

$$4 \quad SiO_2 = 1 - Al_2O_3 - Fe_2O_3$$

⁵ целое число, определяющее комплексную модель пиролиза и горения кокса. В настоящий момент в солвере частиц присутствуют две модели, соответственно, данный параметр может принимать значения 0 или 1, описание моделей – выше.

⁶ В настоящий момент в газодинамическом солвере присутствуют 6 моделей, описание моделей – выше.

3.3.10.12 Граничные условия

К граничным условиям для [Слабосжимаемой жидкости](#), [Излучения в объёме](#) и [Частиц](#) добавляются условия для переменных:

Летучие_Восстановленные

Летучие_Истинные

O2_Восстановленный

CO2_Восстановленный

H2O_Восстановленный

(аналогичные граничному условию для переменной **Концентрация** в модели **Слабосжимаемая жидкость**).

3.3.10.13 Начальные условия

К начальным условиям для [Слабосжимаемой жидкости](#) и [Излучения в объёме](#) добавляются условия для переменных:

Летучие_Восстановленные

Летучие_Истинные

O2_Восстановленный

CO2_Восстановленный

H2O_Восстановленный

(аналогичные начальному условию для переменной **Концентрация** в модели слабосжимаемой жидкости).

3.3.11 Модели излучения

Во **FlowVision** существуют две группы моделей, описывающие лучистый теплообмен:

- Модель [ПП Излучение](#) (излучение поверхность – поверхность) рассчитывает обмен лучистой энергии между твёрдыми поверхностями в предположении абсолютной прозрачности среды, заполняющей пространство между поверхностями.
- Модели группы [Излучение в объёме](#) предполагают, что среда поглощает и излучает электромагнитные волны инфракрасного, светового, и ультрафиолетового диапазонов.

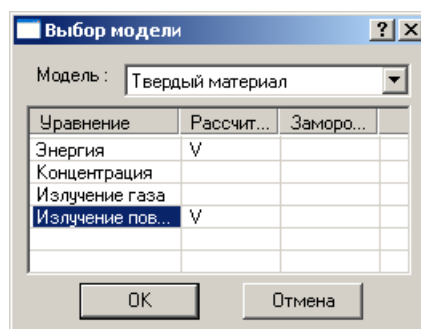
Во **FlowVision** реализованы три модели излучения в объёме:

- Диффузионная модель (или модель P1),
- Модель осреднённой лучистой энергии,
- Модель объёмного высвечивания.

3.3.11.1 Модель ПП излучения

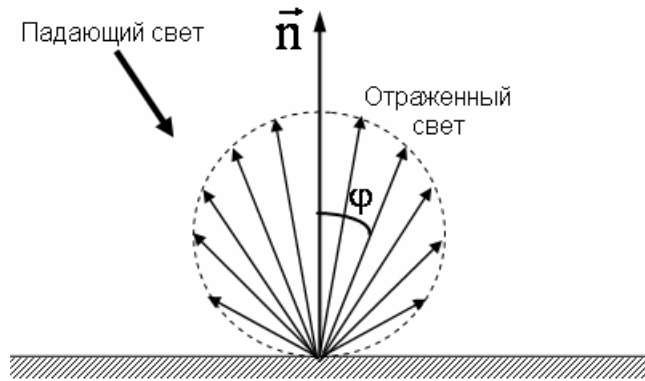
Данная модель предназначена для учета количества тепла, переданного от одного тела к другому за счет излучения. Эта модель не может использоваться самостоятельно, а только совместно с моделями кондуктивного и конвективного теплопереноса в задачах сопряженного теплообмена.

Для того, чтобы активизировать расчет радиационного теплопереноса, необходимо в окне **Изменить модель** выбрать модель **ПП Излучение**. Расчет радиационного теплопереноса может проводиться только совместно с решением уравнения энергии.



Перенос тепла излучением вычисляется в предположении, что газ абсолютно прозрачен. Отражение потока света происходит согласно закону Ламберта, в котором интенсивность радиационного излучения подчиняется следующему соотношению:

$$(1) \quad E \propto \cos \varphi$$



Излучающие тела рассматриваются как абсолютно черные.

3.3.11.1.1 Обозначения

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
ε	Степень черноты	Чернота	
σ_0	Постоянная Стефана-Больцмана		[Вт·м ² ·К ⁻⁴]

3.3.11.1.2 Уравнения

Уравнения записываются согласно выбранной модели течения.

В граничные условия для уравнения энергии добавляется радиационная составляющая теплового потока q_r .

Пусть имеется система из N излучающих поверхностей, то взаимооблучение i-ой поверхности с остальными поверхностями будет описываться следующим уравнением:

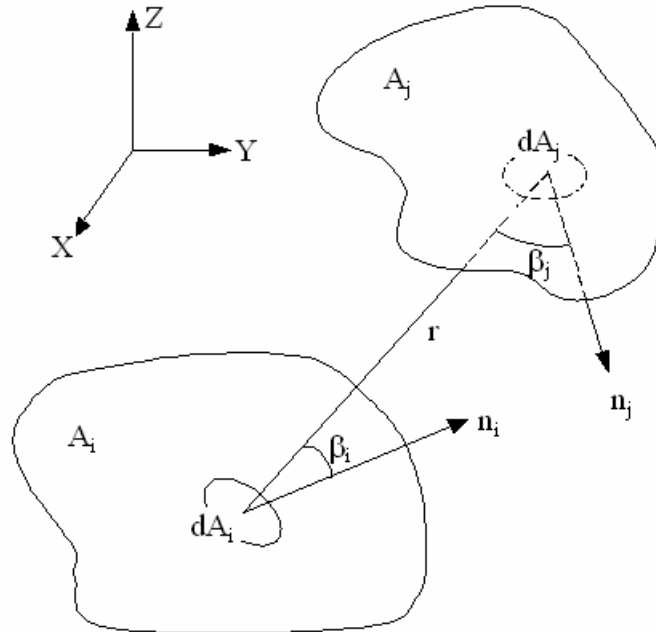
$$(1) \quad \sum_{j=1}^N \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - F_{ij} \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \right) q_r^j = \sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - F_{ij}) \sigma_0 T_j^4$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

где F_{ij} – коэффициенты взаимооблучения, определяемые из соотношения:

$$(2) \quad F_{ij} = \frac{1}{A_i} \iint_{A_i} \iint_{A_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j$$

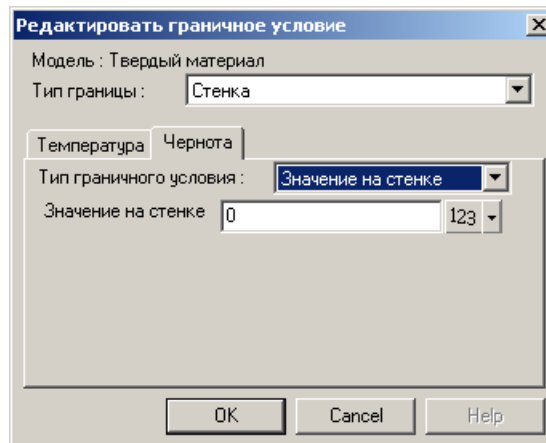
где A_i и A_j – площади поверхностей i и j.



Определение коэффициентов взаимооблучения происходит в предположении, что поверхности изотермичны и диффузно отражают и поглощают излучение.

3.3.11.1.3 Граничные условия

Для этой модели доступно только одно граничное условие – **Чернота**. Здесь указывается степень черноты поверхности.



3.3.11.1.4 Начальные условия

Начальные условия определяются для выбранной модели течения.

3.3.11.2 Модели излучения в объёме

Модели группы **Излучение в объёме** предполагают, что среда поглощает и излучает электромагнитные волны инфракрасного, светового, и ультрафиолетового диапазонов.

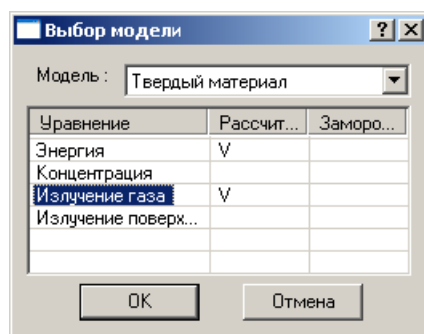
Во **FlowVision** реализованы три модели излучения в объёме:

- Диффузионная модель (или модель P1),
- Модель осреднённой лучистой энергии,
- Модель объёмного высвечивания.

Всегда предполагается локальное термодинамическое равновесие (ЛТР) в среде. Описание диффузионной модели и определение ЛТР – см. *Четверушкин Б.Н. [Математическое моделирование задач динамики излучающего газа.] – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.– 304 с.].*

Модели группы **Излучение в объёме** совместимы со всеми расчётными моделями, начиная с **Твердый материал**.

Чтобы запустить расчёт излучения в объёме, поставьте маркер около "уравнения" **Излучение в объёме** в окне **Выбор модели**:



и нажмите ОК. В окне **Параметры Модели** появится закладка: **Излучение в объёме**. В граничных условиях появятся две закладки: **Чернота** и **РадЭнергПлотн**.

Внимание! Нельзя одновременно отмечать **Излучение в объёме** и **ПП Излучение**.

3.3.11.2.1 Обозначения

Обозначение	Название величины	Название в FlowVision	Размерность
C_p	Удельная теплоемкость	Теплоёмкость	[Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹]
d	Диаметр частицы		[м]
E_r	Плотность энергии излучения	Плотность Энергии Излучения	[Вт·м ⁻²]
E_b	Равновесная плотность энергии излучения		[Вт·м ⁻²]
h	Энтальпия	Энтальпия	[Дж·кг ⁻¹]
n	Коэффициент преломления	Коэффициент преломления	
Pr	Число Прандтля		
$q_{grad,i}$	Поток лучистой энергии с единицы поверхности расчетной области	Радиационный поток с поверхности	[Вт·м ⁻²]
Q_{enth}^p	Источник энергии за счёт частиц	- Ч. источник энергии	[Вт·м ⁻³]
Q_{rad}	Источник энергии за счёт излучения		[Вт·м ⁻³]
r	Радиус частиц		[м]
T_p	Температура частиц	Температура частиц	[К]
α	Интегральный (по спектру) коэффициент поглощения	Коэффициент поглощения	[м ⁻¹]
β	Интегральный (по спектру) коэффициент рассеяния	Коэффициент рассеяния	[м ⁻¹]
λ	Коэффициент теплопроводности		[кг·м·с ⁻³ ·К ⁻¹]
μ	Динамический коэффициент вязкости		[кг·м ⁻¹ ·с ⁻¹]
ε	Степень черноты поверхности	Чернота	
ε_p	Степень черноты частиц	Чернота частиц	
ρ	Плотность	Плотность	[кг·м ⁻³]
σ_{rad}	Постоянная Стефана-Больцмана		[Вт·м ⁻² ·К ⁻⁴]

Индекс 'm' обозначает поглощающую и излучающую среду, 't' обозначает турбулентные величины, 'p' обозначает частицы, 'ini' обозначает начальные значения, '-' в третьей колонке означает минус.

3.3.11.2.2 Уравнения

Уравнение энергии (для модели **Слабосжимаемая Жидкость**):

$$(1) \quad \frac{\partial(\rho h(T_m))}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho V h(T_m)) = \vec{\nabla} \cdot \left\{ - \left[- \left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \vec{\nabla} h(T_m) \right] \right\} + Q_{enth}^p + Q_{rad}$$

Остальные уравнения зависят от выбранной модели излучения:

- [Диффузионная модель \(модель P1\)](#)
- [Модель осреднённой лучистой энергии](#)
- [Модель объёмного высвечивания](#)

3.3.11.2.2.1 Диффузионная модель (модель P1)

Модель предполагает что поле излучения изотропно. Уравнение, описывающее радиационный перенос:

$$(2) \quad \nabla \left(\frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0$$

$$(3) \quad \alpha E_b = \alpha_m E_{b,m} + \alpha_p E_{b,p}$$

$$(4) \quad \alpha = \alpha_m + \alpha_p$$

$$(5) \quad \beta = \beta_m + \beta_p$$

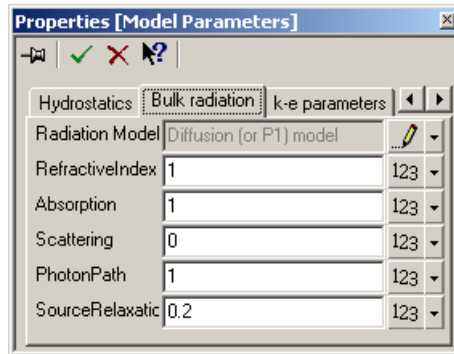
$$(6) \quad E_{b,m} = \sigma_{rad} T_m^4$$

$$(7) \quad \alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega} \sigma_{rad} \varepsilon_p \sum_{i=trajectories} \pi r_i^2 N_i T_{p,i}^4$$

$$(8) \quad \alpha_p = \frac{1}{\Omega} \varepsilon_p \sum_{i=trajectories} \pi r_i^2 N_i$$

$$(9) \quad \beta_p = \frac{1}{\Omega} (2 - \varepsilon_p) \sum_{i=trajectories} \pi r_i^2 N_i$$

Здесь ε_p – степень черноты частиц, r_i – радиус частиц с i -ой траектории, N_i – их число в данной ячейке, Ω – объём ячейки. Рассеяние полагается изотропным. Интегральные коэффициенты поглощения и рассеяния либо задаются постоянными, либо рассчитываются по пользовательским формулам, либо рассчитываются с помощью динамических библиотек (dll), выбранных или созданных пользователем.



Источниковый член в уравнении энергии:

$$(10) \quad Q_{rad} = -4\alpha n^2 (E_b - E_r)$$

3.3.11.2.2.2 Модель осреднённой лучистой энергии

Эта модель предполагает, что поле плотности энергии излучения E_r однородно. Если известны радиационные потоки в расчетную область с её границ, то E_r рассчитывается так:

$$(1) \quad E_r = \frac{1}{\sum_{k=cell\ index} \alpha_k \Omega_k} \left(\sum_{k=cell\ index} E_{b,k} \alpha_k \Omega_k - \frac{1}{4} \sum_{i=surface\ index} q_{rad,i} A_i \right)$$

Здесь Ω_k – объём k -й ячейки, A_i – площадь i -й поверхности. Если радиационные потоки неизвестны, то E_r рассчитывается по температурам и 'чернотам' поверхностей:

$$(2) \quad E_r = \frac{\sum_{i=surface\ index} \frac{2\varepsilon_i}{2 - \varepsilon_i} T_{w,i}^4 A_i + 4 \sum_{k=cell\ index} E_{b,k} \alpha_k \Omega_k}{\sum_{i=surface\ index} \frac{2\varepsilon_i}{2 - \varepsilon_i} A_i + 4 \sum_{k=cell\ index} \alpha_k \Omega_k}$$

Здесь $T_{w,i}$ – либо заданная, либо рассчитанная температура i -й поверхности. Если хотя бы на одной поверхности, ограничивающей расчетную область, задано условие [Радиационный поток рассчитывается](#), то средняя плотность энергии излучения рассчитывается по формуле (2). В задачах

сопряженного теплообмена E_r всегда рассчитывается по формуле (2).

