

Комплекс программ RuSat

А.В. Кашковский



Новосибирский Государственный Университет,

Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

630090, Новосибирск, e-mail: sasa@itam.nsc.ru

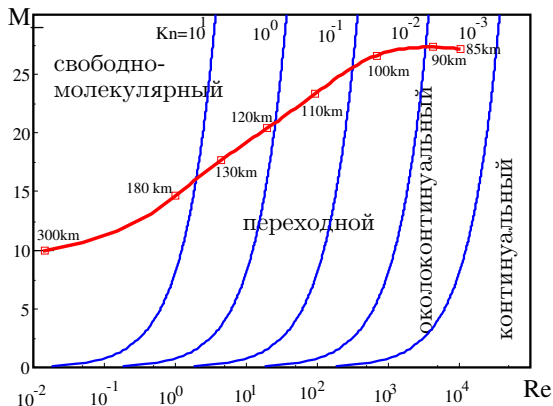
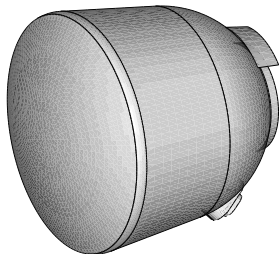
28-29 Ноября 2015

Общие цели и задачи кода

- RuSat - Rapid Unified Satellite Aerodynamic Tool
(быстрая унифицированная система расчета аэродинамики спутников)
- Предназначен для комплексной автоматизации проведения расчетов АДХ КА на свободномолекулярном (высоты более 200 км) и переходном (высоты 50-200 км) режимах течений.
- Оптимизирован для проведения серий многопараметрических расчетов: >10 000 вариантов в одном задании
- Используются:
 - на этапе концептуального проектирования КА
 - эксплуатации КА на орбите
 - анализа экологической безопасности в случае аварии

Классы моделируемых течений

- Свободномолекулярное ($Kn = \lambda/L \rightarrow \infty$)
- Гиперзвуковое, ламинарное, континуальное ($M > 5$, $Kn \rightarrow 0$)
- Переходное от свободномолекулярного к континуальному



Режимы течения и траектория спуска с орбиты капсулы "Союз"

- Высота. 1980-91
 - ИТПМ СО РАН, ЦАГИ, ЦНИИМаш, ...
 - БЭСМ-6/ЕС-1035/ЕС-1046
 - БД, модульная структура
 - буквенно-цифровой пользовательский интерфейс
- Ramses (Rarefied Aerodynamics Modeling System for Earth Satellites)
 - 1993-1995 г.
 - ИТПМ СО РАН, НТГ (Германия) для ESA
 - Unix
 - Графический пользовательский интерфейс
- RuSat вер.1. 1997-2007, ИТПМ СО РАН
 - Многопараметрические задания
 - Графический пользовательский интерфейс
- RuSat вер.2. 2007-н.в., ИТПМ СО РАН
 - Удаленный запуск
 - Многопользовательность
 - Графический пользовательский интерфейс

Математические модели

Свободномолекулярное течение

Аэродинамические нагрузки на элементарную площадку:

$$p = p_i + p_r$$

$$\tau = \tau_i + \tau_r$$

Падающий импульс:

$$p_i/q_\infty = \frac{1}{\sqrt{\pi}S_\infty^2} \Pi(S_\infty \cos(\Theta))$$

$$\tau_i/q_\infty = \frac{1}{\sqrt{\pi}S_\infty} \sin(\Theta) \chi(S_\infty \cos(\Theta))$$

$$\Pi(X) = x \exp(-X^2) + \sqrt{\pi} \left(\frac{1}{2} + X^2 \right) (1 + \operatorname{erf}(X))$$

$$\chi(X) = \exp(-X^2) + \sqrt{\pi} X (1 + \operatorname{erf}(X))$$

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx$$

Отраженный импульс зависит от модели взаимодействия газа с поверхностью

Модель взаимодействия газа с поверхностью

- Максвелл (Maxwell) $p_r = \sigma p_w + (1 - \sigma)p_i, \quad \tau = 0$
- Шаф-Шамбре (Schaaf/Chambre)

$$\sigma_n = \frac{p_i - p_r}{p_i - p_w}, \quad \sigma_\tau = \frac{\tau_i - \tau_r}{\tau_i - \tau_w} \quad (\tau_w = 0)$$

