

Решение упруго гидродинамических задач (FSI) с использованием свободно распространяемого программного обеспечения «OpenFOAM» и «Calculix»:

Создание механизма, обеспечивающего решение связанных задач взаимодействия жидкости и твердого тела (FSI), в открытом конечно-элементном (КЭ) пакете CalculiX

Терёшин Денис Анатольевич
Южно-Уральский Государственный Университет
Челябинск

1. Возможности создания и анализа КЭ модели для CalculiX-a

КЭ модель: *.inp -> cсх (CalculiX-solver)

1) cсх (пре- и пост- процессор CalculiX-a) | -> *.inp

2) использование коммерческих пакетов:

ABAQUS	->		
Workbench	->	*.inp	-> cсх
Patran	->		
...	->		

- Требуется минимальное редактирование
- Можно делать сравнение результатов (верификацию) CalculiX-a с ABAQUS-ом на идентичных моделях

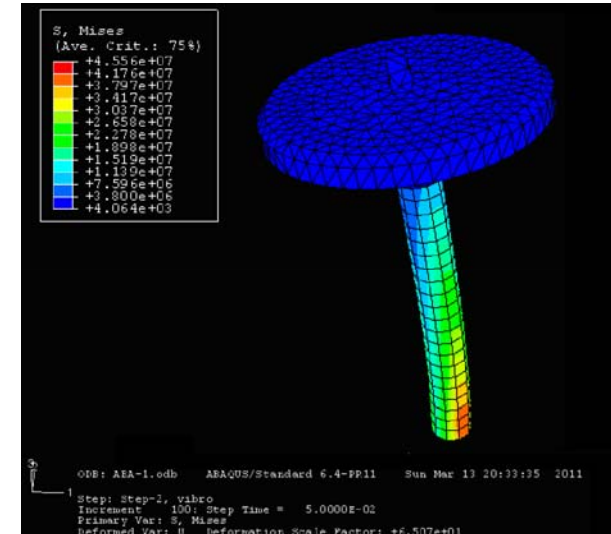
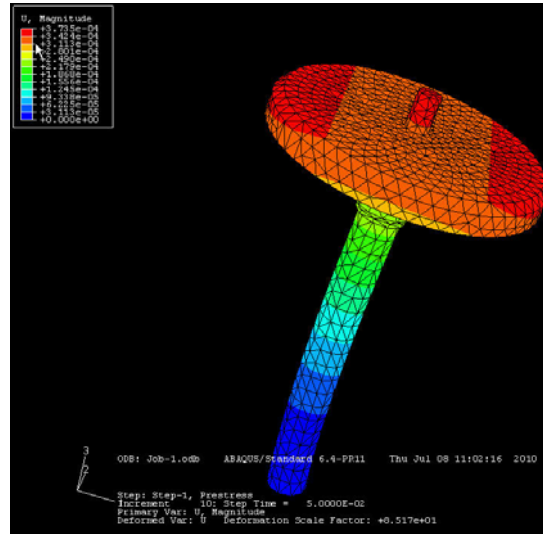
3) использование открытых пакетов:

Salome -> геометрия -> Netgen -> разбивка (*.inp) -> cсх
Z88 Aurora -> *.inp -> cсх -> *.frd (-> Aurora)

2. Верификация решения задач динамики сравнением с ABAQUS-ом

Экспериментальный
стенд

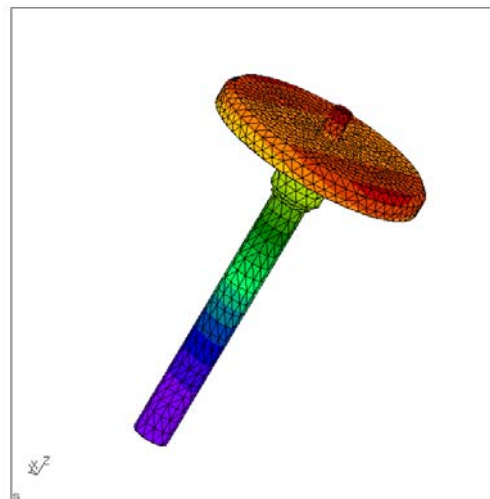
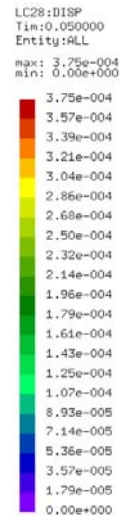
ABAQUS:



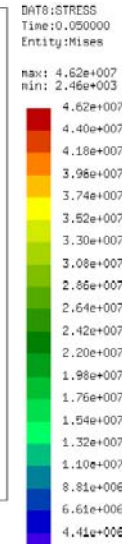
$\max U = 3.735E-4$

$\max \sigma = 4.556E+7$

CalculiX:



$\max U = 3.75E-4$



$\max \sigma = 4.62E+7$

3. Сравнение собственных форм и частот

Собственные частоты
(Гц)

ABAQUS: | CalculiX:

1. Изгибные формы
(две плоскости)

1) 74.661 | 74.908

2) 74.700 | 74.913

2. Крутильная форма

3) 189.05 | 189.67

3. Еще изгибные формы
(две плоскости)

4) 614.92 | 619.27

5) 615.06 | 619.86

4. Растяжение-сжатие
ножки

6) 1444.1 | 1451.9

5. Еще изгибные формы
(две плоскости)

7) 2093.8 | 2111.3

8) 2095.3 | 2116.9

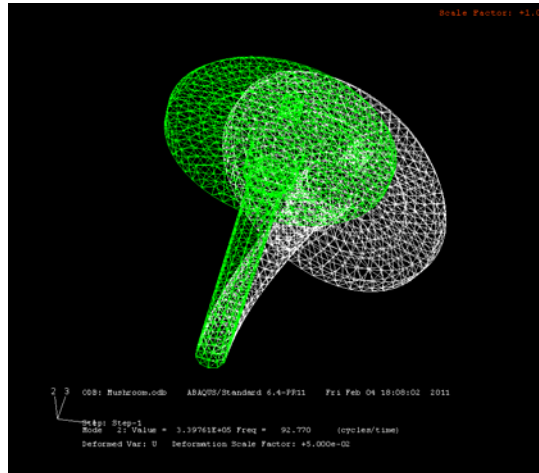
6. Две формы
деформирования
шляпки "седлом"