Источниковый член в уравнении энергии:

$$(3) \quad Q_{rad} = -4\alpha n^2 (E_b - E_r) ..$$

3.3.11.2.2.3 Модель объёмного высвечивания

Эта модель является упрощенным вариантом [Модели осреднённой лучистой энергии](#). Источниковый член в уравнении энергии не учитывает радиационный поток, приходящий в ячейку:

$$(1) \quad Q_{rad} = -4\alpha n^2 E_b$$

3.3.11.2.3 Параметры

В дополнение к **Параметрам**, относящимся к выбранной модели течения жидкости, в данной модели присутствуют:

Имя страницы	Имя в FlowVision	Параметр	Обозначение	Размерность
Излучение в объеме	Модель излучения			
	Преломление	коэффициент преломления среды	n	
	Поглощение	коэффициент поглощения среды	α	[м ⁻¹]
	Рассеяние	коэффициент рассеяния среды	β	[м ⁻¹]
	Пробег фотона ¹	безразмерная длина свободного пробега фотона		в долях 3.6V/A
	РелаксацияИст ²	вес, с которым берётся новый источник за счёт излучения в уравнении энергии		

Примечания:

¹ Величина **Пробег фотона** измеряется в долях величины 3.6V/A, где V – объём расчетной области, A – площадь её границы.

² В случае использования **Модели объёмного высвечивания**, данный параметр должен быть равен 1.

3.3.11.2.4 Граничные условия

Типы границ соответствуют выбранной модели течения.

При активизации блока **Излучение в объеме**, в граничные условия добавляются закладки **Плотность Энергии Излучения** и **Чернота** (степень черноты поверхности).

Тип границы	Граничные условия, устанавливаемые по умолчанию		Допустимые граничные условия	
	Плотность Энергии Излучения	Чернота	Плотность Энергии Излучения	Чернота
любой	Радиационный поток с поверхности	Чернота	Радиационный поток с поверхности	Чернота
			Радиационный поток рассчитывается	

На границах расчетной области w для **Черноты** определено следующее граничное условие:

Чернота

На границе задано фиксированное значение для степени черноты поверхности ϵ_w

$$(1) \quad \epsilon|_w = \epsilon_w$$

На границах расчетной области w для **Плотности Энергии Излучения** определены следующие граничные условия:

Радиационный поток с поверхности

Данное условие предполагает, что радиационный поток в расчетную область с i-й поверхности $q_{i,rad}$

известен и задаётся пользователем. Условие имеет смысл для **Диффузионной модели (P1)** и **Модели осреднённой лучистой энергии**.

$$(2) \quad q_{\text{rad}}|_w = q_w$$

Радиационный поток рассчитывается

Для диффузионной модели – это смешанное граничное условие:

$$(3) \quad q_{\text{rad}} = -\frac{4}{3(\alpha + \beta)} \frac{\partial E_r}{\partial n} = \frac{2\varepsilon}{2 - \varepsilon} (E_r - E_{b,w})$$

$$E_{b,w} = \sigma_{\text{rad}} T_w^4$$

Здесь n – координата вдоль нормали к поверхности, направленной внутрь расчетной области. Для **Модели осреднённой лучистой энергии** это условие, заданное хотя бы на одной поверхности, указывает на то, что E_r рассчитывается по формуле (2). На **Модель объёмного высвечивания** данное условие никак не влияет.

3.3.11.2.5 Начальные условия

Начальное поле плотности энергии излучения задаётся так:

$$E_{r,\text{ini}} = \sigma_{\text{rad}} T_{\text{ini}}^4$$

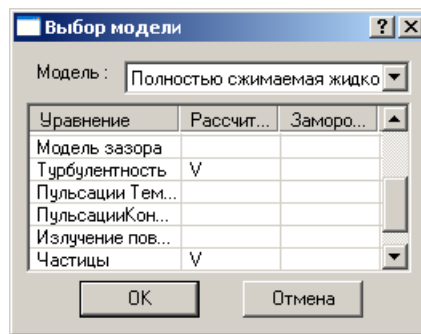
Остальные начальные условия – как в расчётной модели.

3.3.12 Частицы

Модель предназначена для моделирования двухфазных течений с частицами. Несущая фаза может быть жидкостью или газом. Частицы могут быть твёрдыми шариками, каплями, или пузырями. Модель **Частицы** работает совместно со всеми моделями течения.

Всегда предполагается взаимное влияние фаз, то есть несущая фаза определяет траектории частиц, частицы в свою очередь оказывают влияние на течение через источники массы, импульса (т. е. силу сопротивления, действующую на несущую фазу) и энергии.

Чтобы запустить расчёт частиц, поставьте маркер около "уравнения" **Частицы** в окне **Выбор модели**:



и нажмите ОК – два новых элемента с именами **Частицы** и **Вещество частиц** появились в папке **Физические Параметры**. Задайте вещество обычным образом. Свойства частиц задаются в папке **Физические Параметры Частицы** (см. раздел [Параметры](#)).

Замечание: всегда предполагается взаимное влияние фаз, то есть несущая фаза определяет траектории частиц,

3.3.12.1 Обозначения

Обозначение	Название	Название в FlowVision	Размерность
C_D	Коэффициент сопротивления		
C_{pp}	Теплоёмкость Вещества частиц		[Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹]
d	Диаметр частицы		[м]
$d_m^{(1)}$	Средний диаметр частиц в расчётной ячейке	СреднийДиаметр Частиц	[м]

Обозначение	Название	Название в FlowVision	Размерность
h_{lat}	Скрытая теплота испарения (или сублимации) Вещества частиц		[Дж·кг ⁻¹]
k	Турбулентная энергия	Турбулентная Энергия	м ² ·с ⁻²
l_e	Характерный размер турбулентного вихря		[м]
m	Масса частицы		[кг]
\dot{m}	Вдв Вещества1 с единицы поверхности частицы		[кг·м ⁻² ·с ⁻¹]
Nu	Число Нуссельта		
\dot{q}	Поток энергии к единице поверхности частицы		[Вт·м ⁻²]
Q_{mass}^p	Источник массы за счёт частиц	Источник массы (частицы), кг/м³с	[кг·м ⁻³ ·с ⁻¹]
Q_p^{enth}	Источник энтальпии за счёт частиц	Источник энтальпии (частицы), Вт/м³	[кг·м ⁻¹ ·с ⁻³]
Sc	Число Шмидта		
Sh	Число Шервуда		
T_p	Температура частицы	Температура Частиц	[К]
V_{dn}	Нормальная к стенке составляющая скорости капли		[м·с ⁻¹]
V_g	Скорость несущей фазы, вектор	Скорость	[м·с ⁻¹]
V_p	Скорость частицы, вектор	Скорость Частиц	[м·с ⁻¹]
V_r	Скорость частицы относительно несущей фазы, вектор		[м·с ⁻¹]
$V_{p,x,y,z}$	x, y, z компоненты скорости частиц	x, y, z Скорость Частиц	[м·с ⁻¹]
We	Число Вебера		
X_p	Положение частицы, вектор		[м]
Y_0	Массовая концентрация несущей фазы		
Y_1	Массовая концентрация Вещества1 , которое является паром Вещества частиц	Концентрация	
$Y_{1,sat}$	Массовая концентрация Вещества1 , соответствующая насыщению при данных температуре и давлении		
ε	Скорость диссипации турбулентной энергии	Турбулентная Диссипация	м ² ·с ⁻³
ε_{rad}	Степень черноты поверхности частицы	Чернота частиц	
λ	Коэффициент теплопроводности		[кг·м·с ⁻³ ·К ⁻¹]
μ	Коэффициент вязкости		[кг·м ⁻¹ ·с ⁻¹]
ρ	Плотность		[кг·м ⁻³]
σ	Поверхностное натяжение		[Н·м ⁻¹]
σ_{rad}	Постоянная Стефана-Больцмана		[Вт·м ⁻² ·К ⁻⁴]
τ_i	Время взаимодействия частицы с турбулентным вихрём		[с]
τ_e	Время жизни вихря		[с]
τ_t	Время пролёта частицы через вихрь		[с]

$$d_m = \frac{\sum_{i \rightarrow trajectories} d_i^3 N_i}{\sum_{i \rightarrow trajectories} d_i^2 N_i}$$

1) – средний Сотеровский диаметр частиц.

Здесь N_i – число частиц с i -й траектории в данной ячейке.

Индексы: 'g' – несущая фаза, 'p' – частицы, 'd' – капли, 'f' – плёнка, 'vol' – летучие, 'boil' – кипение. Остальные обозначения – стандартные.

3.3.12.2 Уравнения

В этом разделе приведены следующие уравнения:

- [Уравнения для несущей фазы](#)
- [Динамика частицы](#)
- [Испарение и нагревание частицы](#)
- [Взаимодействие капли со стенкой](#)
- [Пленки](#)

3.3.12.2.1 Уравнения для несущей фазы

Уравнение неразрывности:

$$(1) \quad \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g) = Q_{mass}^p$$

Уравнение сохранения массы для **Вещества1**:

$$(2) \quad \frac{\partial (\rho_g Y_1)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g Y_1) = \bar{\nabla} \cdot \left(\left(\rho_g D_1 + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \bar{\nabla} Y_1 \right) + Q_{mass}^p$$

Турбулентное число Шмидта полагается равным единице:

$$(3) \quad Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho_g D_t} = 1$$

Массовая концентрация **Вещества0** находится из условия:

$$(4) \quad Y_0 + Y_1 = 1$$

Уравнение сохранения импульса:

$$(5) \quad \frac{\partial (\rho_g \mathbf{V}_g)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g \otimes \mathbf{V}_g) = -\bar{\nabla} P + \bar{\nabla} \cdot \hat{\boldsymbol{\tau}}_g + \rho_g \mathbf{g} + \bar{Q}_{mom}^p$$

где

$$(6) \quad \tau_{g,\alpha\beta} = -\frac{2}{3} \rho_g K_g \delta_{\alpha\beta} + \mu_{g,eff} \left(\frac{\partial V_{g,\beta}}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial V_{g,\alpha}}{\partial x_\beta} \right) - \frac{2}{3} \mu_{g,eff} \frac{\partial V_{g,\gamma}}{\partial x_\gamma} \delta_{\alpha\beta}$$

Эффективная вязкость определена следующим образом:

$$(7) \quad \mu_{g,eff} = \mu_g + \mu_t$$

Уравнение сохранения энергии (для модели **Слабосжимаемая жидкость**):

$$(8) \quad \frac{\partial (\rho_g h_g(T_g))}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g h_g(T_g)) = \bar{\nabla} \cdot \left\{ - \left[- \left(\frac{\lambda_g}{Cp_g} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \bar{\nabla} h_g(T_g) \right] \right\} + Q_{enth}^p$$

Турбулентное число Прандтля полагается равным единице:

$$(9) \quad Pr_t = \frac{\mu_t Cp_g}{\lambda_t} = 1$$

Примечание: неиспаряющиеся частицы можно рассчитывать в моделях **Ламинарной жидкости** и **Несжимаемой жидкости**. Испаряющиеся частицы нужно рассчитывать в моделях **Слабосжимаемой жидкости** или **Полностью сжимаемой жидкости**.

3.3.12.2.2 Динамика частицы

$$(1) \quad \frac{d\mathbf{X}_p}{dt} = \mathbf{V}_p$$

$$(2) \quad \frac{dV_p}{dt} = \frac{\pi d^2}{8m} C_D \rho_g |V_r| V_r + g \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_p} \right)$$

где

$$(3) \quad \mathbf{V}_r = \mathbf{V}_g - \mathbf{V}_p$$

– скорость частицы относительно несущей фазы. Эффект присоединенной массы не учитывается. Силы Бассета, Сафмана и Магнуса – тоже.

Скорость несущей фазы представляется в виде суммы средней $\langle \mathbf{V}_g \rangle$ и пульсирующей \mathbf{V}_g' составляющих:

$$(4) \quad \mathbf{V}_g = \langle \mathbf{V}_g \rangle + \mathbf{V}_g'$$

При этом i -я компонента пульсирующей составляющей моделируется так:

$$(5) \quad V_{g,i}' = \sqrt{\frac{2}{3}} k \cdot \varphi_i + V_{dr,i}'$$

Здесь φ_i - Гауссовское случайное число. Дрейфовая скорость \mathbf{V}_{dr}' вычисляется следующим образом:

$$(6) \quad V_{dr,i}'(t + \Delta t) = V_{dr,i}'(t) + \Delta t \frac{1}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i}$$

Интегрирование по времени ведётся с начала взаимодействия частицы с локальным турбулентным вихрём. Время взаимодействия частицы с вихрём τ_i - минимум двух величин: времени жизни вихря τ_e и времени пролёта частицы через вихрь τ_t :

$$(7) \quad \tau_i = \min(\tau_e, \tau_t)$$

$$(8) \quad \tau_e = \frac{l_e}{\sqrt{\frac{2}{3}} k}$$

$$(9) \quad \tau_t = \frac{l_e}{|\mathbf{V}_p - \langle \mathbf{V}_g \rangle|}$$

Здесь l_e - характерный размер вихря:

$$(10) \quad l_e = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, \quad C_{\mu} = 0.09$$

По истечении времени взаимодействия $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ пересчитываются, а \mathbf{V}_{dr}' зануляется. Описанная модель турбулентной дисперсии частиц является упрощенным вариантом модели, предложенной в работе [Papp, J.L., York B.J., Sinha, N., Dash, S.M., "Progress in Modeling Particle Turbulent Dispersion in High-Speed Jets/Plumes," AIAA-2003-1284, 15 p.].

Модельные частицы, представляющие реальные частицы данного размера, распределены равномерно по сечению входа. Пользователь должен задать массовое распределение реальных частиц по четырем размерным группам.

В текущей версии реализованы пять моделей для вычисления C_D .

