

## ПОДВИЖНЫЕ АДАПТИВНЫЕ СЕТКИ В ЗАДАЧАХ СВЕРХЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИКИ

Н.Г. Бураго, И.С. Никитин (ИПМех РАН, ИАП РАН, Москва)

Идея произвольно подвижных адаптивных сеток не является новой, ее история описана в обзорных разделах работ [1-3]. Такие адаптивные сетки подстраиваются под особенности решения и, сгущаясь, уменьшают ошибки аппроксимации около внешних, контактных и межфазных границ, а также в зонах больших градиентов решения в ударных волнах и пограничных слоях. Для управления адаптацией к решению в уравнения генерации сеток отображениями вводится так называемая мониторинговая функция. Мониторная функция выбирается так, что она имеет всплески (большие положительные значения) в местах больших градиентов решения и указывает на необходимость уменьшения в таких местах шага пространственной сетки для подавления ошибок аппроксимации. В работе [4] было замечено, что постепенное совершенствование нелинейных уравнений в частных производных, применяемых для генерации сеток отображениями, ведет в конечном счете к уравнениям нелинейной теории упругости. Подвижная расчетная сетка трактуется как изотропная термоупругая среда. Деформации этой среды определяются минимизацией функционала энергии, который принимается в простейшем виде в соответствии с двухконстантной теорией изотропной нелинейной термоупругой среды. В этот функционал входит вместо обычной температуры  $T$  дополнительная мониторинговая функция – “антитемпература”  $\tilde{T}$ . Мониторная функция названа “антитемпературой”, поскольку с ростом  $\tilde{T}$  сеточная среда сжимается в то время, как обычная упругая среда при нагреве расширяется. Например, в рассматриваемых примерах из сверхзвуковой аэродинамики мониторинговая функция принимается прямо пропорциональной дивергенции скорости со знаком минус и имеет максимальные значения на скачках уплотнения. Уравнения нелинейной упругости были успешно применены для построения адаптивных сеток. Основные этапы построения данного метода описаны в [5]. Результаты для сверхзвукового обтекания конуса (осесимметричная задача,  $M = 134$ ) показаны на Рис. 1. Приведены линии уровня мониторинговой функции и фрагмент адаптивной сетки вблизи конуса.

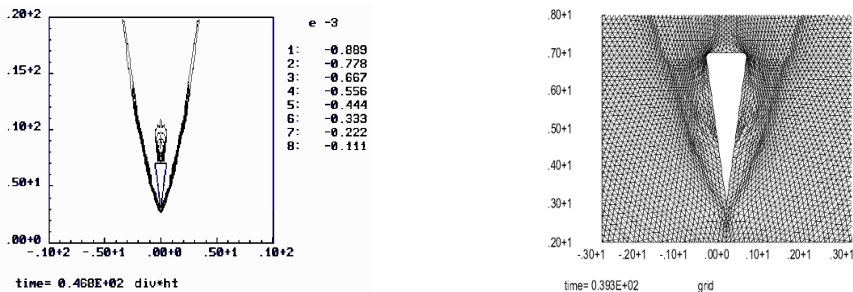


Рис. 1. Сверхзвуковое обтекание конуса  $M = 134$ .  
Мониторная функция и адаптивная сетка вблизи конуса.

Конечно, в области гиперзвуковых течений ( $M > 8$ ) постановка задач должна существенно расширяться, чтобы учесть множество физико-химических эффектов высокотемпературной плазмы. Здесь показана только потенциальная пригодность алгоритма для задач такого типа. Число  $M = 134$  является случайным. Чтобы увеличить число Маха, температура встречного потока была задана малым, произвольно выбранным значением.

1. Годунов С.К., Прокопов Г.П. Об использовании подвижных сеток в газодинамических расчетах// ЖВММФ, 1972. Т. 12. № 2. С. 429-440.
2. Круглякова Л.В., Неледова А.В., Тишкин В.Ф., Филатов А.Ю. Неструктурированные адаптивные сетки для задач математической физики (обзор)// Мат. моделирование, 1997. Т. 10. № 3. С. 93-116.
3. Гильманов А.Н. Методы адаптивных сеток в задачах газовой динамики. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000.
4. Бураго Н.Г. Формулировка основных уравнений механики сплошной среды в подвижных адаптивных координатах // В книге “Численные методы в механике твердого деформируемого тела” / Ред. Г.И. Пшеничнов. – М.: ВЦ АН СССР, 1984. С. 32-49.
5. Бураго Н.Г., Никитин И.С., Якушев В.Л. Гибридный численный метод решения нестационарных задач механики сплошной среды с применением адаптивных наложенных сеток // ЖВММФ, 2016. Т. 56. № 6. С. 1082-1092.