9) 2823.6 | 2865.1

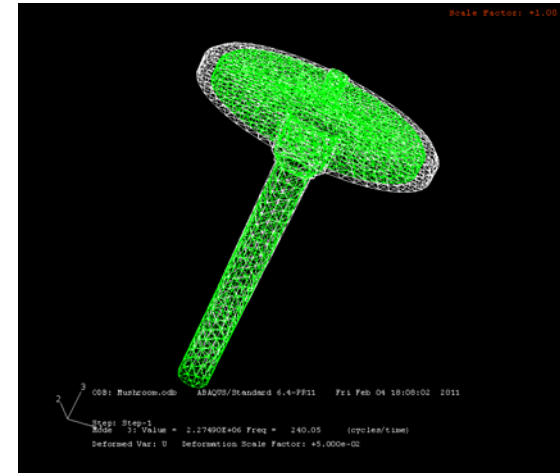
10) 2865.1 | 2867.4

ABAQUS:

1:

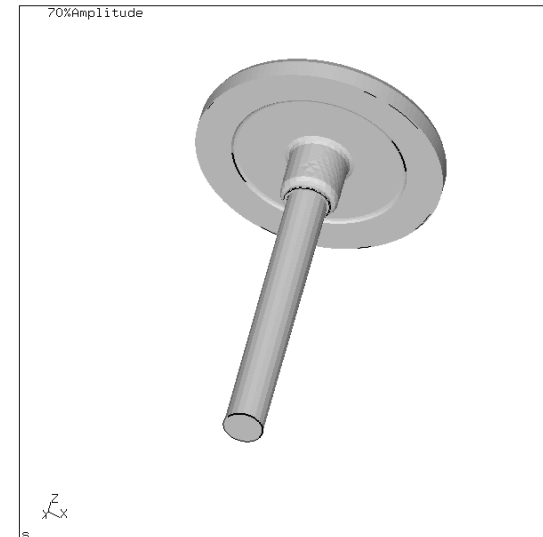
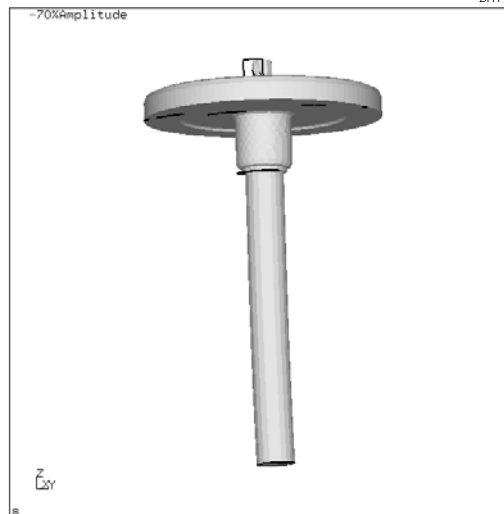


2:



CalculiX:

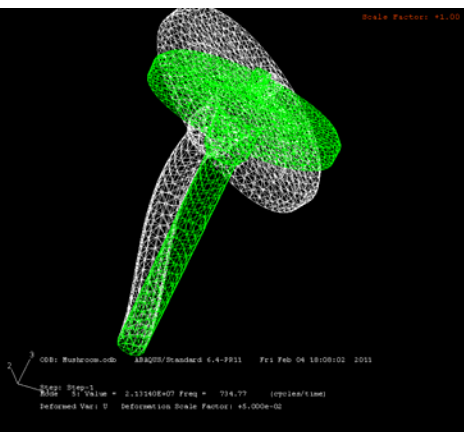
DAT1:DISP
Time:74.580002
Animated



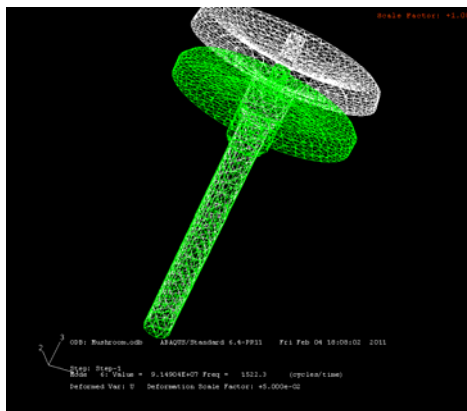
4. Сравнение собственных форм (продолжение)

ABAQUS:

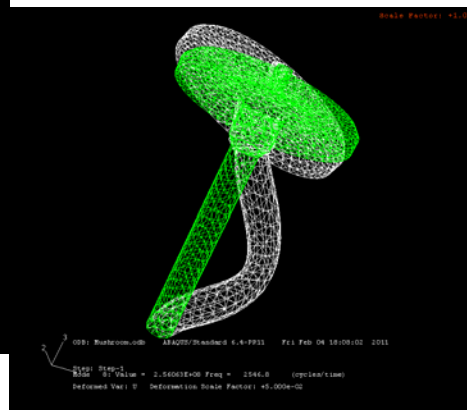
3:



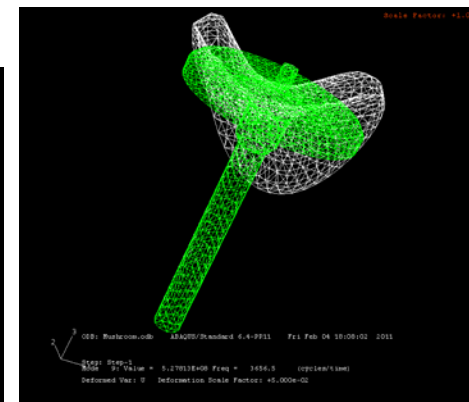
4:



5:

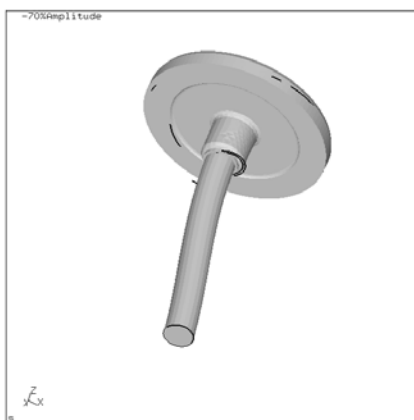


6:

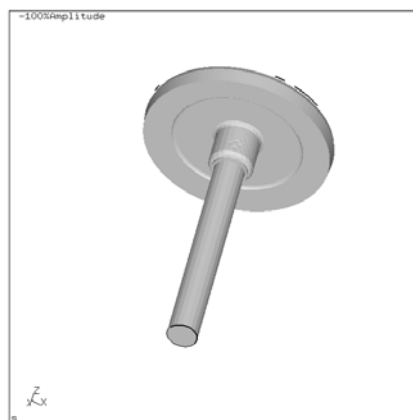


CalculiX:

DAT10:DISP
Time:1581.770020
Animated



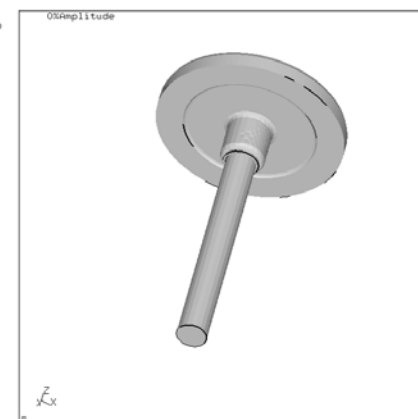
DAT16:DISP
Time:1389.599976
Animated



SP
5.699951



DAT28:DISP
Time:2860.500000
Animated



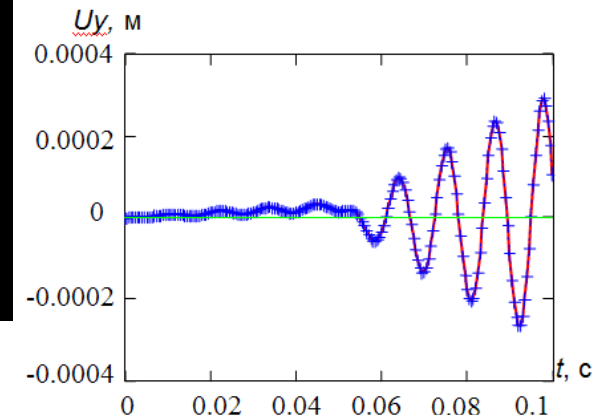
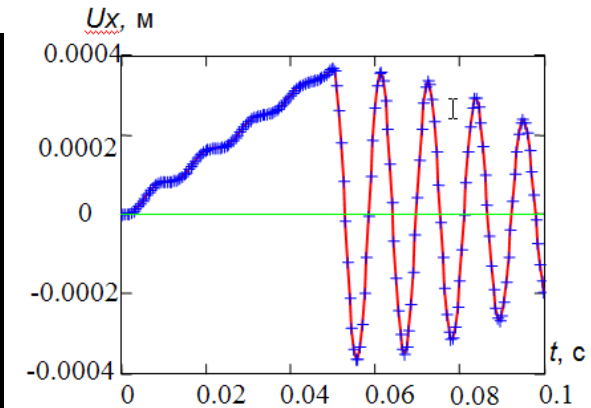
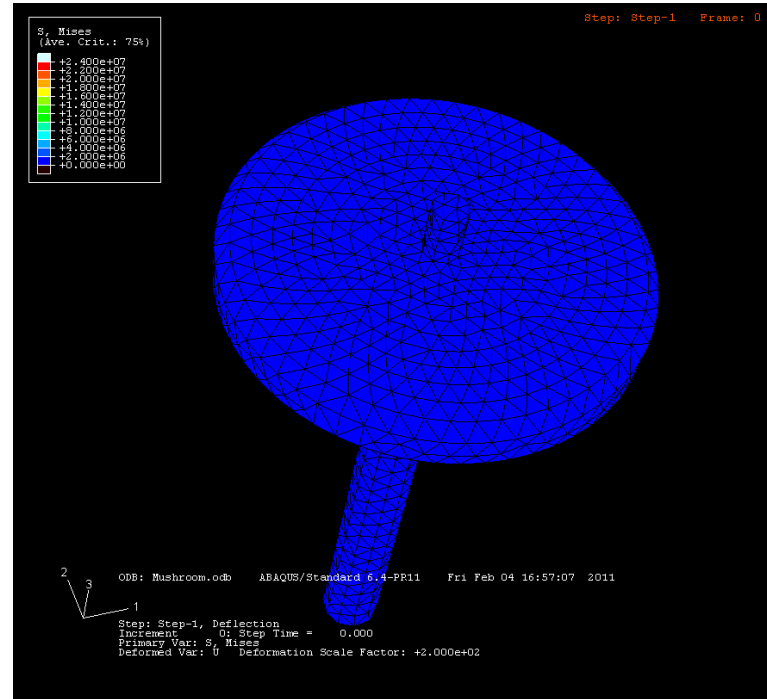
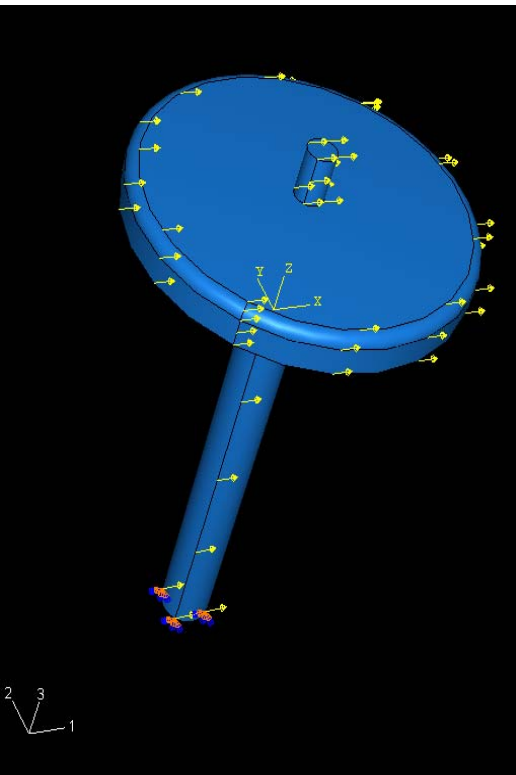
5. Сравнение расчетов динамического переходного процесса