Модель 1 ("Стандартная"):

$$(11) \quad C_D = \frac{21.12}{Re} + 6.3Re^{-0.5} + 0.25$$

Модель 2 [James, P.W., Hewitt, G.F. and Whalley, P.B., "Droplet Motion in Two Phase Flow," *Proc. of the ANS/ASM/NRC Inst. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermohydraulics*, Report NUREG/CP-0014, pp. 1484-1503]:

$$(12) \quad C_D = \frac{24}{Re} + 0.44$$

Модель 3 [Клячко Л.С., "Уравнение движения пылевых частиц в пылеприёмных устройствах," *Отопление и вентиляция*, 1934, № 4, с. 11-17]:

$$(13) \quad C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} + 4Re^{-1/3} & Re < 1000 \\ 0.44 & Re \geq 1000 \end{cases}$$

Модель 4 - Стейна (Stein) [Schmehl, R., Roskamp, H., Willmann, M., and Witting, S., 1999, "CFD Analysis of Spray Propagation and Evaporation Including Wall Film Formation and Spray/Film Interaction," *Int. J. of Heat and Fluid Flow* **20**, pp. 520-529.]:

$$(14) \quad C_D = \frac{24}{Re} + 5.48Re^{-0.573} + 0.36$$

Модель 5 [Clevenger, W.B. & Tabakoff, W., 1976, "Dust Particle Trajectories in Aircraft Radial Turbines," *AIAA Journal*, pp. 786-791]:

$$C_D = \frac{24}{Re} + 4.5 \quad Re < 1$$

$$C_D = 25 - 24 \lg Re + 9.0682 \lg^2 Re - 1.7713 \lg^3 Re + 0.1718 \lg^4 Re - 0.0065 \lg^5 Re \quad 1 \leq Re \leq 3000$$

$$C_D = 0.4 \quad Re > 3000$$

(15)

При $Re < 0.1$ коэффициент сопротивления всегда рассчитывается по Стоксу:

$$(16) \quad C_D = \frac{24}{Re}$$

3.3.12.2.3 Испарение и нагревание частицы

Предполагается, что теплоперенос внутри частицы происходит бесконечно быстро.

Сохранение массы:

$$(1) \quad \frac{dm}{dt} = -\dot{m} \pi d^2$$

$$(2) \quad \dot{m} = \frac{Sh \mu_g}{Sc d} \Phi \quad [\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}]$$

В текущей версии реализованы пять моделей для вычисления величины Φ .

Модель 1:

$$(3) \quad \Phi = \ln \left[1 + \frac{Y_{1,\text{sat}}(T_p) - Y_1}{1 - Y_{1,\text{sat}}(T_p)} \right]$$

Модель 2:

$$(4) \quad \Phi = \frac{Y_{1,\text{sat}}(T_p) - Y_1}{1 - Y_{1,\text{sat}}(T_p)}$$

Модель 3:

$$(5) \quad \Phi = \frac{Y_{1,\text{sat}}(T_p) - Y_1}{1 - Y_{1,\text{sat}}(T_p)} \frac{1}{1 + C_{p,\text{vol}} \frac{T_g - T_p}{h_{\text{lat}}(T_p)}}$$

Модель 4:

$$(6) \quad \Phi = Y_{1,\text{sat}}(T_p) - Y_1$$

Модель 5:

$$(7) \quad \Phi = (Y_{1,\text{sat}}(T_p) - Y_1) \frac{1}{1 + C_{p,\text{vol}} \frac{T_g - T_p}{h_{\text{lat}}(T_p)}}$$

Все модели можно найти в [Miller, R.S., Harstad, K., and Bellan, J., 1998, "Evaluation of Equilibrium and Non-equilibrium Evaporation Models for Many-droplet Gas-Liquid Flow Simulation," *Int. J. of Multiphase Flow*, **24**, pp. 1025-1055].

При $Y_{1,\text{sat}}(T_p) > 0.99$ и $T_g > T_{p,\text{boil}}$ капли испаряются в режиме кипения:

$$(8) \quad \dot{m} = Nu \frac{\lambda_g}{d} \frac{T_g - T_{p,\text{boil}}}{h_{\text{lat}}(T_{p,\text{boil}})}$$

Вещество 1 может конденсироваться на поверхности капель.

Сохранение энергии (уравнение для температуры частицы):

$$(9) \quad \frac{dT_p}{dt} = (\dot{q} - \dot{m} h_{\text{lat}}(T_p)) \frac{6}{d \rho_p C_{p,p}}$$

$$(10) \quad \dot{q} = Nu \frac{\lambda_g}{d} (T_g - T_p) + \sigma_{\text{rad}} \epsilon_{\text{rad}} (T_g^4 - T_p^4) \quad [\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}]$$

В текущей версии реализованы две модели для вычисления чисел Шервуда и Нуссельта.

Модель Клифта (Klift):

$$Sh = 1 + (1 + ReSc)^{1/3}, \quad Re \leq 1$$

$$Sh = 1 + (1 + ReSc)^{1/3} Re^{0.077}, \quad Re > 1$$

$$Nu = 1 + (1 + RePr)^{1/3}, \quad Re \leq 1$$

$$(11) \quad Nu = 1 + (1 + RePr)^{1/3} Re^{0.077}, \quad Re > 1$$

Модель Фросслинга (Frossling):

$$Sh = 2 + 0.552 Re^{1/2} Sc^{1/3}$$

$$(12) \quad Nu = 2 + 0.552 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

Обе модели можно найти в [Abramzon, B. & Sirignano, W.A., 1989, "Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculations," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **32**(9), pp. 1605-1618.].

3.3.12.2.4 Взаимодействие капли со стенкой

Для капель около стенки определяют число Вебера:

$$(1) \quad We = \frac{\rho_d d V_{dn}^2}{\sigma(T_d)}$$

- В режиме прилипания частица медленно приближается к стенке, приклеивается, и вливается в пленку

Режим прилипания: $We < 5$

- При более высоких нормальных скоростях капля отскакивает от стенки.

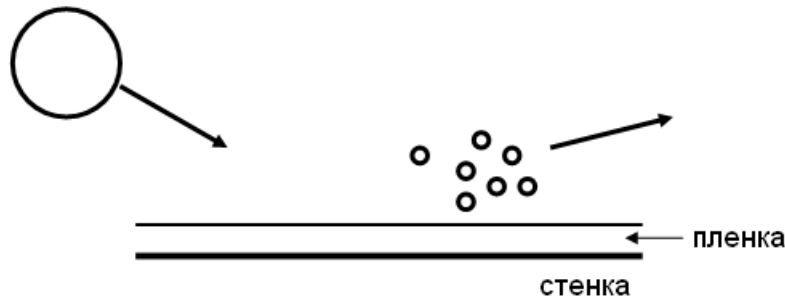
Режим отскока: $5 < We < 10$

- Далее следует режим вливания аналогичный режиму прилипания

Режим вливания: $10 < We, S < 1$

$$(2) \quad S = \frac{Re}{24 \cdot La^{0.419}}, \quad Re = \frac{\rho_d d V_{dn}}{\mu_d(T_d)}, \quad La = \frac{\rho_d d \sigma(T_d)}{\mu_d(T_d)}$$

- Наконец, наиболее интенсивное взаимодействие происходит в режиме разбрызгивания, который характеризуется вливанием части жидкости в плёнку и возвращением вторичных (существенно более мелких) капель в несущую фазу:



Режим разбрызгивания: $S > 1$

̄мпирическое соотношение для массовой доли жидкости влившейся в плёнку:

$$(3) \quad \eta = S^{-0.6}$$

̄мпирическое соотношение для среднего диаметра вторичных капель:

$$(4) \quad \ln \frac{d_{splash}}{d_0} = -2 - \frac{d_0}{d_{ref}} - 0.05 S, \quad d_{ref} = 4066 \mu m$$

Здесь d_0 – диаметр капли до столкновения со стенкой, d_{splash} – диаметр капель образованных в процессе столкновения. Реализованная модель является комбинацией двух моделей описанных в [D.W. Stanton and C.J. Ruthland, *Multi-Dimensional Modeling of Thin Liquid Films and Spray-Wall Interactions Resulting From Impinging Sprays*, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 41, pp. 3037-3054, 1998] и [R. Schmehl, H. Roskamp, M. Willmann, and S. Witting, *CFD Analysis of Spray Propagation and Evaporation Including Wall Film Formation and Spray/Film Interaction*, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, vol. 20, pp. 520-529, 1999].

3.3.12.2.5 Плёнки

Если несущая фаза – газ, а частицы – капли, на твёрдых стенках образуются плёнки. Течение жидкости в плёнках не рассчитывается. Предполагается, что если на фасетки, принадлежащие некоторой группе фасеток, падают капли, то жидкость равномерно распределяется по поверхности данной группы. Пользователь может представить стенку несколькими группами фасеток и задать различные граничные условия типа **Стенка** на этих группах.

Предусмотрены четыре модельные ситуации:

- плёнки и вторичные капли не образуются, все капли отскакивают от стенки как твёрдые частицы;
- плёнки и вторичные капли образуются, но не испаряются, жидкость неважно как удаляется со стенки;
- плёнки и вторичные капли образуются, вся падающая жидкость равномерно испаряется с фасеток данной группы;
- плёнки и вторичные капли образуются, часть жидкости испаряется в конвективном режиме, остальная жидкость неважно как удаляется со стенки.

Рассмотрим случай г) более подробно.

Если для температуры задано граничное условие **Значение на стенке**, температура плёнки полагается равной температуре стенки. Если для температуры задано граничное условие **Нулевой поток**, температура плёнки полагается равной температуре газа в данной приграничной ячейке. Скорость испарения жидкости с поверхности плёнки вычисляется следующим образом:

$$(1) \quad \dot{m} = \frac{Y_+}{Y_1^+} \frac{\mu_g}{y} (Y_{1,sat}(T_f) - Y_1) \quad [\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}]$$

где величина Y_{1+} вычисляется через число Шмидта аналогично тому как величина T_+ вычисляется через число Прандтля в главе **Несжимаемая жидкость**; величина y_+ определена в той же главе; y – расстояние до стенки. Скорость испарения (1) ограничена сверху значением потока жидкости в пленку деленным на площадь данной группы фасеток. Конденсация на стенках запрещена.

3.3.12.2.6 Взаимодействие между фазами

Всегда предполагается взаимное влияние фаз, то есть несущая фаза определяет траектории частиц, частицы в свою очередь оказывают влияние на течение через источники массы, импульса (т. е. силу, действующую на несущую фазу) и энергии. Источники рассчитываются следующим образом.

Источник массы:

$$(1) \quad Q_{mass}^p = Q_{vapor}^p = \sum_{j=trajectories} (m_{p,in} - m_{p,out})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}$$

Источник импульса:

$$(2) \quad \bar{Q}_{mom}^p = - \sum_{j=trajectories} \frac{\pi I_p^2}{2} C_{Dj} \rho_g |\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_p|_j (\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_p)_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}$$

Источник энтальпии:

$$(3) \quad Q_{enth}^p = \sum_{j=trajectories} (m_{p,in} h_{p,in} - m_{p,out} h_{p,out})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}$$

3.3.12.3 Параметры

Свойства частиц и эмпирические модели для коэффициента сопротивления частиц, тепломассообмена и испарения задаются в папке **Физические Параметры Частицы**:

Имя страницы	Имя в FlowVision	Параметр	Размерность
Траектории	Выпускать каждые N шагов	Период для расчёта частиц, измеряемый в гидродинамических шагах по времени. ¹	
	Макс. время жизни, с	Лимитирующее значение для расчета траектории частицы. ²	с
	Релакс. параметр	Параметр для взвешивания старых и новых источников за счёт частиц в стационарном расчёте. ³	
	Нестационарность	Выбор режима течения. ⁴	
	N траекторий	Число рассчитываемых траекторий. ⁵	
	Стереть	Параметр, позволяющий заменить Вещество частиц. ⁶	
	Действие силы частиц	Действие силы сопротивления со стороны частиц на несущую фазу. ⁷	
	Шаг по пространству, м	Максимально допустимое расстояние между последовательными положениями модельной частицы в пространстве. ⁸	м
	Максимальный источник массы, кг·с⁻¹·м⁻³	Максимальное допустимое значение источника массы. ⁹	кг·с ⁻¹ ·м ⁻³
	Максимальное число шагов	Прекращение расчёта такой траектории по достижении заданного числа шагов по пространству. ¹⁰	
	Конденсация	Включение/выключение конденсации на поверхности капель. ¹¹	
	Корр Cd капель	Включение/выключение коррекции коэффициента сопротивления капель. ¹²	
	Взаимодействие частиц	Включение/выключение учёта взаимодействия частиц. ¹³	
	Эффект турбулентности	Включение/выключение учёта турбулентной дисперсии частиц.	
Сдвиг от границы	Искусственное смещение частицы внутрь расчётной области по нормали к границе.	м	
Эмпирические модели	Сопротивление		
	SHNU		
	Тепломассоперенос		

Примечание:

¹ Ноль означает, что частицы рассчитываются на каждом временном шаге. Нельзя выпускать модельные частицы до установления течения несущей фазы, то есть необходимо сделать по крайней мере несколько шагов без расчёта частиц. В нестационарной задаче ранее выпущенные частицы рассчитываются (продвигаются по траекториям) на каждом шаге по времени, а параметр **Выпускать каждые N шагов** определяет только интервал выпуска новых частиц. Интенсивность траектории (количество реальных частиц, представляемых одной модельной частицей) соответствует значению данного параметра.

² Некоторые частицы образуют бесконечные (циклические) траектории. Чтобы остановить расчёт такой траектории, задайте некоторое лимитирующее значение равное, например, 10–100 пролетным временам несущей фазы.

³ Параметр принимает значения от 0 до 1. Значение 1 означает что при расчёт течения несущей фазы используются "позднейшие" источники. В нестационарном расчёт всегда используются "позднейшие" источники (данный параметр игнорируется).

