

**Название доклада:**

**“CONTOUR” Algorithm for Finding and Visualizing Flat Sections of 3D-objects**

D. V. Mogilenskikh  
Russian Federal Nuclear Center – the All-Russian Scientific and Research Institute of Technical Physics named after academician E. I. Zababakhin (RFNC-VNIITF)

**Алгоритм “КОНТУР” для нахождения и визуализации плоских сечений 3D-объектов**

Д. В. Могиленских  
Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ)

**Авторы:**

Могиленских Дмитрий Владимирович  
Начальник лаборатории научной визуализации  
Российский Федеральный Ядерный Центр-ВНИИТФ  
им. акад. Е. И. Забабахина.

Dmitry V. Mogilenskikh  
Head of visualization laboratory  
Russian Federal Nuclear Center - Institute of Technical Physics

**Категория доклада:**

Обычный доклад с параллельным представлением на компьютере.

**Секция:** Научная визуализация

**Информация для контактов:**

Могиленских Дмитрий Владимирович  
E-mail: d.v.mogilenskikh@vniitf.ru

456770, Снежинск, Челябинской обл.  
А.Я 245  
Факс: ( 35172 ) 3-20-70, 3-09-79  
Тел.: (35172) 2-22-22 доп. 5-61-56

Dmitry V. Mogilenskikh  
Head of visualization laboratory  
456770, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russia  
P.O. Box 245  
E-mail: d.v.mogilenskikh@vniitf.ru  
FAX: ( 35172 ) 3-20-70, 3-09-79  
TEL.: (35172) 2-22-22 (+) 5-61-56

**Abstract:**

One of the visualization problems implies finding boundaries and insides of flat sections of 3D objects specified analytically. This problem is to be solved to analyze the results and to control the geometry specification. On the one hand, the analytic definition of profiles for “not simple” 3D-objects in general case is actually unsolvable problem; on the other hand, it is necessary to apply virtual designing of 3D-objects in the field of numerical simulation.

The paper presents the classical approach to finding and visualizing the flat sections – the algorithm of scanning beams in a proper plane. The limitations for this approach application are considered and its shortfalls are demonstrated with some examples.

The numerical algorithm “CONTOUR” is proposed for finding the connected section contour of 3D-objects, which are specified analytically in the form of second-order planes and rotation connected by multiple-theoretic operations. “CONTOUR” algorithm suggests using topologically parallel scanning for generating the empirical values, and then, considering them in the process of isoline generation, the polygonal section contour is constructed. Essentially, CONTOUR algorithm is an algorithm of second order of accuracy and corresponds to the discretization error specified in advance.

**Key words:** synthetic sampling (Monte-Carlo method), visualization, flat section, surfaces of fixed sign, second-order surfaces, object nesting, scanning beams, additional grid, isolines, basic coordinate system, on-screen coordinate system.

**Сокращения:** ММК – метод Монте-Карло, ПВП – поверхности второго порядка, ЛБП – логический блок примитивов, АСЛ – алгоритм сканирующих лучей, СВО – список внутренних отрезков, БСК – базовая система координат, ЭСК – экранная система координат, ПС – плоскость сечения, ДС – дополнительная сетка.

# Алгоритм “КОНТУР” для нахождения и визуализации плоских сечений 3D-объектов

Д. В. Могиленских

Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина  
(РФЯЦ-ВНИИТФ)

## 1. Введение

Задача создания оптимальных численных алгоритмов нахождения (локализации) и описания границ и внутренностей плоских сечений произвольных трехмерных объектов, которые заданы аналитическим способом, является актуальной. Актуальность заключается в том, что аналитическое определение контуров сечения для “непростых” объектов в общем случае практически неразрешима. С другой стороны, есть острая необходимость виртуального конструирования объектов со сложной геометрией в области численного моделирования. По этой причине, решение задачи локализации и далее визуализации сечений объектов.

В этой работе предложен численный алгоритм КОНТУР локализации и описания связанного контура сечения для трехмерных объектов определенного класса. Существуют разные способы и языки описания существенно трехмерной геометрии. Одним из наиболее распространенных способов является – аналитическое задание примитивов, которые связаны теоретико-множественными операциями [1-7]. Во РФЯЦ-ВНИИТФ для описания сложной геометрии объектов применяются подходы, которые изложены в работах [1, 5-7]. Основой подхода является применение поверхностей второго порядка (ПВП) в качестве примитивов, которые связаны теоретико-множественными операциями. С помощью ПВП можно описать геометрию различной сложности. Набор ПВП, связанных теоретико-множественными операциями, назовем в данной работе как “Логический Блок Примитивов” (ЛБП).