1) Прямое интегрирование по времени

Сравнение движения верхней точки “шляпки гриба”

Напряженно-деформированное состояние

1-й шаг – отклонение линейно возрастающими от нуля объемными силами:



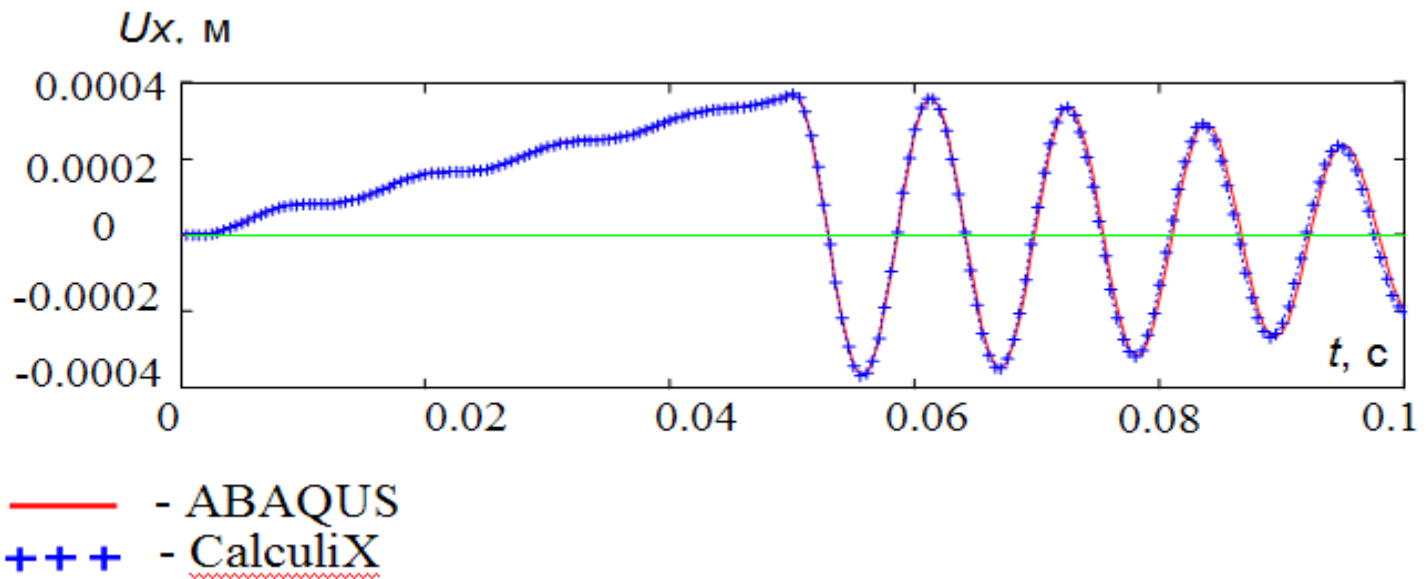
— - ABAQUS
+++ - CalculiX

Различие по перемещениям < 1%

2-й шаг – свободное движение

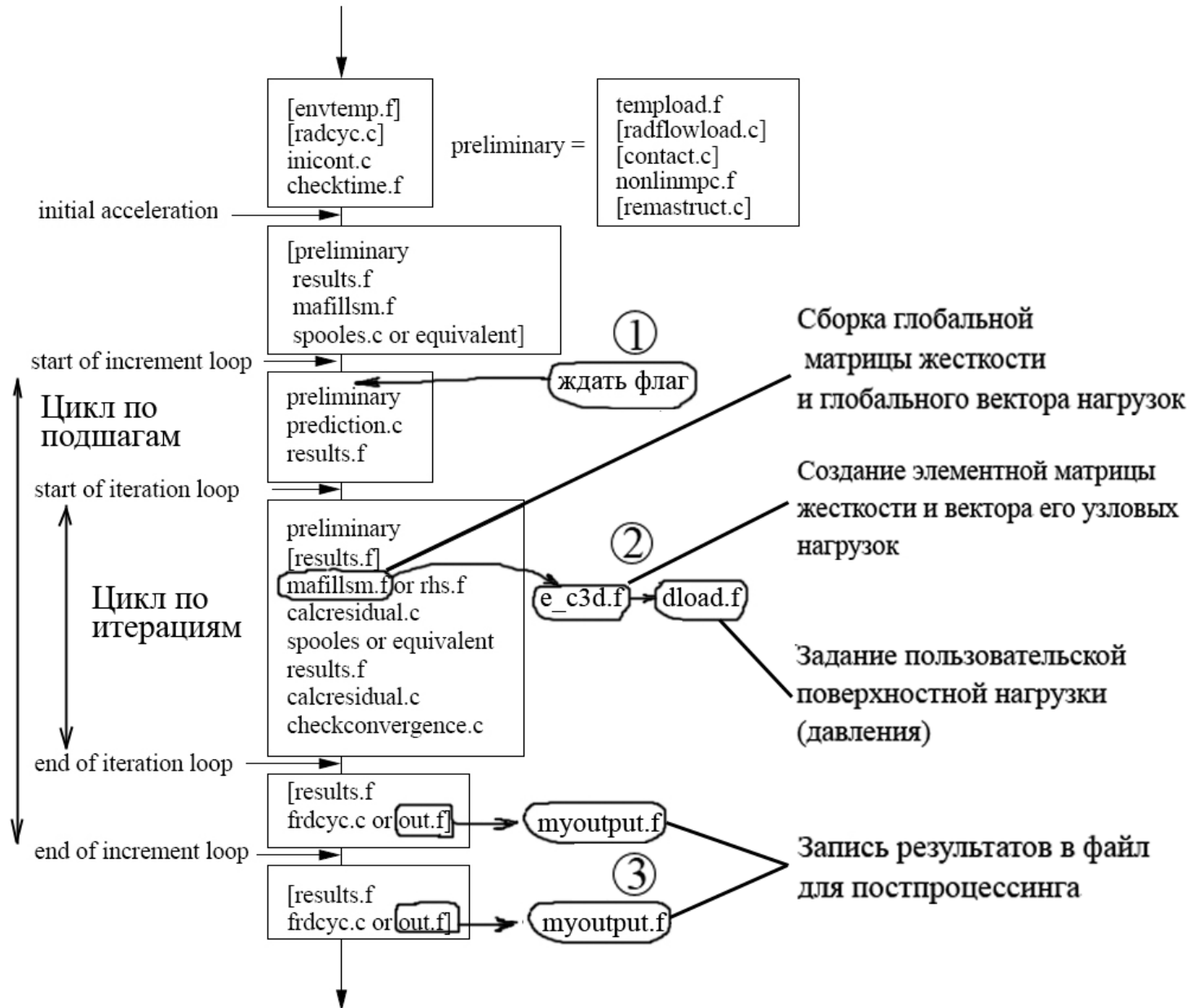
6. расчетов динамического переходного процесса