- (Ночилла) Nocilla

$$\sigma_\tau(\Theta_i) = \frac{\tau_i - \tau_r}{\tau_i} = 1 + \left[a_\tau + b_\tau \left(\frac{2\Theta_i}{\pi} - \frac{1}{2} \right) \right]$$

$$\sigma_n(\Theta_i) = \frac{p_i - p_r}{p_i - p_w} = \frac{p_i - p_w + \left(a_n + b_n \frac{2\Theta_i}{\pi} \right) |p_i|}{p_i - p_w}$$

- Давление на поверхность при диффузном отражении

$$p_w/q_\infty = \frac{1}{2S_\infty^2} \sqrt{T_w/T_\infty} \chi(S_\infty \cos(\Theta))$$

Математические модели

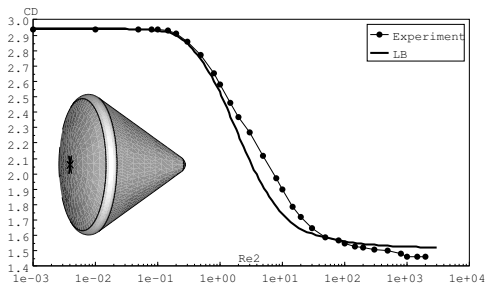
Гиперзвуковое континуальное течение

- Модифицированная теория Ньютона
- Полуэмпирические формулы

Переходной режим: Локально мостовая схема (инженерный метод)

$$p = p_{FM} \cdot B_p + p_{Cont} \cdot (1 - B_p)$$

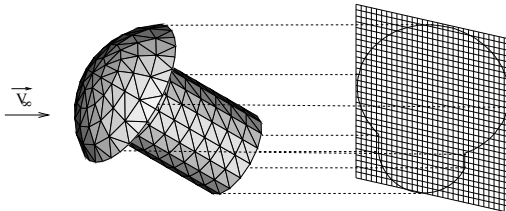
$$\tau = \tau_{FM} \cdot B_\tau + \tau_{Cont} \cdot (1 - B_\tau)$$



Спускаемый аппарат Аполлон

Численные методы

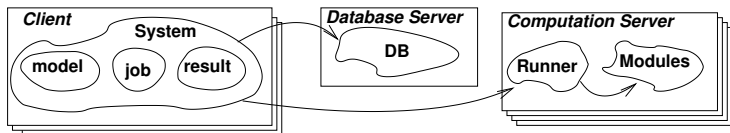
- Интегрирования по поверхности
 - Учет затенения по законам геометрической оптики



- Метод пробных частиц Монте-Карло
 - Статистический метод (медленнее)
 - Более корректный анализ затенения
 - Более корректное вычисление сил

Концепция

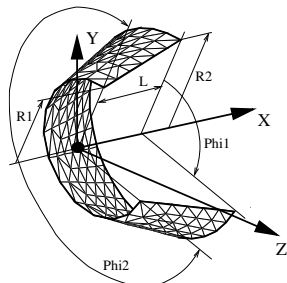
- Несколько вычислительных модулей
- Параметризированная геометрическая модель
- Клиент-Сервер



- Многопользовательность
- Оконный интерфейс (GUI)
- Оптимизация для многовариантных входных данных
- “Все включено”

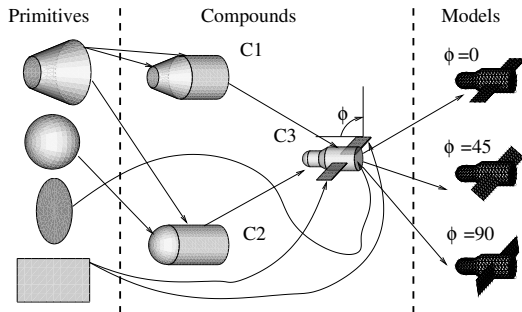
Встроенный редактор моделей

- Поэлементное описание
- Элементы объединяются в *компаунд*
- Компаунд может иметь параметры