- ⁴ Значение 0 задаётся при стационарном режиме течения, значение 1 задаётся в нестационарных задачах, значение 2 используется для задания начального распределения частиц по мгновенному полю течения в нестационарной задаче (после одного шага по времени параметр принимает значение 1).
- ⁵ Текущее число рассчитываемых траекторий, задавать не надо. Отметим различие между "стационарной" и "нестационарной" траекториями:
 - при стационарном двухфазном течении траектория – это путь, который частица проходит от входа до выхода (или до конечной точки, определяемой полным испарением, параметром **Макс. время жизни, с**, или параметром **Максимальное число шагов**),
 - при нестационарном течении траектория – это путь, который частица проходит за гидродинамический временной шаг.
- ⁶ Значение 0 (значение по умолчанию) предполагает, что Вы работаете с одними и теми же частицами, выпускаемыми из одних и тех же стартовых точек. Если Вы хотите поменять **Вещество частиц**, распределение их по размерам или число стартовых точек, при этом сохранив решение для несущей фазы, задайте **Стереть** = 1. После пересчета характеристик модельных частиц параметр **Стереть** автоматически принимает значение 0.
- ⁷ Задайте 0, если хотите запретить действие силы сопротивления со стороны частиц на несущую фазу, задайте 1 в противном случае.
- ⁸ Если данный параметр задан большим (например, 1 м), то последовательные расчетные положения частицы будут на гранях ячеек (частица будет последовательно перелетать с грани на грань каждой ячейки вдоль её пути). Отметим, что точки входа в ячейку и выхода из неё рассчитываются всегда. Это необходимо для определения источников массы и энтальпии в данной ячейке. Задание значений меньше размера ячеек позволяет более точно построить траектории частиц в ячейках.
- ⁹ В некоторых задачах на начальном этапе расчёта требуется ограничить источники массы, импульса и энергии за счёт частиц. Этот параметр задаёт максимальное допустимое значение источника массы. Если в данной ячейке источник массы больше допустимого, то он обнуляется. Вместе с ним обнуляются источники импульса и энергии.
- ¹⁰ Помимо циклических (бесконечных) траекторий модельных частиц иногда получаются бесконечные "колебательные" траектории, например, в углу между двумя стенками. Параметр предназначен для прекращения расчёта такой траектории по достижении заданного числа шагов по пространству.
- ¹¹ Значение 0 запрещает конденсацию на поверхности капель, значение 1 – разрешает.
- ¹² Значение 0 соответствует отсутствию коррекции коэффициента сопротивления капель, при задании значения 1 коэффициент сопротивления умножается на дополнительный коэффициент C_w , эффективно учитывающий деформацию капель:

$$C_w = 1.5 \quad \text{при } We \geq 5.7$$

$$C_w = \exp(0.03 \cdot We^{1.5}) \quad \text{при } We < 5.7$$

$$We = \rho_g |\vec{V}_g - \vec{V}_d|^2 d / \sigma$$
 где We – число Вебера, вычисленное по разности скоростей капель и несущей фазы (газа).
- ¹³ Значение 0 отключает алгоритм взаимодействия частиц, значение 1 – включает (в настоящий момент реализован простой алгоритм, разворачивающий скорости частиц по антиградиенту их концентрации).

3.3.12.4 Граничные условия

Следующие типы границ допустимы в модели частиц:

- **Стенка;**
- **Вход/Выход;**
- **Свободный выход;**
- **Сопряженное;**
- **Симметрия;**
- **Периодическое;**
- **Скользкая поверхность.**

В таблице приводится соответствие граничных условий типам границ:

Тип границы	Граничное условие на странице Скорость Частиц	Доступные граничные условия на странице Скорость Частиц
Стенка	Частицы стенка	Частицы стенка
		Жидкий вход
		Частицы + скорость
		Частицы выход

Тип границы	Граничное условие на странице Скорость Частиц	Доступные граничные условия на странице Скорость Частиц
Вход/выход	Двухфазный вход	Двухфазный вход Частицы + скорость
Свободный выход	Частицы выход	Частицы выход Частицы стенка
Сопряженное	Частицы стенка	Жидкий вход Частицы + скорость
Симметрия	Симметрия	Симметрия
Периодичное	Периодическое	Периодическое
Скользкая поверхность	Скольжение	Скольжение

В каждом граничном условии присутствует не редактируемое поле **Поток массы, кг/с**, куда выводится поток частиц, падающих/возвращающихся на данную поверхность.

Внимание! Каждому физическому входу частиц должно соответствовать отдельное граничное условие, т.е. число входов для частиц = число входных ГУ для частиц.

3.3.12.4.1 Тип Стенка

На странице/закладке **Скорость частиц** можно задать следующие граничные условия:

Частицы стенка

Три параметра определяют это условие:

- **Отражение** – коэффициент восстановления нормальной составляющей импульса частицы после взаимодействия со стенкой. Значение 1 соответствует зеркальному отскоку, значение 0 означает полное зануление нормальной составляющей скорости частицы. Промежуточные значения задают неупругий отскок.
- **Пленка**
 - = 0 означает что образование пленок на данной стенке запрещено. Для твердых частиц только это значение имеет смысл. Капли отскакивают как твёрдые шарики;
 - = 1 означает что пленка и вторичные капли образуются, однако жидкость с пленки не испаряется;
 - = 2 означает что скорость испарения пленки равна скорости вливания жидкости в пленку на данной группе фасеток;
 - = 3 означает что испарение пленки происходит в конвективном режиме.
- **Торможение** – коэффициент восстановления тангенциальной составляющей импульса частицы после взаимодействия со стенкой. Значение 1 задаёт сохранение тангенциальной скорости. Значения < 1 позволяют задавать торможение частиц стенкой.

Жидкий вход

Данное условие предназначено для задания жидкого входа. Определяется 14-ю параметрами:

Поток частиц, кг/с	Поток массы частиц через данную группу фасеток
Температура частиц (°К или °С)	Начальная температура частиц
Диаметр частиц i, м	Диаметр частиц из группы $i=1, 2, 3, 4$
Массовая доля частиц i	Массовая доля группы $i=1, 2, 3, 4$
Чернота частиц	Степень черноты поверхности частиц: 0 Чернота 1
N стартовых точек	В этом поле необходимо задать примерное число стартовых точек модельных частиц. В случае круглого или квадратного входа рекомендуется задавать квадрат целого числа. После одного расчёта частиц параметр принимает значение точного числа стартовых точек. Стартовые точки распределяются (почти) равномерно по входному сечению. Из одной точки выпускаются 4 модельные частицы, представляющие различные 'размерные' группы. ¹
% раб. старт. точек	Доля стартовых точек, из которых на очередном шаге по времени выпускаются частицы в нестационарной задаче. ¹
Угол распыла	Полу-угол начального распыла частиц (°)

Примечания:

¹ В нестационарной задаче число траекторий может стать очень большим. Поэтому желательно иметь возможность манипулировать числом траекторий выпускаемых на одном гидродинамическом временном шаге. Параметр **% раб. старт. точек** позволяет сделать активными только часть стартовых точек. Активные точки для очередного временного шага выбираются случайным образом из **N стартовых точек**. Предельные ситуации: 'одна активная стартовая точка' и 'все стартовые точки активны'. Случайный выпуск частиц в нестационарной задаче может производиться как с подвижных, так и неподвижных, как с наветренных, так и подветренных групп фасеток.

Скорость частиц рассчитывается по потоку жидкости, её плотности, и по площади входного сечения.

Частицы + норм. скорость

К параметрам условия **Жидкий вход** добавляется параметр **Скорость частиц** (м/с), задающий нормальную (ко входному сечению) скорость частиц. К начальной скорости частицы, стартующей с подвижной группы фасеток (с подвижного тела), добавляется локальная скорость поверхности тела.

Частицы + скорость

К параметрам условия **Жидкий вход** добавляется параметр **Скорость частиц** (м/с), задающий вектор скорости частиц. К начальной скорости частицы, стартующей с подвижной группы фасеток (с подвижного тела), добавляется локальная скорость поверхности тела.

Частицы выход

Условие исключения частиц из расчета при касании ими стенки (аналогично условию в типе [Свободный выход](#)).

3.3.12.4.2 Тип Вход/выход

На странице/закладке **Скорость частиц** можно задать следующие граничные условия:

Двухфазный вход

Условие предназначено для задания двухфазного входа. Параметры – те же, что и в условии [Жидкий вход](#). Скорость частиц автоматически задаётся равной скорости несущей фазы.

Частицы + норм. скорость

Соответствует аналогичному условию в типе [Стенка](#).

Частицы + скорость

Соответствует аналогичному условию в типе [Стенка](#).

Двухфазный подсос

Условие предназначено для задания двухфазного входа, на котором для скорости задано граничное условие **Давление**. Отличие от условия **Двухфазный вход**: вместо параметра **Поток частиц, кг/с** задаётся **Конц. частиц, кг/м³** (массовая концентрация частиц в подводящем канале).

3.3.12.4.3 Тип Свободный выход

На странице/закладке **Скорость частиц** можно задать следующие граничные условия:

Частицы выход

Данное условие задаётся на фасетках, представляющих выход. Оно не требует никаких параметров.

3.3.12.4.4 Тип Сопряженное

На странице/закладке **Скорость частиц** можно задать такие же граничные условия, что и для типа [Стенка](#).

3.3.12.4.5 Тип Симметрия

На странице/закладке **Скорость частиц** можно задать следующие граничные условия:

Симметрия

Условие задаёт упругий отскок модельной частицы от данной поверхности. Оно не требует никаких параметров.

3.3.12.4.6 Тип Периодическое

На странице/закладке **Скорость частиц** можно задать следующие граничные условия:

Периодическое

Модельная частица, уходящая из расчетной области через данную поверхность, появляется из связанной поверхности. Условие не требует никаких параметров.

3.3.12.4.7 Тип Скользящая поверхность

На странице/закладке **Скорость частиц** можно задать следующие граничные условия:

Скользящая поверхность

Условие позволяет модельной частице пересекать границу между неподвижной и вращающейся подобластями. Оно не требует никаких параметров. При задании связи подобластей в окне **Новая связка** неподвижная подобласть должна быть указана слева, вращающаяся - справа.

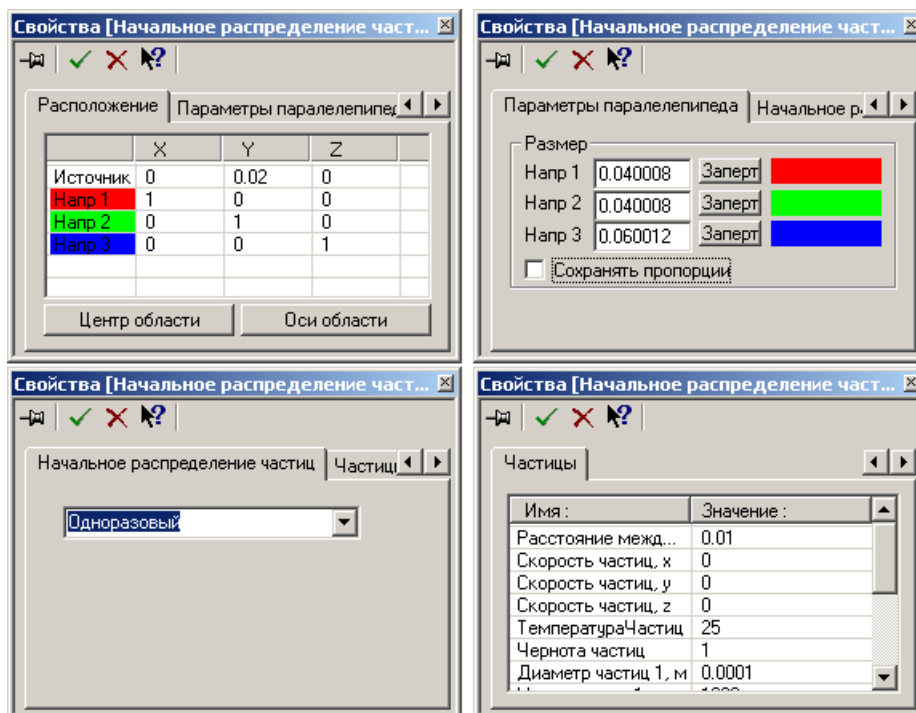
3.3.12.5 Начальные условия

Начальные условия такие же как в используемой модели течения.

3.3.12.6 Фильтр "Начальное распределение частиц"

Данный фильтр задаёт начальное распределение модельных частиц внутри расчетной области в пределах некоторого трёхмерного объекта (параллелепипеда или конуса). Фильтр имеет смысл только если **Частицы** отмечены в окне **Выбор модели**. Первые три страницы фильтра – стандартные (см. том [Руководство пользователя](#)):

Все характеристики частиц собраны на странице **Частицы**:



- **Расстояние между мод. частицами** – расстояние между модельными частицами – одно и то же в направлениях x, y, и z;
- **Скорость частиц x, y, z** – компоненты начальной скорости частиц. К начальной скорости частицы, стартующей во вращающейся подобласти, добавляется окружная скорость стартовой точки. Если хотите чтобы начальные скорости частиц совпадали с местными значениями скорости несущей фазы, задайте одну из компонент равной 10^6 ;
- **Температура частиц** (K или °C) – начальная температура частиц;
- **Чернота частиц** – степень черноты поверхности частиц;
- **Диаметр частиц i, м** – диаметр физических частиц из 'размерной' группы i=1, 2, 3, 4;
- **Масса частиц i, кг** – полная масса физических частиц из 'размерной' группы i=1, 2, 3, 4, находящихся внутри фильтра;

Если нужно установить модельные частицы в некоторой части (или во всей) расчетной области и затем наблюдать их движение, задайте фильтр как **Одноразовый**. Если нужно выпускать модельные частицы из стартовых точек на каждом временном шаге, задайте фильтр как **Постоянный**.

3.3.12.7 Фильтр "Остановка горения"

Данный фильтр, изначально созданный для **Модели горения**, используется в модели **Частицы** для запрещения тепло-массообмена между частицами и несущей фазой в области действия фильтра. Это иногда требуется в областях, где нарушается ограничение модели Лагранжевых частиц (частицы не должны занимать более 10% объема ячейки). Такая ситуация возможна, например, около жидкого входа. При этом динамика частиц рассчитывается стандартным образом. Данная возможность реализована для всех моделей, начиная с **Ламинарной жидкости**.

3.3.12.8 Дополнительные средства представления результатов

1. Скалярные характеристики (поля):

Концентрация Частиц	Суммарная массовая концентрация частиц (всех размеров)
Температура Частиц	Средняя массовая температура частиц
ИстМассы Частиц [кг/м³с]	Распределенный источник массы за счёт частиц
ВремяПробывания Частиц	Среднее время пребывания частиц в ячейке
СреднийДиаметр Частиц	Средний Сотеровский диаметр частиц в расчётной ячейке
x, y, z Скорость Частиц	x, y, z компоненты средней массовой скорости частиц
Модуль Скорости Частиц	Модуль средней массовой скорости частиц

2. Векторные характеристики (поля):

Скорость частиц	Средняя массовая скорость частиц.
------------------------	-----------------------------------

3. Слой визуализации **Траектории** (см. том [Руководство пользователя](#)).

4. Вывод в Info окно слоя Характеристики, построенного для любой переменной, массовых расходов частиц, вылетающих из расчётной области через выходы, скользящие и периодические поверхности.