2) ABAQUS – прямое интегрирование,
CalculiX – декомпозиция движения по 5-и первым собственным формам



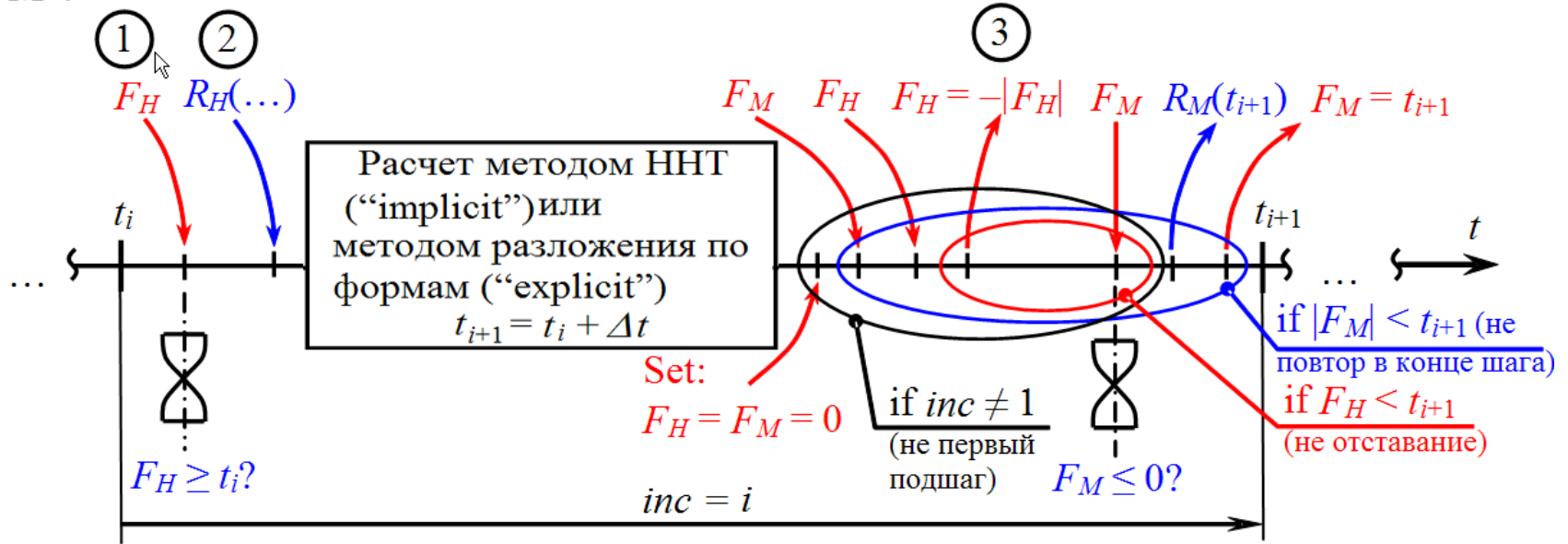
Имеется незначительное опережение по времени

7. Исходная реализация динамического расчета прямым интегрированием по времени в CalculiX-e (1 шаг расчета)



8. Механизм обмена данными для параллельного метода связывания, реализованный в CalculiX-e

“M”:



Обозначения:

F_H – флаг времени CFD программы;

F_M – флаг времени программы расчета твердого деформируемого тела;

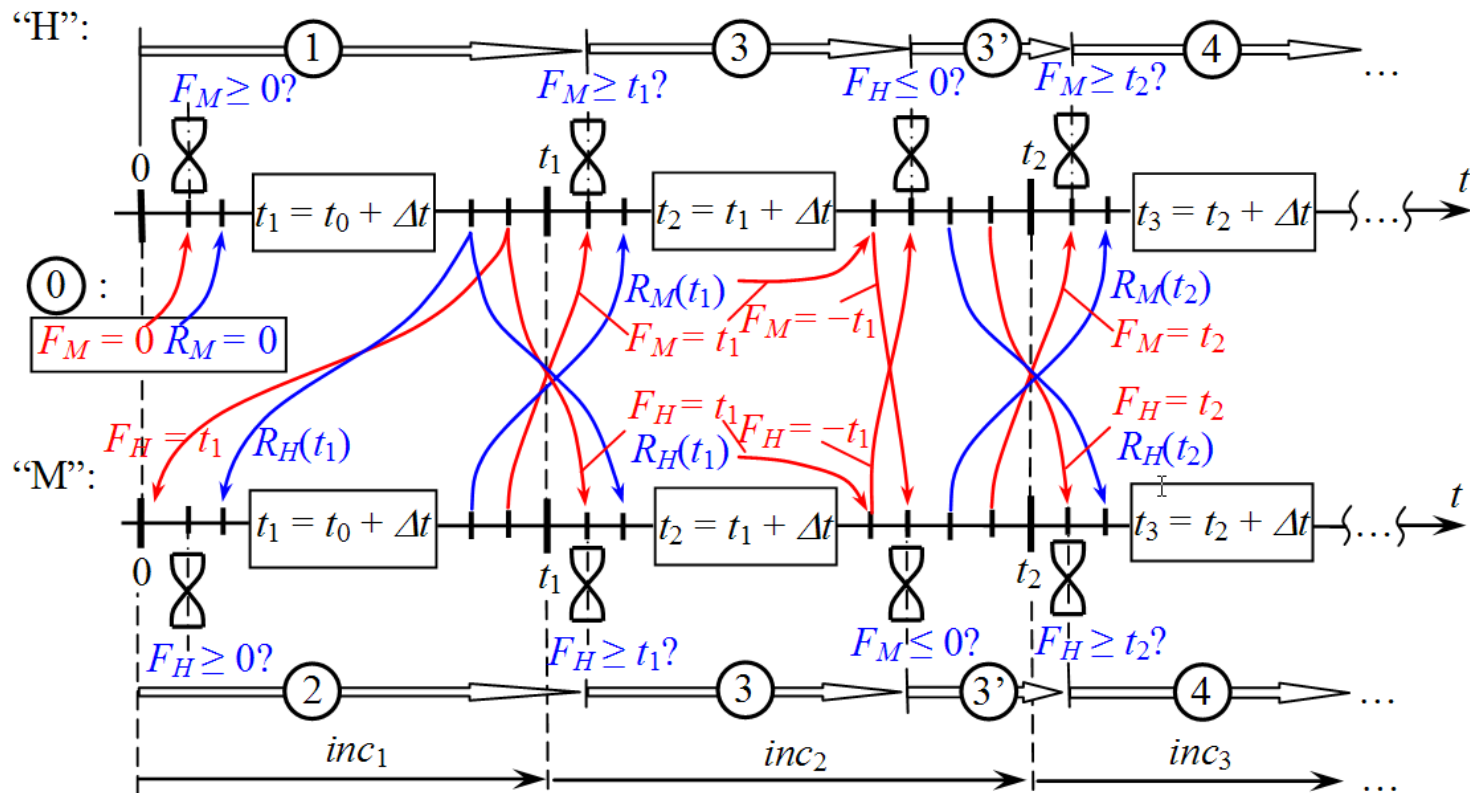
$R_H(t)$ – результаты CFD расчета для времени t ;