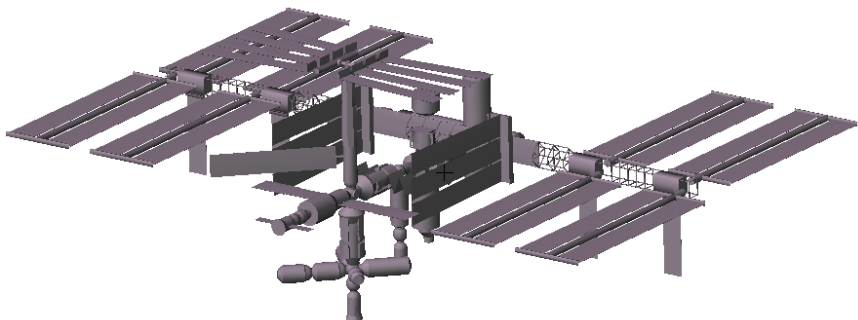
Имя	Диапазон	Описание
R1	$0 < R1 < \infty$	Радиус 1
R2	$R1 < R2 < \infty$	Радиус 2
L	$0 < L < \infty$	Длина
Phi1	$0 < \Phi1 < 360$	Сегмент
Phi2	$0 < \Phi2 < 360$	Поворот
normal	'+' or '-'	Нормаль

Примитив «Конус»



Иерархия моделей

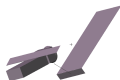
Примеры геометрических моделей



Международная космическая станция



Aristotel



Envisat



Expert

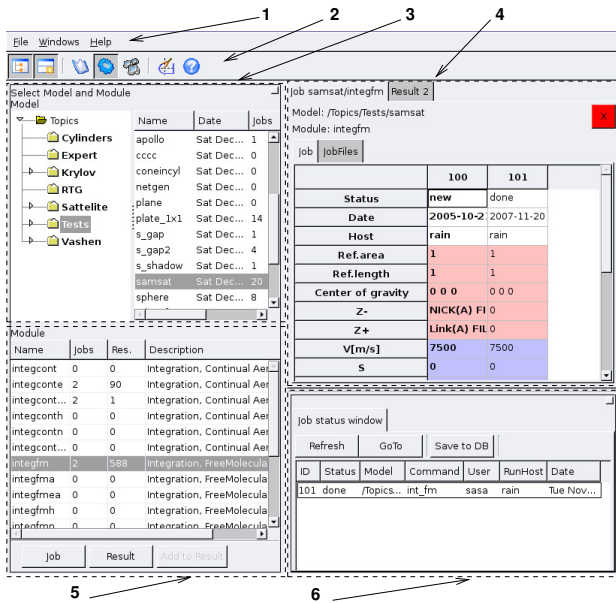


Express



Клиппер

Пользовательский интерфейс



Основное окно.
1-Меню,
2-Инструменты,
3-Модель,
4-JOB+RESULT,
5-Модули,
6-Info/Log

Задание на расчет

Job samsat/integfm

Model: /Topics/Tests/samsat
Module: integfm

Job JobFiles

	100	345	101
Status	new	done	database
Date	2005-10-21 18:30:03.2961	2007-11-23	2007-12-20
Host	rain	rain	none
Ref.area	1	1	1
Ref.length	1	1	1
Center of gravity	0 0 0	0 0 0	0 0 0
Z-	NICK(A) FILE(/home/Sasa	10.000000	0
Z+	Link(A) FILE(/home/Sasa/	10.000000	0
V[m/s]	7500	7500	7500
S	0	0	0
Mach	0	0	0
Alpha[deg]	Nick(B) 10,20,30	0	Nick(B) 10,2
Beta[deg]	Link(B) 0,45,90	0	Link(B) 0,45,
T_inf[K]	1000	1000	1000
Mol.mass[amu]	28	28	28
Cp/Cv	1.4	1.4	1.4
Temperature[K]	-C 300	-C 300	-C 300
Sigma(N)	-C 1.0	-C 1.0	-C 1.0
Sigma(T)	-C 1.0	-C 1.0	-C 1.0

Основные виды расчетов:

- круговые (матрица параметров)
- траекторные (лист связанных параметров)

Параметр может быть задан:

- числом
- списком (перечислением)
- циклом
- прочитан из файла
- связан с другим параметром