3.3.13 Модель зазора

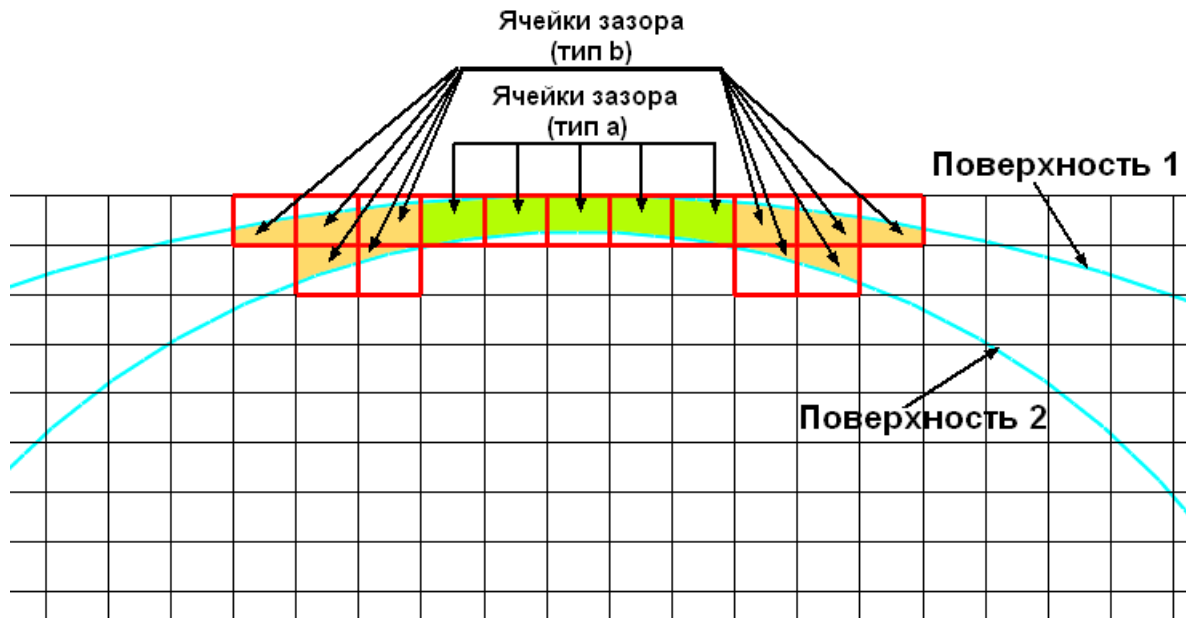
Данная модель предназначена для учета сопротивления, создаваемого узким каналом. Модель зазора используется в тех случаях, когда не удастся разрешить канал с помощью расчетной сетки. Модель зазора используется только в ячейках зазора.

Ячейка расчетной сетки считается **Ячейкой зазора**, если:

а) в ней находятся две зазор-образующие поверхности,

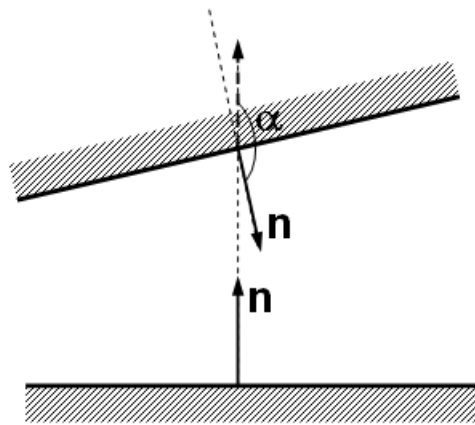
а) в ней находится одна зазор-образующая поверхность, а вторая зазор-образующая поверхность находится в соседней к ней ячейке

при этом расстояние между зазор-образующими поверхностями (d) должно быть меньше **максимального зазора**.



Две поверхности считаются **зазор-образующими**, если они удовлетворяют условиям:

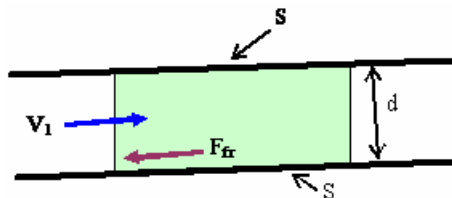
1. обе поверхности принадлежат разным граничным условиям, каждое из которых имеет тип **Стенка**,
2. угол между нормальными этих поверхностей лежит в диапазоне $120 < \alpha < 180$.



Ячейки зазора определяются **FlowVision** автоматически (при условии, что они удовлетворяют указанным условиям). Модель зазора чувствительна к количеству ячеек вдоль зазора.

3.3.13.1 Уравнения

Стандартная модель зазора, реализованная во FlowVision предполагает, что внутри зазора реализуется медленное течение с малым числом Рейнольдса. При этом предполагается, что внутри зазора существует течение Пуайзеля.



Рассмотрим ячейку зазора объемом v . По сути, она представляет собой узкий канал шириной d и с площадью образующих канал поверхностей $2S$. Пусть поперек зазора существует параболический профиль скорости со средней скоростью V_1 вдоль канала (течение Пуайзеля). Тогда объемная сила трения в ячейке будет равна

$$(1) \quad F = - \frac{12\mu V_1 S}{dv}$$

или, учитывая $v = Sd$, получим

$$(2) \quad F = - \frac{12\mu V_1}{d^2}$$

Перепишем силу трения в векторной форме. Для целей стабильности алгоритма запишем силу в виде, подобному закону Дарси

$$(3) \quad \mathbf{F} = -\rho D \mathbf{V}$$

где $D > 0$ и из (2) получим

$$(4) \quad D = \frac{6\mu}{\rho d^2}$$

Таким образом, при расчете уравнений Навье-Стокса в ячейках зазора численная аппроксимация модифицируется, при этом добавляется сила трения в виде (3).


В **FlowVision** предусмотрены две модели: **Стандартная модель зазора** (4) и **Без модели зазора** ($D=0$). Отметим, при использовании модели зазора ячейки зазора не помечаются как "маленькие". Поэтому при включении опции удаления "маленьких ячеек" ячейки зазора никогда не удаляются (см. том [Руководство пользователя](#)).

3.3.13.2 Параметры

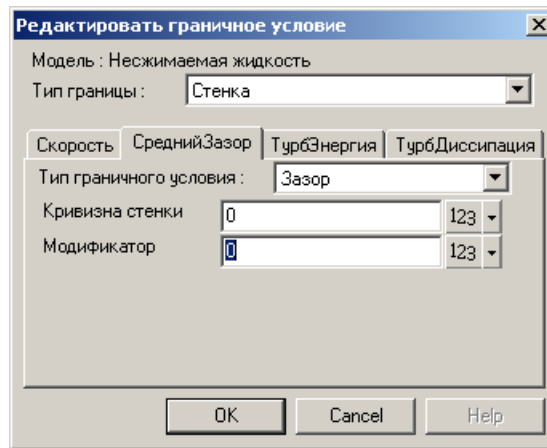
Физические параметры задаются в папке **Физические параметры** **Параметры модели**.

Имя страницы	Имя в FlowVision	Обозначение
Сопротивление щели	Без модели зазора	using
	Стандартная модель зазора	using
	Пользовательская модель зазора ¹	using

Примечания:

¹ Если выбрана **Пользовательская модель зазора**, то необходимо нажать на кнопку . Появится стандартный диалог открытия файла. В этом диалоге необходимо указать имя dll-библиотеки, из которой будет загружаться пользовательская функция, определения сопротивления в зазоре.

3.3.13.3 Граничные условия



Для этой модели доступно два граничных условия:

- **Без зазора** – поверхность с этим граничным условием не участвует в образовании зазора.
- **Зазор** – поверхность с этим граничным условием участвует в образовании зазора. Этот тип граничного условия для "уравнения" **Зазор** можно задать только в случае, если граничное условие имеет тип **Стенка**.

Это граничное условие требует задания следующих параметров:

- **Кривизна стенки** для этого граничного условия. Этот параметр характеризует кривизну поверхности, равняется $1/R$ (где R – радиус кривизны поверхности) и имеет размерность $1/м$.
- **Модификатор** – позволяет изменять ширину зазора без внесения изменений в исходную геометрию. Например, имеются 2 поверхности, между которыми есть зазор. Зазор между ними равен G_0 . Если на одной из поверхностей задать модификатор, равный D , то зазор между поверхностями будет вычисляться по формуле:

$$G = G_0 \left(1 - \frac{D}{G_0} \right)$$

3.3.13.4 Начальные условия

Начальные условия определяются для выбранной модели течения.

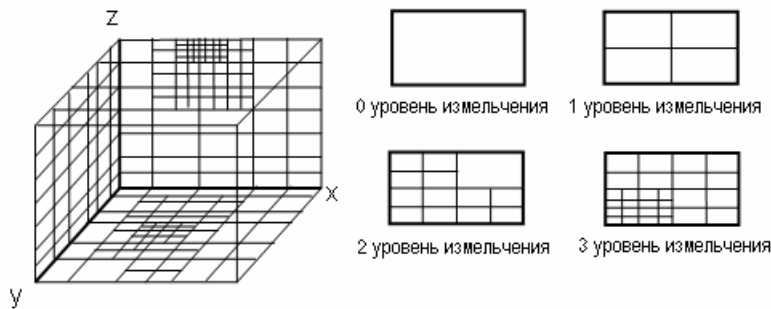
3.4 Метод расчета

В этой главе описываются:

- [используемая расчетная сетка](#);
- [методы решения уравнений переноса](#);
- [разностная схема](#);
- [методы решения системы алгебраических уравнений](#).

3.4.1 Адаптивная сетка с локальным измельчением

Для разрешения малых деталей геометрии расчетной области и высоких градиентов рассчитываемых величин используется прямоугольная адаптивная локально измельченная сетка (**АЛИС**).



Сущность технологии **АЛИС** заключается в следующем. Во всей расчетной области вводится прямоугольная сетка. Выделяются подобласти с особенностями геометрии или течения, в которых необходимо провести расчет на более мелкой, чем исходная, сетке. При этом расчетная ячейка, в которую попала выделяемая особенность, делится на 8 равных ячеек (в трехмерном случае, в двумерном – на 4 ячейки). Далее, если необходимо, ячейки делятся еще раз и так до достижения необходимой точности. Ячейки начальной сетки называются ячейками уровня 0, ячейки, получаемые измельчением уровня 0, называются ячейками уровня 1 и т.д. При генерации **АЛИС** накладывается условие, что гранями и ребрами могут ограничить друг с другом только ячейки с номерами уровней, отличающимися не более, чем на единицу.

Традиционно в системах моделирования движения жидкости используются неструктурированные сетки (для систем на базе конечно-элементных методов), либо структурированные мультиблоковые сетки (для конечно-объемных и конечно-разностных методов). Ячейки таких сеток вдали от границ расчетной области имеют постоянное количество соседних ячеек, соприкасающихся гранями. В отличие от этих сеток ячейки **АЛИС** имеют переменное количество соседей – в трехмерном случае по грани с ячейкой могут соседствовать либо одна, либо четыре соседа. Это обстоятельство затрудняет реализацию численных методов с использованием **АЛИС**.

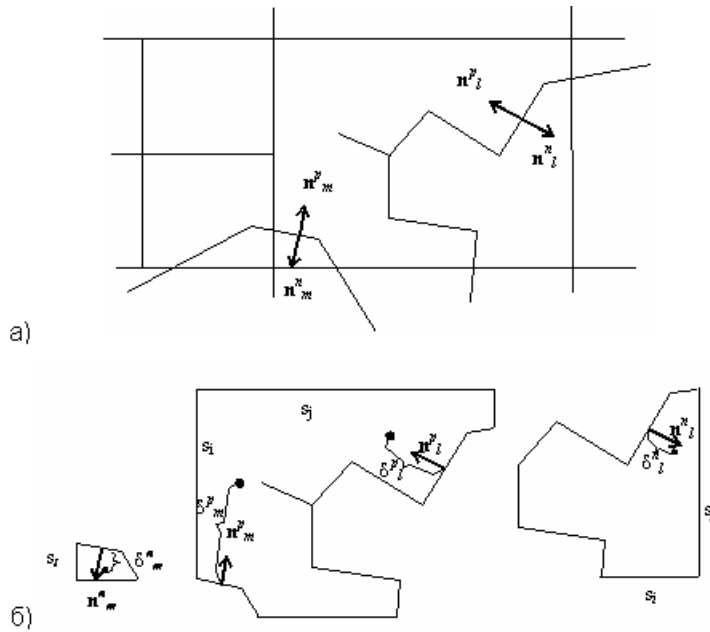
Однако **АЛИС** имеет значительные преимущества по сравнению с распространенными сетками. Во-первых, большая скорость генерации сетки. Во-вторых, **АЛИС** не предъявляет высоких требований к оперативной памяти компьютера по сравнению с неструктурированными сетками. Это обусловлено древовидной структурой **АЛИС**, при которой каждая ячейка связана с сеткой нулевого уровня, имеющей полную геометрическую информацию. В-третьих, при генерации **АЛИС** не появляются 'плохие ячейки', которые имеют слишком большие отношения площадей граней.

Обычно при использовании **АЛИС** геометрия объектов в расчетной области аппроксимируется первым порядком точности – "ступеньками". Повышение порядка разбиения сетки около поверхностей позволяет уменьшить вносимую такой аппроксимацией погрешность, но может потребовать слишком больших ресурсов компьютера, что не позволительно для САПР. Поэтому в настоящей работе предлагается новый подход описания произвольной криволинейной геометрии на прямоугольной методом подсеточного разрешения геометрии.

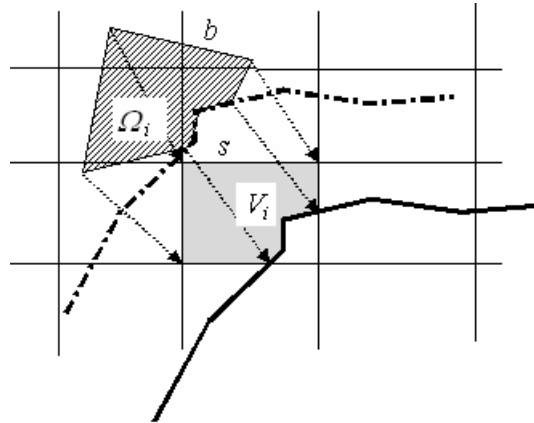
3.4.2 Метод подсеточного разрешения геометрии

Метод подсеточного разрешения геометрии направлен на преодоление барьера между САПР и системами моделирования движения жидкости. Будем считать, что из САПР поступает информация о поверхности объекта в виде набора плоских, выпуклых, непересекающихся фасеток. На обеих поверхностях фасеток ставятся граничные условия и указывается набор уравнений гидродинамики, которые необходимо решать по ту или иную сторону фасетки.

Пусть в расчетной области задана **АЛИС**. На первом этапе алгоритма определяются какие фасетки, формирующие геометрию расчетной области, попали в ячейки сетки). Часть фасеток, попавших внутрь ячеек, назовем осколками фасеток; часть граней ячеек, отсекаемую фасетками, назовем осколками граней. Затем ячейка сетки делится на конечные объемы V_i , ограниченные гранями ячеек (или осколками ячеек) и фасетками (или осколками фасеток). Если в ячейке нет фасеток, то конечный объем совпадает с ней. Конечный объем может быть ограничен только фасетками.



Подсеточное разрешение геометрии:
 а) выделение фасеток, пересекающих ячейки сетки;
 б) разъединение ячеек сетки на конечных объемы.