$R_M(t)$ – результаты механического расчета для времени t ;

inc (increment) – подшаг расчета;

Δt – приращение времени за подшаг.

9. Алгоритм параллельного связывания двух независимых программ



Обозначения:

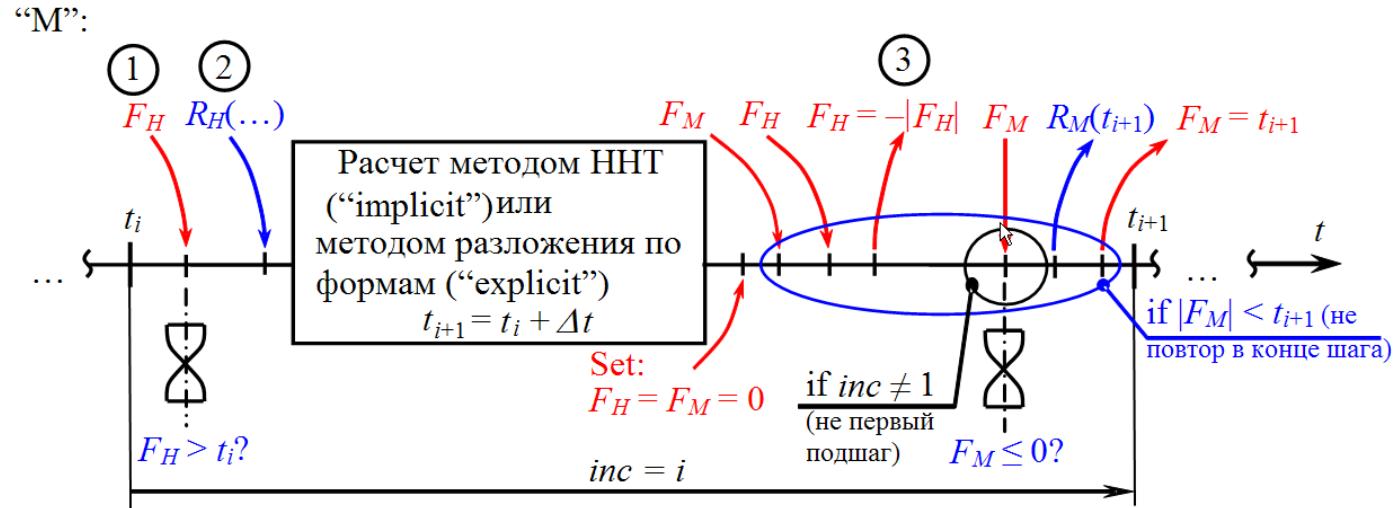
H – CFD расчет;

M – расчет движения твердого деформируемого тела (CalculiX);

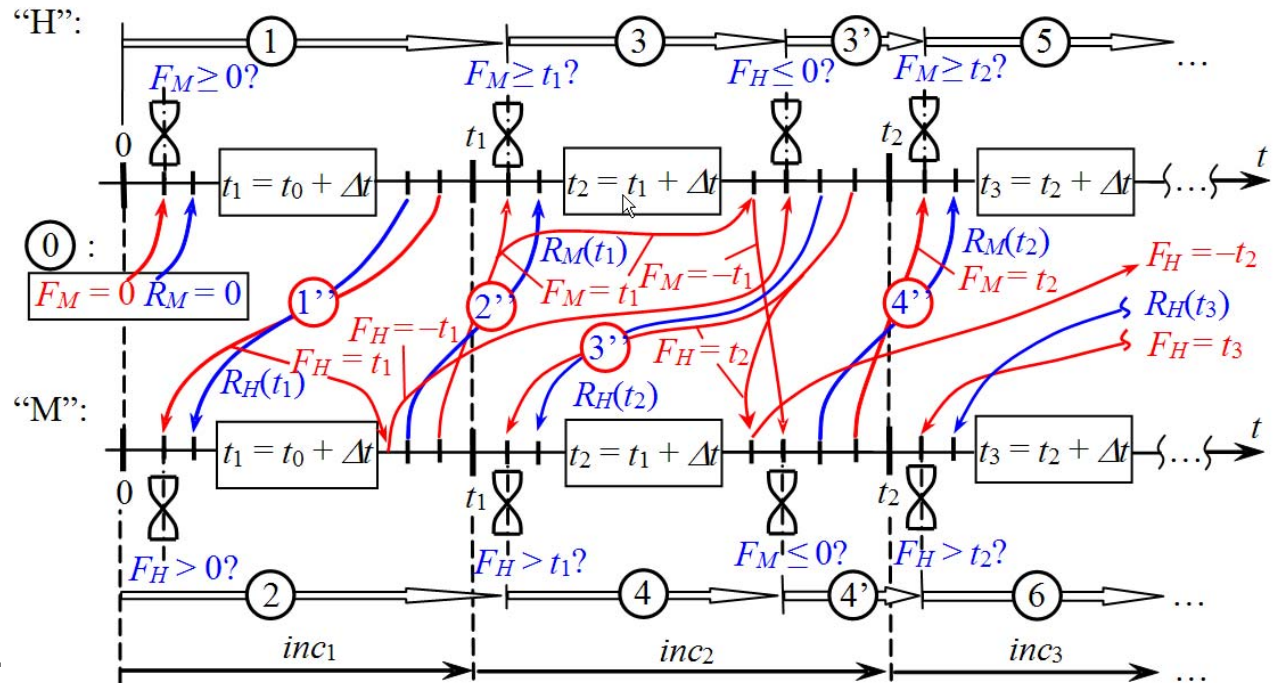
inc_i – i -й подшаг расчета.