Окно результатов, Выбор свойств

Result 1

Save To File Delete from DB

Minimum and Maximum values
☐ Show ☒ Hide

Jobs Parameters Results/Table Results/Graphics

	Used in	Show	Gr.Type	Sort	Min	Max	Num	Range
Номина	1, 2	hide			0	0	0	
V[m/s]	1, 2	hide			0	0	0	
S	1, 2	hide			0	0	0	
Mach	1, 2	show			0	0	0	
Alpha[deg]	1, 2	show	A		0	30	6	[0:30]
Beta[deg]	1, 2	show	P		0	90	4	[0:90]
T_inf[K]	1, 2	hide			0	0	0	
ol.mass[am	1, 2	hide			0	0	0	
Cp/Cv	1, 2	hide			0	0	0	
emperature	1, 2	hide			0	0	0	
Sigma(N)	1, 2	hide			0	0	0	
Sigma(T)	1, 2	hide			0	0	0	
Cx	1, 2	show	F		-0.05522	26.234	33	[-0.05522:2
Cv	1, 2	show			0	0	0	

Окно результатов, Таблица результатов

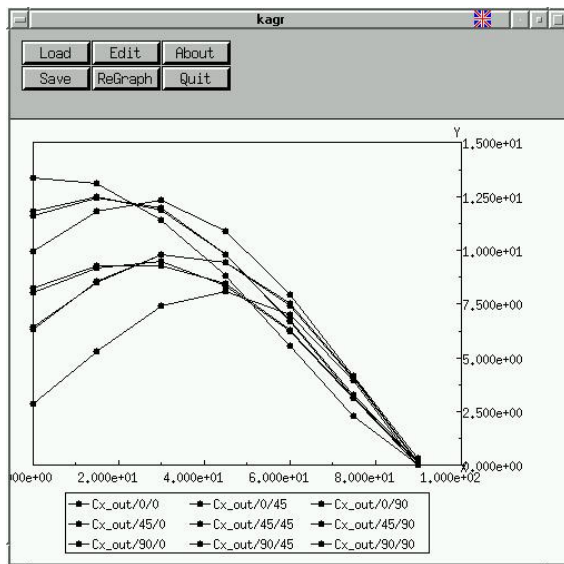
Result 1

Save To File Delete from DB

Minimum and Maximum values
☐ Show ☒ Hide

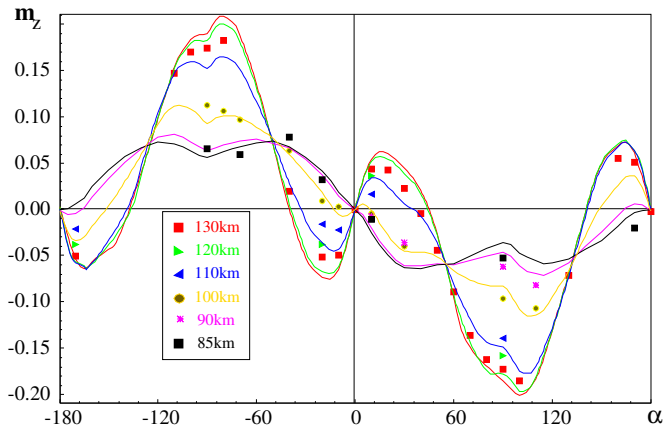
Jobs Parameters Results/Table Results/Graphics

	Job	Mach	Alpha[deg]	Beta[deg]	Cx	Cy	Cz
1	100	11.632000	10.000000	0.000000	12.705000	2.420200	-0.000000
2	100	11.632000	10.000000	0.000000	12.736000	2.641000	-0.000000
3	100	11.632000	10.000000	0.000000	13.503000	2.307800	-0.000000
4	100	11.632000	10.000000	0.000000	13.664000	2.595100	-0.000000
5	100	11.632000	10.000000	0.000000	16.080000	2.673900	-0.000000
6	100	11.632000	10.000000	0.000000	16.160000	3.358100	-0.000000
7	100	11.632000	10.000000	0.000000	17.808001	3.207700	-0.000000
8	100	11.632000	10.000000	0.000000	18.156000	3.279500	-0.000000
9	100	11.632000	10.000000	0.000000	18.510000	3.521800	-0.000000
10	100	11.632000	10.000000	0.000000	18.632999	3.891100	-0.000000
11	100	11.632000	10.000000	0.000000	18.823999	3.562700	-0.000000
12	100	11.632000	10.000000	0.000000	19.382999	3.154500	-0.000000
13	100	11.632000	10.000000	0.000000	19.417999	3.795000	-0.000000
...