Перемещение i-го конечного объема вдоль характеристики.

Введем объем Ω_i , построенный на характеристиках, выходящих из вершин V_i в момент времени t_{n+1} и движущихся обратно во времени до момента t_n . Стороны b объема Ω_i строго соответствуют сторонам s объема V_i .

Проинтегрируем уравнения гидродинамики по времени на интервале t_n и по объему Ω , движущемуся вместе с жидкостью, $\Omega_i = \Omega(t_n)$, $V_i = \Omega(t_{n+1})$

$$V_i(f_i^{n+1} - f_i^n) + \sum_s F_s + \sum_g G_g + D = 0 \tag{1}$$

Здесь f_i^n – осредненное значение переменной (компонента скорости, концентрация, температура и т.д.) по объему в момент времени $t_{n+1} = t_n + \tau$,

$$f_i^{n+1} = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} f^{n+1} dV \tag{2}$$

Другие обозначения в (1):

D – осреднение неконвективного члена в уравнении переноса (например, объемный источник переменной f или член, описывающий диффузионный перенос) по движущемуся объему Ω и в течение τ ,

g – сторона конечного объема, образованная осколком j -той фасетки,

G_g – поток переменной f через g в течение τ . Поток G_i определяется граничным условием на фасетках, например, конечно-разностный аналог смешанного граничного условия выглядит следующим образом:

$$G_g = \int_{\tau} \int_g G_j(f) ds dt \approx \tau g \left(A_j + B_j \frac{(f_i^n - f_w)}{\delta} \right) \tag{3}$$

где $G_j(f)$ – поток f с j -той фасетки, заданный граничным условием, A_j и B_j – коэффициенты граничного

условия на j -той фасетке, d_g – половина характерного расстояния от осколка фасетки до соседних граней в направлении вектора нормали осколка.
 Описание первого члена в правой части уравнения (1), который определяет конвективный перенос переменной f , будет дано ниже.

3.4.3 Моделирование одномерного переноса

Прежде чем рассмотреть решение уравнений конвективного переноса в многомерном случае, построим численную схему расчета одномерного уравнения конвективного переноса скалярной величины f со скоростью $u(x)$.

Введем сетку с постоянным шагом в пространстве

$$x_{i+1/2} = ih, \quad i=0,1,\dots,N$$

где i -ый конечный объем ограничен сторонами с координатами $x_{i-1/2}$, $x_{i+1/2}$. Объем Ω_i , который соответствует объему V_i , ограничен сторонами с координатами $x_{i-1/2} - \delta_{i-1/2}$, $x_{i+1/2} - \delta_{i+1/2}$. Здесь $\delta_{i+1/2}$ есть длина обратной характеристики, выходящей из точки $x_{i+1/2}$ в момент времени t_{n+1} и идущая до момента времени t_n . Величина $\delta_{i+1/2}$ определяется уравнением

$$T = \int_{x_{i+1/2} - \delta_{i+1/2}}^{x_{i+1/2}} \frac{dx}{u(x)}$$

В первом приближении медленно меняющейся скорости вдоль оси x можно считать, что $\delta_{i+1/2} = u_{i+1/2} T$; уточнить длину характеристики можно методом предиктор-корректор.

Одномерное уравнение чисто конвективного переноса в форме Лагранжа имеет вид

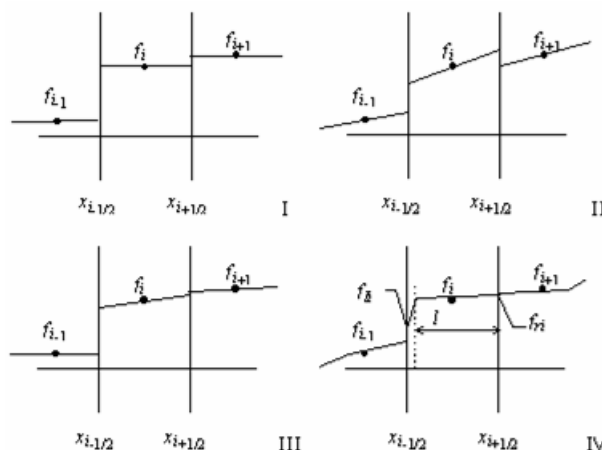
$$f_i^{n+1} = \int_{x_{i-1/2} - \delta_{i-1/2}}^{x_{i+1/2} - \delta_{i+1/2}} f(x, t^n) dx$$

Из уравнения следует, что проблема решения уравнения конвективного переноса трансформируется в задачу реконструкции функции $f(x,t)$ внутри конечного объема по ее средним значениям. Качество реконструкции определяет поведение схемы: монотонная реконструкция даст монотонную схему, высокая точность реконструкции даст низкий уровень схемной диффузии.

Схемы, созданные с использованием представления Лагранжа устойчивы для любых шагов интегрирования по времени (любых чисел Куранта $CFL = \delta_{i+1/2}/h$). Точность интегрирования по времени определяется точностью вычисления длины обратной характеристики.

Рассмотрим различные реконструкции $f(x,t)$ внутри конечного объема из класса линейных кусочно-непрерывных, показанные на рисунке. Реконструкция I кусочно-постоянной функцией приводит к хорошо известной схеме против потока первого порядка аппроксимации. При реконструкции II вводится наклон функции $f(x)$ внутри V_i , который вычисляется с помощью симметричной конечной разности. Эта реконструкция имеет второй порядок аппроксимации, но не является монотонной.

Монотонная реконструкция III получается при вычислении наклона $f(x)$ внутри V_i как минимального из наклонов, вычисляемых по конечным разностям на обеих сторонах конечного объема.



Типы линейной реконструкции $f(x)$:

I	$f(x) = f_i$
II	$f(x) = f_i + 0.5(f_{i+1} - f_{i-1}) \frac{(x_i - x)}{h}$

III	$f(x) = f_i + f_{xi} \frac{(x_i - x)}{h}$ <p>где $f_{xi} = \min(f_{i+1} - f_i, f_i - f_{i-1})$ при $(f_{i+1} - f_{i-1}) > 0$ где $f_{xi} = \max(f_{i+1} - f_i, f_i - f_{i-1})$ при $(f_{i+1} - f_{i-1}) < 0$</p>
IV	линейная реконструкция с дополнительной точкой

В FlowVision используется более сложная линейная реконструкция с дополнительной точкой (реконструкция IV). Она имеет вид:

$$f(x) = \begin{cases} f_{in} + f_{xin}(x_{i+1/2} - x), & x \geq x_{i+1/2} - l \\ f_{il} + f_{xli}(x - x_{i-1/2}), & x \leq x_{i+1/2} - l \end{cases}$$

где l – расстояние от стороны $x_{i+1/2}$ до дополнительной точки, f_{in}, f_{il} — величины реконструируемой функции на левой и правой границах конечного объема. Значения f_{in} и f_{il} определяются из разложения функции в ряд Тейлора:

$$f(x) = f(x_{i+1/2}) + f'_x \Delta x + \frac{1}{2} f''_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{3!} f'''_{xxx} \Delta x^3 + O(\Delta x^4), \Delta x = x - x_{i+1/2}$$

коэффициенты которого находятся с использованием определений осредненного значения функции i -го конечного объема и его ближайших соседей $-i-1$ и $i+1$. Таким образом имеем:

$$f_{in} = \frac{1}{2}(f_{i+1} + f_i) - \frac{1}{6}(f_{i+1} - 2f_i + 2f_{i-1})$$

$$f_{il} = \frac{1}{2}(f_i + f_{i-1}) - \frac{1}{6}(f_{i+1} - 2f_i + 2f_{i-1})$$

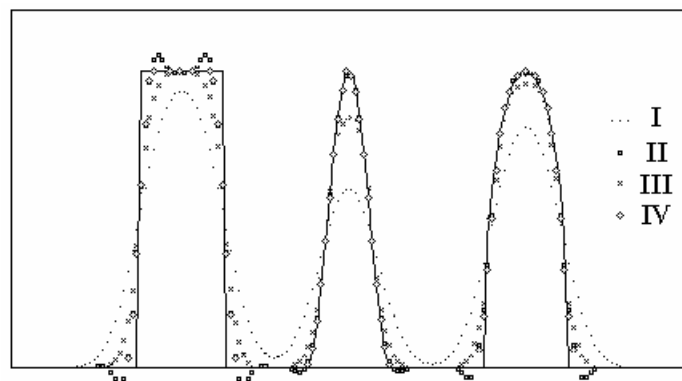
Чтобы добиться монотонности реконструкции, величины f_{in}, f_{il} ограничиваются средними значениями соседних конечных объемов:

$$\begin{cases} f_i \leq f_{in} \leq f_{i+1}, & \text{когда } f_{i+1} - f_i \geq 0 \\ f_i > f_{in} > f_{i+1}, & \text{когда } f_{i+1} - f_i < 0 \end{cases}, \begin{cases} f_{i-1} \leq f_{il} \leq f_i, & \text{когда } f_i - f_{i-1} \geq 0 \\ f_{i-1} > f_{il} > f_i, & \text{когда } f_i - f_{i-1} < 0 \end{cases}$$

Расстояние l и производные f_{xin}, f_{xli} на левой и правой сторонах V_i равны:

$$l = \frac{f_i - f_{il}}{f_{in} - f_{il}}, \quad f_{xin} = \frac{f_{in} - f_i}{l}, \quad f_{xli} = \frac{f_i - f_{il}}{1-l}$$

Для проверки реальной точности рассмотрим решение тестовой задачи Леонарда [Leonard B.P., *The ULTIMATE Conservative Difference Scheme Applied to Unsteady One-Dimensional Advection*, 17-74, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 88, 1991]. Этот тест состоит из расчета одномерного движения с постоянной скоростью трех профилей – ступенька, половина периода квадрата синуса и полуэллипс. На рисунке показано сравнение численных решений на основе реконструкций I-IV с точным решением. Результаты показаны на 120-м шаге по времени при расчете с CFL = 0.5.



Расчет движения трех тестовых профилей схемами I-IV (CFL=0.5, n=120).

Схемы I и III монотонны, но имеют неприемлемо большую схемную диффузию, схема II, созданная из немонотонной реконструкции, имеет осциллирующее решение. Наиболее точной является схема с реконструкцией IV, которая наряду с малой схемной диффузией обладает свойством монотонности.

3.4.4 Моделирование трехмерного переноса

Вернемся к уравнению (1) раздела [Метод подсеточного разрешения геометрии](#) трехмерного конвективно-диффузионного переноса скалярной величины. Расцепим уравнение на два следующим образом:

$$(1) \quad \hat{f}_i = \frac{1}{V_i} \int_{\Omega_i} f^n dV$$

$$(2) \quad f^{n+1} = \hat{f}_i - \frac{1}{V_i} \left(\sum_g G_g (f^{n+1}) + D(f^{n+1}) \right)$$

Уравнение (1) описывает конвективный перенос величины f , оно устойчиво для любых шагов по времени. Уравнение (2) описывает диффузионные процессы (член с D) и граничные условия (член с G_g). Для избавления в (2) от зависимости от уравнение записано в неявной форме.

Трехмерная функция $f(\mathbf{x})$ в (1) реконструируется с помощью суперпозиции трех функций $f^{n,k}(x_k)$, каждая из которых представляет собой одномерную реконструкцию вдоль оси x_k декартовой системы координат

$$(3) \quad f_i(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^3 f^k(x_k) - 2f_i^n$$

Первоначально решается явное уравнение (1) для промежуточной переменной f^n . Затем одним из стандартных методов, например, методом верхней релаксации, решается неявное уравнение (2) для f^{n+1} .

3.4.5 Неявный алгоритм расщепления по физическим переменным

Рассмотрим численное интегрирование уравнений Навье-Стокса. Запишем уравнения для движущегося объема Ω

$$(1) \quad \int_V \rho dV = \int_{\Omega_i} \rho dV$$

$$\int_V \rho \mathbf{V} dV - \int_{\Omega_i} \rho \mathbf{V} dV = - \int_{\tau} \int_S \mathbf{P} d\mathbf{S} dt + \mathbf{D}$$

Здесь S – поверхность объема Ω , \mathbf{V} – поле скорости жидкости, P – давление, ρ – плотность; через \mathbf{D} обозначены члены в уравнении Навье-Стокса, описывающие вязкостные напряжения, силу тяжести и т.п. Для замыкания системы уравнений необходимы дополнительные уравнения, описывающие изменение плотности и турбулентный перенос. Вид этих уравнений зависит от физической постановки задачи и здесь не рассматривается.

Запишем разностный аналог уравнений Навье-Стокса

$$V_i^{n+1} V_i \rho^{n+1} - \int_{\Omega_i} \rho^n \mathbf{V}^n dV = -\tau \sum_s P_s^{n+1} \mathbf{s} + \mathbf{D}_i(\mathbf{V})$$

Неизвестными в этом уравнении являются \mathbf{V}^{n+1} и P^{n+1} . Добавим и вычтем дополнительные члены в (1) следующим образом

$$(V_i^{n+1} + \nabla - \nabla) V_i \rho^{n+1} - \int_{\Omega_i} \rho^n \mathbf{V}^n dV = -\tau \left(\sum_s P_s^{n+1} \mathbf{s} - \sum_b P_b^n \mathbf{b} + \sum_b P_b^n \mathbf{b} \right) + \mathbf{D}_i(\mathbf{V})$$

Это уравнение расщепляется на два

$$(2) \quad \nabla V_i \rho^{n+1} - \int_{\Omega_i} \rho^n \mathbf{V}^n dV = -\sum_b P_b^n \mathbf{b} + \mathbf{D}_i(\nabla)$$

$$(3) \quad (V_i^{n+1} - \nabla) V_i \rho^{n+1} = -\sum_s P_s^{n+1} \mathbf{s} + \sum_b P_b^n \mathbf{b}$$

Видно, что уравнение (2) опять является дискретным аналогом уравнений Навье-Стокса, но, в отличие от исходного аналога (1), в (2) используется поле давления, взятое на предыдущем шаге по времени. Векторное уравнение (2) представляет собой три уравнения конвективно-диффузионного переноса для трех компонент скорости жидкости. Эти уравнения решаются методом, изложенным в предыдущем разделе. Для этого (2) расщепляется следующим образом

$$(4) \quad \hat{V}_i = \frac{1}{V_i \rho^{n+1}} \left(\int_{\Omega_i} \mathbf{V}^n dV - \tau \sum_b P_b^n \mathbf{b} \right)$$

$$(5) \quad \nabla_i = \hat{V}_i + \frac{1}{V_i} \mathbf{D}_i(\nabla)$$

Чтобы определить поле давления, рассмотрим условие несжимаемости жидкости, из которого следует

$$(6) \quad \sum_s V_s^{n+1} \mathbf{s} = 0$$

где V_s^{n+1} – значение скорости на границах конечного объема V_i . Чтобы получить выражение для V_s^{n+1} запишем аналог уравнения (3), полученного интегрированием уравнений Навье-Стокса по движущейся грани объема Ω . Для грани этого объема, которая совпадает с гранью b при $t=t_n$ и с s при $t=t_{n+1}$ выражение для V_s^{n+1} имеет вид

$$V_s^{n+1} = \bar{V}_s + \frac{T}{\rho_b^{n+1}} (\nabla P^{n+1})|_b - \frac{T}{\rho_s^{n+1}} (\nabla P^{n+1})|_s \tag{7}$$

Подставляя V_s^{n+1} в (6), получим уравнение для определения давления

$$\sum_s \frac{T}{\rho_s^{n+1}} (\nabla P^{n+1})|_s = \sum_s \bar{V}_s s + \sum_b \frac{T}{\rho_b^{n+1}} (\nabla P^n)|_b b \tag{8}$$

Во втором члене в правой части уравнения (8) производится суммирование по граням b объема Ω_i , а не по граням s объема V_i , поскольку P^n определен для объема Ω_i . Значение $\rho_b^{n+1} = \rho_s^{n+1}$ для соответствующих друг другу граней b и s .