10. Механизм обмена данными для последовательного метода связывания

Реализация в CalculiX-e:



Связывание двух программ:



Обозначения:

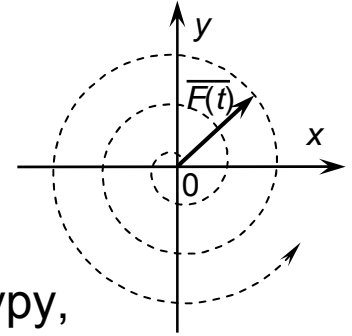
Н – CFD расчет;

М – расчет движения твердого деформируемого тела (CalculiX);

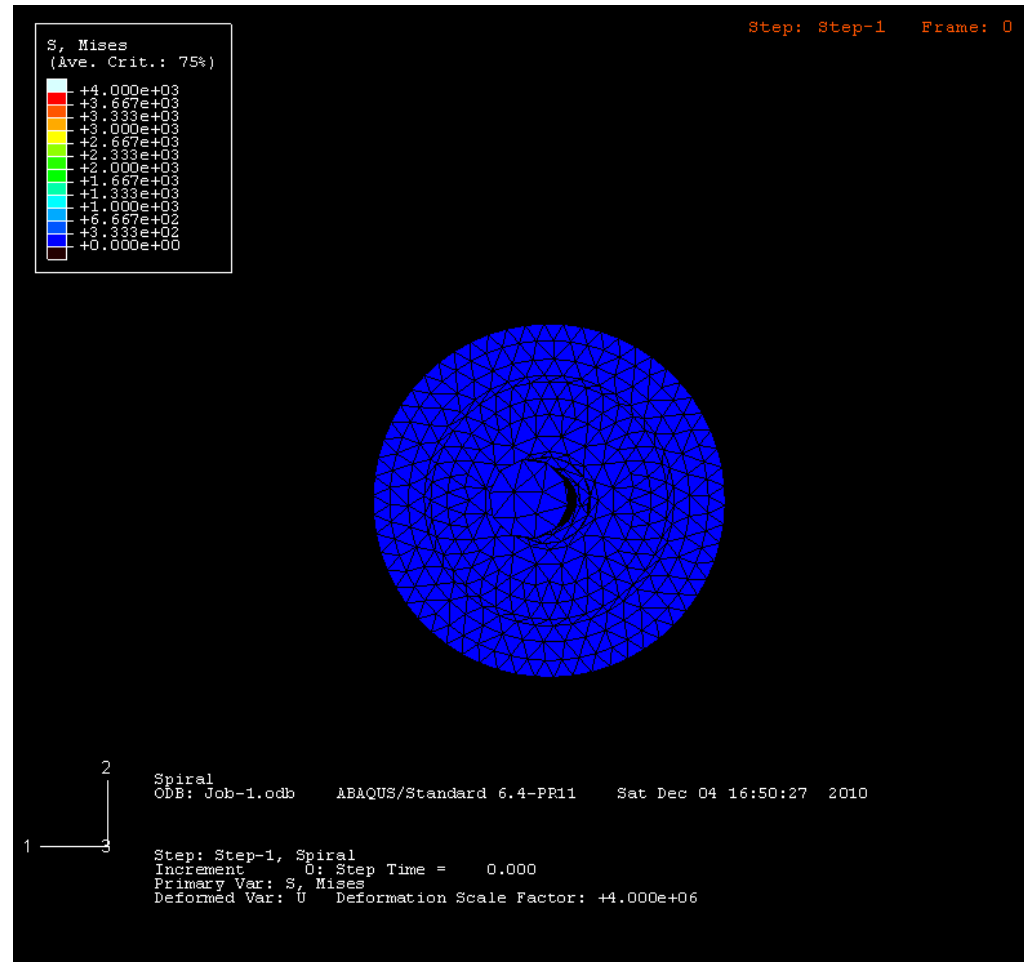
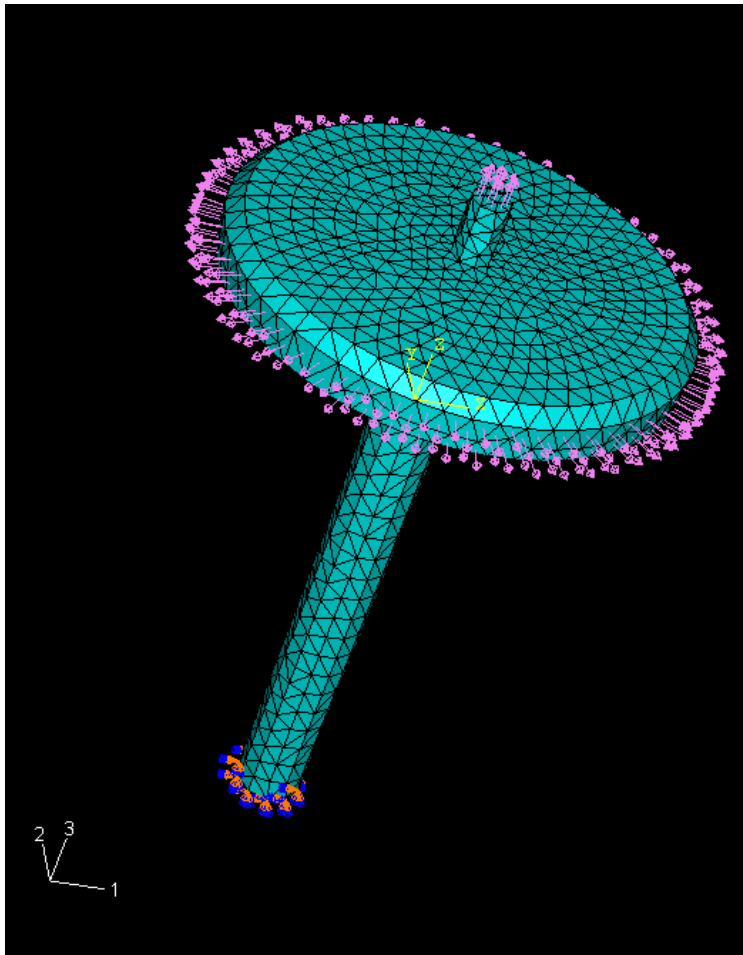
inc_i – i -й подшаг расчета.