Реверс момента тангажа СА "Союз"

- Расчет круговых характеристик для разных высот
- На высотах выше 90 км капсула статически неустойчива
- Проверено ПСМ (маркеры)

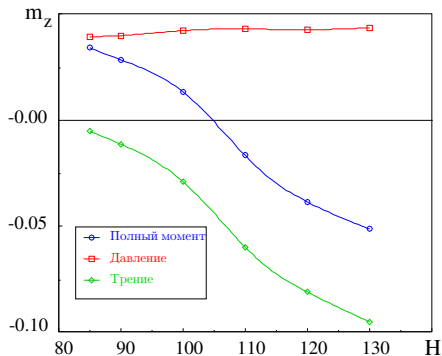


Моментные характеристики модифицированной капсулы "Союз"

Причина реверса

Причина: Разное влияние разреженности на давление и трение.

С уменьшением высоты, давление практически не меняется, трение устремляется к 0.

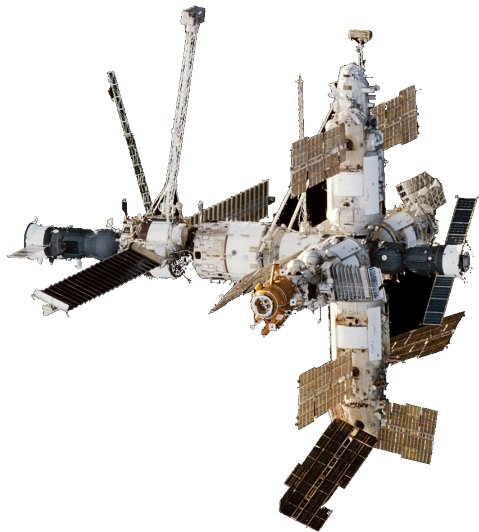


Вклад давления и трения в момент тангажа

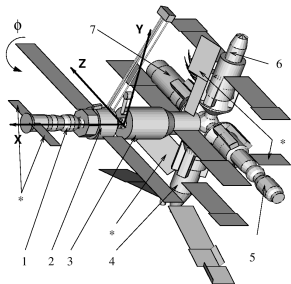
- Это типичный пример применения комплекса RuSat:
 - быстро получить АДХ,
 - проанализировать и уточнить спорные моменты более точными но более медленными методами

Затопление станции “Мир”

- *Мир* была первой модульной станцией
- Собрана на орбите в 1986-1996 гг.
- Масса ~ 130 т.
- Размеры $\sim 19 \times 31 \times 28$ м.
- Орбита 354 - 374 км.
- Управляемый спуск планировался в 1999.



Сценарий затопления



- 1: Прогресс-М1-5,
2: Квант-1,
3: Базовый блок,
4: Спектр, 5: Кристал,
6: Квант-2, 7: Природа,
*: неподвижные
элементы

• Три этапа:

- Спуск до высоты 200 км за счет аэродинамического торможения
- Переход на орбиту 165×220 км двигателями управления Прогресс-М1-5
- Увод с орбиты основными и управляющими двигателями Прогресс-М1-5

• Проблемы:

- На этапе 1 необходимо сохранить ориентацию Прогресс-М1-5 двигателями вперед.
- Необходимо компенсировать разворачивающий момент от солнечных батарей (СБ)

• Как развернуть СБ чтобы:

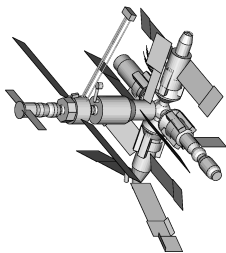
- Минимизировать момент
- Увеличить сопротивление

Результат

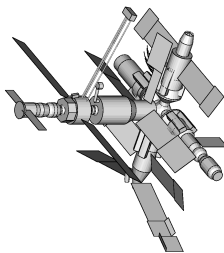
9 СБ, 8 позиций, $8^9 = 134217728$. 1 расчет/с = 4 года 3 месяца!!!

Решение:

- Вычисляются АДХ "0" варианта C_0 (все СБ вдоль потока)
- Вычисляются АДХ каждой i СБ для каждой j позиции C_{ij}
- Вычисляются вклад: $\Delta C_{ij} = C_{ij} - C_0$
- АДХ любой комбинации: $C_k = C_0 + \sum \Delta C_{ij}$
- Производится сортировка по C_k



1



2

	Сх	М
0	33.64	3.48
1	50.64	0.032
2	50.52	0.062

Спасибо за внимание!