После нахождения поля давления P^{n+1} из (3) вычисляется поле скорости V_s^{n+1} .

Хорошо известно, что при решении уравнений движения несжимаемой жидкости на неразнесенных сетках возникают осцилляции поля давления [Patankar S., Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980]. В FlowVision эта трудность преодолевается введением в уравнение для давления (7) разности между представлением градиента давления вторым и четвертым порядком точности согласно работе [Armfield S.W., Finite Difference Solutions of the Navier-Stokes Equations on Staggered and Non-Staggered Grids, 1-17, Computers Fluids, 20, N 1, 1991].

3.4.6 Общий вид уравнений

Рассмотрим общий вид уравнений диффузионного типа:

$$\frac{\partial}{\partial t} (TC \cdot f) = \frac{1}{PC} \nabla (DC \cdot \nabla f) + SST \tag{1}$$

и конвективно-диффузионного типа:

$$\frac{\partial}{\partial t} (TC \cdot f) + \nabla (CC \cdot Vf) = \frac{1}{PC} \nabla (DC \cdot \nabla f) + SST \tag{2}$$

где t – время, ∇ – оператор градиента, V – вектор скорости.

Величины **TC** (**TimeCoefficient**), **CC** (**ConvectiveCoefficient**), **PC** (**PrediffusionCoefficient**), и **DC** (**DiffusionCoefficient**) определяют коэффициенты уравнения при соответствующих производных, **SST** (**ScalarSourceTerm**) задает источниковый член.

3.4.7 Разностная схема

Решение (интегрирование) уравнений (1) и (2) раздела [Общий вид уравнений](#) на отрезке времени $[t^{n+1}, t^n]$ осуществляется с использованием следующей аппроксимации уравнений:

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} = \frac{1}{PC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST \tag{1}$$

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} + (1 - \sigma) \nabla^{(k,s)} (CC \cdot Vf^n) + \sigma \nabla^{(k,s)} (CC \cdot Vf^{n+1}) = \frac{1}{PC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST \tag{2}$$

где:

$$\tau = t^{n+1} - t^n;$$

$\sigma=0$ – соответствует **явной схеме**;

$\sigma=1$ – соответствует **неявной схеме**;

$\nabla^{(k,s)}$ – разностная аппроксимация конвективного оператора:

- k – определяет вид реконструкции функции:
 - схема 1-го порядка точности;
 - схема 2-го порядка точности;
- s – определяет "скошенность" схемы:
 - учитывает перенос через ребра и вершины ячейки;
 - не учитывается перенос через ребра и вершины ячейки;

$\nabla_h (DC \cdot \nabla_h f)$ – разностная аппроксимация диффузионного оператора.

3.4.7.1 Совместное решение

В уравнении конвективно-диффузионного переноса (см. [аппроксимацию ур-ия \(2\)](#)) скорости \mathbf{V} берутся с предыдущего временного шага t_n . На ряде задач это может приводить к нефизическим осцилляциям. Чтобы избежать этого, можно использовать опцию "Совместное решение". В этом случае на каждой внутренней итерации скорости \mathbf{V} будут подправляться.

3.4.7.2 Предиктор-Корректор

Предиктор-Корректор предназначен для увеличения точности расчета уравнений Навье-Стокса при ускоренном движении тел в расчетной области. Им стоит пользоваться при расчете движения тел, для которых включено движение под действием гидродинамических сил.

Расчетная схема метода Предиктор-корректор следующая:

Делается расчет скоростей и давления за шаг по времени τ , так, чтобы получить $\tilde{\mathbf{V}}^{n+1}$ и \tilde{P}^{n+1} . Расчет проводится методом расщепления по физическим переменным.

Находится приближенная скорость на шаге по времени $\tau/2$:

$$\mathbf{V}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{(\mathbf{V}^n + \tilde{\mathbf{V}}^{n+1})}{2}$$

Далее решается уравнение Навье-Стокса еще раз, но для шага по времени $\tau/2$, чтобы найти окончательные скорости и давления \mathbf{V}^{n+1} , P^{n+1} .

$$\frac{\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{V}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau/2} + \nabla(\mathbf{V}^{n+\frac{1}{2}} \otimes \tilde{\mathbf{V}}) = -\frac{\nabla \tilde{P}^{n+1}}{\rho} + D(\tilde{\mathbf{V}})$$

Решение этого уравнения проводится методом расщепления

$$\frac{\mathbf{V}^{n+1} - \tilde{\mathbf{V}}}{\tau/2} = -\frac{\nabla P^{n+1}}{\rho} + \frac{\nabla \tilde{P}^{n+1}}{\rho}$$

где $D(\tilde{\mathbf{V}})$ – вязкостный член уравнений Навье-Стокса.

3.4.8 Методы решения системы алгебраических уравнений

Дискретизация уравнений (1) и (2) раздела [Разностная схема](#) приводит к системе линейных алгебраических уравнений

$$(1) \quad A\mathbf{x} = \mathbf{b}$$

в которой оператор A является:

- **самосопряженным** оператором для уравнений (1) раздела [Разностная схема](#)
- (2) $A = A^*$
- **несамосопряженным** оператором для уравнений (2) раздела [Разностная схема](#)
- (3) $A \neq A^*$

По умолчанию для решения системы (1) используются:

- метод **IC-CG** (Incomplete Cholesky Conjugate Gradients) для оператора (2)
- метод **LU-Lanczos** (LU preconditioned Lanczos algorithm) или метод **SOR** (Successive Over-Relaxation) для оператора (3) (см. таблицу).

В случае использование опции BsSolver (см. том [Руководство пользователя](#)) для решения системы (1) используются:

- метод **IC2-CG** (Second Order Incomplete Cholesky preconditioned Conjugate Gradient algorithm) для оператора (2).
- метод **ILU2-Lanczos** (Second Order Incomplete LU preconditioned Lanczos algorithm) для оператора (3).

Методы **IC2** и **ILU2** отличаются от методов **IC** и **LU** способом построения предобуславливателей.

Описание указанных итерационных методов и алгоритмов построения предобуславливателей – см. [Хейгеман Л., Янг Д. *Прикладные итерационные методы: Пер. с англ.* – М.: Мир, 1986].

Во всех итерационных методах используется следующий критерий окончания итераций:

Пусть на s -ой итерации $\mathbf{x}(s)$ – приближенное решение системы (1). Итерационный процесс заканчивается при выполнении одного из условий

$$(4) \quad \|\mathbf{b} - A\mathbf{x}(s)\| < \varepsilon$$

$$(5) \quad s \geq N_{\max}$$

где ε – заданная точность, N_{\max} – максимальное число итераций. ε и N_{\max} задаются в **Параметрах метода** (см. том [Руководство пользователя](#)).

Итерационные методы, используемые по умолчанию:

Уравнение	Метод	Модель
Давление	IC-CG	Все, кроме Полностью сжимаемой жидкости
	LU_Lanczos	Полностью сжимаемая жидкость
Скорость	SOR	все
Турбулентная энергия	SOR	все
Турбулентная диссипация	SOR	все

Для всех остальных уравнений по умолчанию установлен метод **LU-Lanczos**.

3.4.8.1 Условие устойчивости алгоритма

При использовании явной схемы ([уравнение \(2\) раздела Разностная схема](#)) ($\sigma=0$) Пусть τ_k – минимальное пролётное время ячейки которое определяется как минимум отношения характерного размера ячейки к модулю скорости в ячейке по всем ячейкам данной подобласти. Тогда условие устойчивости разностной схемы (условие Куранта-Фридрихса-Леви) можно сформулировать так: проводить расчеты по явной схеме можно лишь при шагах τ , удовлетворяющих условию

$$CFL = \frac{\tau}{\tau_k} \leq 1$$

(1)

Схема ([1\) раздела Разностная схема](#)) и неявная схема ([2\) раздела Разностная схема](#)) ($\sigma=1$) являются абсолютно устойчивыми.

3.4.8.2 Выбор шага интегрирования по времени

Выбор шага по времени осуществляется по одному из условий:

$$(1) \quad \tau = \min(CFL \cdot \tau_k, \tau_{max})$$

$$(2) \quad \tau = \tau_{own}$$

где

CFL – константа, определяемая пользователем;

τ_{max} – максимальный шаг по времени;

τ_{own} – заданный пользователем шаг по времени.

3.5 Список переменных

В этом разделе приведен список всех стандартных переменных, доступных в Постпроцессоре. Кроме того пользователь имеет возможность создавать свои переменные с помощью Калькулятора (см. том [Руководство пользователя](#)).

3.5.1 Скалярные переменные

Alpha – Коэффициент избытка окислителя.

CO2_Восстановленный – Восстановленная массовая концентрация CO_2 (консервативный скаляр).

CO2_Истинный – Истинная массовая концентрация CO_2 .

Gamma – Относительные пульсации концентрации.

H2O_Восстановленный – Восстановленная массовая концентрация H_2O (консервативный скаляр).

H2O_Истинный – Истинная массовая концентрация H_2O .

N2_Истинный – Истинная массовая концентрация N_2 .

NOx – Концентрация оксидов азота (NO), ppm.

O2_Восстановленный – Восстановленная массовая концентрация O_2 (консервативный скаляр).

O2_Истинный – Истинная массовая концентрация O_2 .

x – x-координата модели.

X-ВязкиеНапряжения – x-компонента вязкого напряжения.

xАбсСкорость – x-компонента вектора абсолютной скорости.

xОтнСкорость – x-компонента вектора относительной скорости.

xСкорость – x-компонента вектора скорости. В абсолютной системе координат совпадает с абсолютной скоростью, в относительной – с относительной скоростью. **Y-ВязкиеНапряжения** – y-компонента вязкого напряжения.

y – y-координата модели.

yАбсСкорость – y-компонента вектора абсолютной скорости.

Yплюс – Безразмерное расстояние до стенки. Вычисляется только когда решаются уравнения для турбулентности.

yОтнСкорость – y-компонента вектора относительной скорости.

yСкорость – y-компонента вектора скорости. В абсолютной системе координат совпадает с абсолютной скоростью, в относительной – с относительной скоростью.

Y-ВязкиеНапряжения – z-компонента вязкого напряжения.

z – z-координата модели.

zАбсСкорость – z-компонента вектора абсолютной скорости.

zОтнСкорость – z-компонента вектора относительной скорости.

zСкорость – z-компонента вектора скорости. В абсолютной системе координат совпадает с абсолютной скоростью, в относительной – с относительной скоростью.

Z-ВязкиеНапряжения – z-компонента вязкого напряжения.

Время – Время.

Давление – Относительное давление за вычетом гидростатического давления.

ДавлениеСГСТ – Относительное давление с учетом гидростатики.

ДымовыеГазы – Концентрация дымовых газов.

Горючее – Концентрация топлива.

Интенсивность Горения – Скорость горения.

Испущенный поток – Испущенный поток.

ИстМассыЧастиц – Распределенный источник массы за счёт частиц.

ИсточникNOx – Табулированные значения скорости образования NO.

Источник летучих, частицы [кг м-3 с-1] – Объемный источник массы летучих за счёт частиц.

Источник O2, частицы [кг м-3 с-1] – Объемный источник массы O_2 за счёт частиц.

Источник CO2, частицы [кг м-3 с-1] – Объемный источник массы CO_2 за счёт частиц.

Источник H2O, частицы [кг м-3 с-1] – Объемный источник массы H_2O за счёт частиц.

ИстЭнтальпииЧастиц – Распределенный источник энтальпии за счёт частиц.

Концентрация – Массовая или объемная концентрация **Вещества1**. Выбор массовой или объемной концентрации осуществляется в **Параметрах модели**. При этом **Концентрация** должна быть отмечена в окне **Изменить Модель**. По умолчанию установлена массовая концентрация.

КонцентрацияЧастиц, кг/м3 – Суммарная концентрация частиц (всех размеров).

Летучие_Восстановленные – Восстановленная массовая концентрация летучих (консервативный скаляр).