11. Верификация алгоритма связывания сравнением с ABAQUS-ом

Нагружение: давление, приложенное к шляпке, равнодействующая которого меняется во времени по спирали.



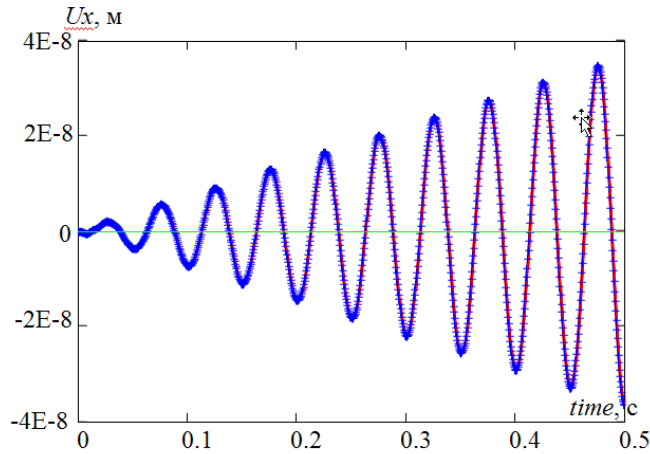
В ABAQUS-е нагрузка задается через пользовательскую процедуру, в CalculiX-е давление передается из параллельно выполняющейся программы.



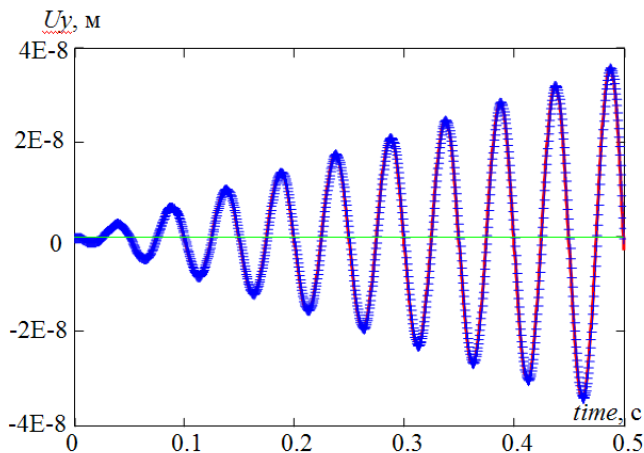
12. Сравнение результатов, полученных прямым интегрированием в обеих программах

Движение в горизонтальной плоскости плоскости xOy

Перемещение по Ox :



Перемещение по Oy :



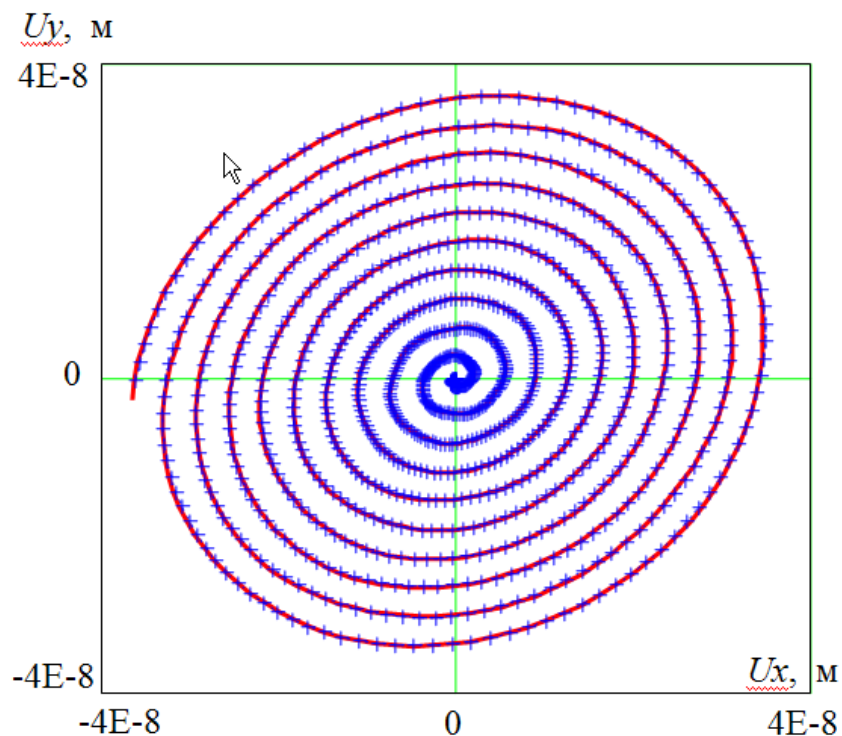
— - ABAQUS
+++ - CalculiX

Различие по перемещениям:

- с учетом смещения по времени на один подшаг $< 0.1\%$;
- без учета смещения достигает 3% .

13. Сравнение результатов, полученных модальной декомпозицией в CalculiX-е и прямым интегрированием в ABAQUS-е

Движение в горизонтальной плоскости плоскости xOy



— - ABAQUS
+++ - CalculiX

Различие по перемещениям с учетом смещения по времени на один подшаг составляет $< 1\%$ при разложении движения по пяти первым формам

Спасибо за внимание!

Буду рад ответить на ваши вопросы