- Летучие_Истинные** – Истинная массовая концентрация летучих.
- Маркер** – Концентрация маркера.
- МодСкорости** – Модуль вектора скорости.
- МодАбсСкорости** – Модуль вектора абсолютной скорости.
- МодВязких Напряжений** – Модуль касательное напряжение.
- МодОтнСкорости** – Модуль вектора относительной скорости.
- НейтральныйГаз** – Концентрация нейтрального газа.
- ОбъемЯчейки** – Объем ячейки.
- Окислитель** – Концентрация окислителя.
- ОсвАбсСкорость** – Осевая скорость в абсолютной системе координат. Для вычисления этой переменной должно быть задано вращение в каждой интересующей подобласти.
- ОсвОтнСкорость** – Осевая скорость в относительной системе координат. Для вычисления этой переменной должно быть задано вращение в каждой интересующей подобласти.
- ОтнОбъемЖидкВ Ячейке** – Степень заполнения жидкостью ячейки ("Volume of Fluid"). 0 – пустая ячейка; 1 – полностью заполненная ячейка.
- Плотность** – Плотность.
- Плотность энергии излучения** – Плотность энергии излучения.
- ПоглощенныйПоток** – Поглощенный поток.
- Полная Температура** – Полная температура.
- Полное Давление** – Полное давление.
- ПотокТепла** – Поток тепла за счёт теплопроводности. \dot{q} та переменная определена только на стенке, т.е. она имеет смысл только для слоев, построенных на супергруппе.
- ПробегФотона** – Безразмерная длина свободного пробега фотона, измеряемая в долях величины $3.6V/A$, где V – объём расчётной области, A – площадь её границы.
- Продукты Полного Сгорания** – Концентрация продуктов сгорания.
- Пульсация** – Пульсации концентрации.
- РадАбсСкорость** – Радиальная скорость в абсолютной системе координат. Для вычисления этой переменной должно быть задано вращение в каждой интересующей подобласти.
- РадОтнСкорость** – Радиальная скорость в относительной системе координат. Для вычисления этой переменной должно быть задано вращение в каждой интересующей подобласти.
- ТемператураЧастиц** – Средняя температура частиц.
- Температура** – Температура.
- ТемператураИС** – Температура исходного состава смеси (см. [уравнение \(4\)](#) в **Базовых понятиях Модели горения**).
- Теплопроводность** – $\bar{\mu}$ фффективная теплопроводность: $\lambda_{\text{eff}} = \lambda + \lambda_t$,
где λ – молекулярная теплопроводность, $\lambda_t = \mu_t C_p / Pr_t$ – турбулентная теплопроводность, C_p – удельная теплоемкость, μ_t – турбулентная теплопроводность, Pr_t – турбулентное число Прандтля.
- ТурбДиссипация** – Скорость диссипации турбулентной энергии.
- ТурбЭнергия** – Турбулентная энергия.
- ТурбВязкость** – Турбулентная вязкость.
- ТипЯчейки** – Тип ячейки. Только для [модели со свободной поверхностью](#): 0 для $0 < VoF < 1$; 1 для $VoF = 1$; -1 для $VoF = 0$.
- ТнгАбсСкорость** – Тангенциальная скорость в абсолютной системе координат. Для вычисления этой переменной должно быть задано вращение в каждой интересующей подобласти.
- ТнгОтнСкорость** – Тангенциальная скорость в относительной системе координат. Для вычисления этой переменной должно быть задано вращение в каждой интересующей подобласти.
- Чернота** – Степень черноты.
- ЧислоМаха** – Число Маха.
- ЧислоМахаАбс** – Число Маха в абсолютной системе координат.
- Энтальпия** – \bar{h} нтальпия.
- Энтропия** – \bar{s} нтропия.

3.5.2 Векторные переменные

- АбсСкорость** – Вектор абсолютной скорости
- ВязкиеНапряжения** – Вектор вязких напряжений
- Координата** – Радиус-вектор
- Сила на частицы** – Средняя сила, с которой несущая фаза действует на частицы
- Скорость частиц** – Средняя скорость частиц
- Скорость** – Вектор скорости

Предметный указатель

2

2-фазное 235

A

ABAQUS 13, 49, 61

ANSYS 13, 49, 61

Autocad Mechanical Desktop 10

B

batch 97

BsSolver 68, 276

C

Catia 10

CFL 68, 105, 277

CO2_Восстановленный 248

D

DEFORM 13

G

GRAD 118

H

H2O_Восстановленный 248

I

IC2-CG 276

IC-CG 276

IF 118

IGES 13

ILU2-Lanczos 276

K

k-е модель

– низкорейнольдсовая 215

– с учетом обратного градиента давления 215

– стандартная 215

L

LU-Lanczos 276

L-Сопряжение 204

M

MAX 118

MIN 118

N

NASTRAN 13, 49, 61

NOx 233

O

O2_Восстановленный 248

OpenGL 112

P

PARASOLID 13

ProEngineer 10

S

SolidWorks 10

SOR 276

STL 13

T

T-Flex 10

U

Unigraphics 10

V

VDAFS 13

VOF 22, 228

VRML 13

A

адаптация 71

адаптировать до 73

алгоритм

– расщепления по физическим переменным 274

АЛИС 32, 270

анимация 121

Б

база данных 68, 232

– редактировать 89

В

Вектор массовой скорости 219

Вектор скорости 210

Вектор скорости с давлением 224, 225

вектора 155

вещество

– частиц 254

вид 124

видимый объем

– увеличить 126

Виды 39, 115, 116

влага 235

вливание 256, 258, 259, 260

внешнее обтекание 13

внутреннее течение 13

Вращающаяся стенка 70, 209

– логарифмический закон 216

все пространство 132

вспышки 162

вставить

– геометрию 64

вход

– двухфазный 263, 264

– жидкий 263, 264

выбрать другую сторону 56

выбрать следующую 56

Г

газ, дымовой 229

- газ, нейтральный 229
- геометрия 14
 - в перспективе или нет 52
 - в пропорциях или нет 52
 - границы групп 52
 - изменить 94
 - каркасное 52
 - каркасное с невидимыми линиями 52
 - непрозрачные фасетки 52
 - односторонне-прозрачные фасетки 52
 - перегруппировать 96
- гидродинамика
 - вычислительная (ВГД) 12
- горение 22, 182, 229, 235
- горючее 229
- граница воспламенения 232
- граничное условие 22, 73
 - L-сопряжение 26
 - вектор массовой скорости 25
 - вектор скорости 25
 - вектор скорости с давлением 25
 - вращающаяся стенка 24
 - вращающаяся стенка логарифмический закон 24
 - вход/выход 23, 25
 - давление 26
 - давление на входе 25
 - давление нет втока 26
 - диффузионный поток 24
 - закрутка массовой скорости 25
 - закрутка скорости 25
 - закрутка скорости с расширением 25
 - значение на стенке 24, 25, 26
 - норм. массовая скорость 25
 - нормальная скорость 25
 - нормальная скорость с давлением 25
 - нулевое давление/выход 26
 - нулевой поток 24, 25, 26
 - период 28
 - периодическое с перепадом 28
 - периодическое с перепадом давления 28
 - периодичное 28
 - поток 24
 - поток с сопротивлением 24
 - расстановка 75
 - свободная граница 26
 - свободный выход 23, 26
 - связать 26, 28, 29
 - симметрия 23, 26
 - скользящая поверхность 29
 - сопротивление 26
 - сопряженное 26
 - стенка 23, 24
 - стенка логарифмический закон 24
 - стенка с проскальзыванием 24, 26
 - тангенциальная закрутка 24
 - тангенциальная закрутка логарифмический закон 24
 - кривая для анализа 144
 - сглаживание 144
 - сдвиг внутрь подобласти 144
- график вдоль окружности
 - сглаживание 146
- группа частиц 163
- Д**
 - давление 210
 - абсолютное 205
 - гидростатическое 205
 - насыщения 223
 - опорное 205
 - полное 205
 - с учетом гидростатики 205
 - Давление на входе 219
 - Давление, нет втока 212
 - Давление/выход 212
 - движение
 - вращательное 70
 - поступательное 70
 - двумерный график
 - сглаживание 142
 - двухфазное течение 182, 228
 - Диффузионный поток 202
 - длина пробега фотона 253
 - дозвуковое 229
- Ж**
 - жидкость
 - ламинарная 182, 204
 - несжимаемая 182, 214
 - полностью сжимаемая 182, 222
 - слабосжимаемая 182, 217, 220
- З**
 - загрузить перемещения узлов 61
 - закон
 - Аррениуса 244
 - Ламберта 248
 - закон, Аррениуса 230, 231
 - Закрутка массовой скорости 219
 - Закрутка скорости 210
 - заливка 158
 - захват 122, 169
 - Значение на стенке 202
 - зола 235, 236
- И**
 - излучение 251
 - в объеме 182, 248, 250
 - диффузионная модель 248, 250, 252
 - модель объёмного высвечивания 248, 250, 253
 - модель осреднённой лучистой энергии 248, 250, 252

излучение 251
– ПП 182, 248
изолинии 157
изоповерхность
– непрозрачная 161
– прозрачная 161
индекс ячейки 140
интенсивность горения 229
инфо 114
источник NO 233

К

кавитация 218
калькулятор 118
кипение 223
кокс 235, 241, 242
конденсация 222, 223
константа, излучения 233
контекстные меню 55
координатная система 137
коэффициент
– поглощения 250, 251
– преломления 251, 253
– рассеяния 250, 251
коэффициент, избытка окислителя 231
коэффициент, коррекции температуры 233
коэффициент, стехиометрический 233
коэффициенты
– взаимооблучения 249
кристаллизация 205, 215

Л

летучие 235, 236, 244
Летучие_Восстановленные 248
Летучие_Истинные 248
локальное измельчение сетки 32

М

маленькие ячейки 140
– убирать 106
маска ячеек 64, 104
Массовая скорость 219
массоперенос
– несмешиваемых компонент 205, 215
– смешиваемых компонент 205, 215, 218, 223
Маха
– число 20
метод
– неявный 38
– явный 38
модель
– горения 22
– зазора 182, 266
– заморозить 17
– изменить 17, 65

– ламинарная 20
– Магнуссена 245
– математическая 17
– несжимаемая 20
– параметры 17
– сжимаемая 21
– слабосжимаемая 21, 22
– со свободной поверхностью 22
– твердое тело 19
– турбулентная 20, 21
модель горения
– Зельдовича 244
– кинетическая 242, 244
– пульсационная 245
– турбулентная 245
– эмпирическая 242
модель горения, Зельдовича 231
модель горения, кинетическая 231
модель горения, пульсационная 232
модель горения, турбулентная 232

Н

набор ячеек 140
начальная сетка 33
– загрузить из файла 101
– сохранить в файл 101
начальные значения 67
невязка 109
несущая фаза 256, 258, 259, 260
Нормальная скорость 210
Нормальная скорость с давлением 224, 225
Нулевое давление/выход 212
Нулевой поток 202

О

область расчета 13
общие параметры 64
объект 115
– на виду 128
– рассечь 128
– создать 127
Объекты 39
окислитель 229
оксиды азота 233
опорные величины 17
опорные значения 67
открыть 49
отладка ячеек 140
отражение 263, 264
отрисовка сценария 169
отсечение 129
отскок 256, 258, 259, 260
ошибки 173
– фатальные 171

П

пакетная обработка 97
 панели инструментов 51
 – виды 54
 – геометрия 52
 – захват 55
 – инфо 53
 – расчет 54
 – режимы 53
 параметр
 – релаксационный 253
 параметры
 – время 105
 – гравитация 104
 – метода 66, 68
 – модели 67
 – настройка 106
 – общие 103
 – старт 104
 – физические 66
 – шаги 105
 переменные 19, 39, 118
 перенос
 – одномерный 272
 – трехмерный 274
 Периодическое с перепадом 203
 Периодическое с перепадом давления 213
 Периодичное 203, 213
 пиролиз 241, 242
 плавление 205, 215
 пленка 256, 258, 259, 260, 263, 264
 подсеточное разрешение геометрии 33, 270
 помощь 48
 помощь по темам 48
 пористая среда 182, 220
 порядок точности 275
 постоянная
 – Стефана-Больцмана 249
 постпроцессор 39, 112, 114, 115
 – графическое окно 113
 – дерево 113
 – панели инструментов 114
 Поток 202
 Поток с сопротивлением 202
 предупреждения 174
 предустановки 58
 – общие 58
 предустановки постпроцессора
 – NURBS кач-во 60
 – затемнение тел 60
 – палитра по умолчанию 60
 – применять свет к заливкам 60
 предустановки препроцессора
 – границы других групп 59

– допуск 59
 – каркасные другие группы 59
 – показать Все 59
 – показывать выбранную 59
 – текстурированная выбранная 59
 – цвет выбр. групп 59

прилипание 256, 258, 259, 260
 проводник 49
 продукты полного сгорания 229
 проекция 125
 пропорциональность 126
 пульсации
 – концентрации 190
 пульсаций
 – концентрации 219
 – температуры 219

Р

радиационный поток с поверхности 251
 разбрызгивание 256, 258, 259, 260
 распределенные характеристики 147
 расчетная сетка 138
 редактор палитры 166
 Рейнольдса
 – число 20

С

свет
 – встречный 123
 – источники 123
 – рассеянный 123
 – солнечный 123
 – точечный 123
 Свободная граница 212, 224, 225
 свободная поверхность 22
 свойства 57
 – вещества 68
 связать гр.условия 98
 Симметрия 203
 система координат
 – абсолютная 70
 – относительная 70
 скорость, брутто-реакции 230
 скошенная схема 38
 слои 120
 – Координатная система 39
 – Создать слой... 39
 – Твердые тела 39
 слой 115, 132
 – записывать данные в файл 135
 – рассечь 134
 – создать 133
 смола 235
 создать 48, 61
 сопротивление 204

- сопротивление 204
 - щели 268
- сохранить
 - как... 49
 - нагрузки в узлах 49
 - нагрузки на фасетках 49
 - с информацией о визуализации 49
 - с информацией о невязках 49
 - с ячейками и данными 49
- старт 64
- Стенка 209
 - логарифмический закон 216
- Стенка с проскальзыванием 209, 210
- степень черноты 249
- стоп при 68, 109
- супергруппа 86, 132, 147
 - редактировать 87
 - создать 87
 - удалить 87
 - экспортировать 88
- схема
 - неявная 275
 - скошенная 275
 - явная 275
- сцена
 - загрузить 122
 - сохранить 122
- сценарий 55
- счетчик кадров 98, 168
- Т**
- Тангенциальная закрутка 209
 - логарифмический закон 216
- твердые тела
 - клонирование движ. подобластей 136
 - соотв. подобласти 136
 - спрятать ложн. подобласти 136
 - спрятать период. группы 136
 - спрятать скольз. группы 136
 - только подвиж. тела 136
- твердый материал 182, 201
- температура
 - частиц 251
- температура каркаса 222
- температура, зажигания 233
- тип границы 22
- топливо 235
 - жидкое 239
 - твердое 239
- точность 41
- траектории 165
- туман 126
- У**
- уравнение
 - состояния 223
- уравнения
 - заморозить 65
 - конвективного переноса 36, 38
 - конвективно-диффузионного переноса 35
 - рассчитывать 65
- Утечка 209
- Ф**
- фаза 241
 - газовая 235, 241
 - дисперсная 240
- фильтр
 - анизотропное сопротивление с источником тепла 77, 84
 - зажигание 77
 - изотропное сопротивление 77, 83
 - начальное распределение частиц 77, 265
 - остановка зажигания 77
 - подвижного тела 80
 - связанный с ABAQUS 83
 - установка переменной 77
- фильтр, зажигание 232
- Х**
- характеристики
 - интегральные 149
 - точечные 149
- Ч**
- частица 235, 240, 244
- частицы 182, 254
 - выход 263, 264
 - скорость 263, 264
 - стенка 263, 264
- чернота 250
 - частиц 251
- число
 - Куранта-Фридрихса-Леви 38
 - Маха 204, 214, 217, 220, 222, 229
 - Рейнольдса 204, 214
- Ш**
- шаблон 128
 - конуса 131
 - линии 128
 - плоскости 129
 - прямоугольного параллелепипеда 130
- шаг по времени 105
 - собственный 68
- Э**
- энергия
 - излучения 250