Конкретная необходимость адекватной визуализации аналитически заданных трехмерных объектов существует в разных областях численного моделирования. Например, задача задания и контроля точности сложных геометрий является актуальной для любого пакета программ метода Монте-Карло (ММК). Во РФЯЦ-ВНИИТФ разработан и активно применяется пакет рабочих программ моделирования частиц ММК “ПРИЗМА”, который активно эксплуатируется на задачах с разнохарактерной геометрией [10-12]. Другим примером необходимости является генерация трехмерных разностных сеток. В лаборатории “Научной визуализации” РФЯЦ-ВНИИТФ в 1999 году была создана система визуализации “VIZI\_PRIZMA” для пакета ММК “ПРИЗМА”.

**Цель создания алгоритма КОНТУР:** Разработать численный алгоритм для локализации и описания связанного контура произвольного плоского сечения трехмерного объекта, заданного ЛБП.

При визуализации плоских сечений объектов заданных теоретико-множественным способом особенно критичны скорость и качество визуализации. Связано это с тем, что при традиционном подходе [13] к визуализации подобных данных, как в алгоритме сканирующих лучей (АСЛ раздел 6), ограничена возможность оптимального применения современных графических программных и технических средств. Однако, при традиционном подходе скорость визуализации можно увеличить за счет увеличения производительности процессора или параллельных вычислений. Проблемы:

1. Практически невозможно получить связанные контуры сечений сложных объектов в виде ориентированных полигонов сканированием лучами.
2. Чрезвычайно сложно в общем случае описать аналитически контуры плоских сечений ЛБП.
3. Затруднено решение задачи точного и быстрого определения габаритов объекта и его местоположения в пространстве.

## 2. Один способ задания произвольной геометрии трехмерного объекта

Кратко представим один из способов описания существенно трехмерной геометрии, который изложен в работах [5, 7]. Способ основывается на теоретико-множественном обосновании [8]. Обозначим трехмерный объект:  $G^*$ . Поверхность объекта  $G^*$  описывается множеством ПВП:  $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ .

Общие уравнения ПВП:

$$A_{xx}x^2 + A_{yy}y^2 + A_{zz}z^2 + A_{xy}xy + A_{xz}xz + A_{yz}yz + A_x x + A_y y + A_z z + A = 0.$$

Этой информации недостаточно для однозначного описания связанной топологии поверхности трехмерного объекта  $G^*$ . Геометрия поверхности объекта  $G^*$  задана однозначно [8], если:  $\forall A \in R^3 \Rightarrow A \in G^* \vee A \notin G^*$ , т. е. пространство  $R^3$  однозначно делится на два подпространства:  $R^3 = G^* \cup G^* | R^3$ . Однозначность описания поверхности объекта  $G^*$  достигается теоретико-множественными булевыми операциями над множеством  $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ . Булеву операцию обозначим:  $\otimes$ . Операция  $\otimes$  означает следующие операции:  $\cup$  - объединение,  $\cap$  - пересечение,  $|$  - дополнение,  $()$  - скобки. В результате, поверхность объекта  $G^*$  задана однозначно [8]:  $G^* = F_1 \otimes F_2 \otimes \dots \otimes F_n$ . (1)

Формализуем факт принадлежности произвольной точки  $A(x_w, y_w, z_w) \in R^3$  объекту  $G^*$ . Важно напомнить, что главное, чем определен выбор ПВП для описания геометрии объектов - это классом решаемых во РФЯЦ-ВНИИТФ задач численного моделирования.

**Свойство знакоопределенности:** поверхность  $F(X, Y, Z) = 0$  называется знакоопределенной, если  $\forall A(x_w, y_w, z_w) \in R^3 \Rightarrow F(x_w, y_w, z_w) = 0 \vee F(x_w, y_w, z_w) < 0 \vee F(x_w, y_w, z_w) > 0$ , то  $F(X, Y, Z)$  называется знакоопределенной.

Введем понятие логического индекса  $IND(F_i)$ , который характеризует положение точки  $A$  относительно каждой поверхности из множества  $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ . Согласно теории множеств индекс может принимать значения:  $I$  - истина или  $0$  - ложь. Согласно свойству знакоопределенности будет считать, если:  $F_i(x_w, y_w, z_w) = 0 \vee F_i(x_w, y_w, z_w) < 0$ , то  $IND(F_i) = 0$ , иначе  $IND(F_i) = 1$ .

Формализация факта принадлежности точки  $A(x_w, y_w, z_w)$  из  $R^3$  объекту  $G^*$ :  $A \in G^*$ , если  $IND(G^*) = IND(F_1) \otimes IND(F_2) \otimes \dots \otimes IND(F_n) = 1$ , иначе  $A \notin G^*$ .

## 3. Постановка задачи

Пусть задана конечная система трехмерных объектов:  $G = \{G_i\}$ , где  $i \in [1, m]$ . Каждый объект  $G_i$  задан как ЛБП (1). Пусть задана произвольная плоскость сечения (ПС)  $P$  в  $R^3$ :

$$A_p x + B_p y + C_p z + D_p = 0. \quad (2)$$

**Задача:** определить контур сечения объектов из  $G$  плоскостью  $P$  и визуализация найденных сечений, это означает - однозначно описать контур сечения и визуализировать его в  $R^2$ , в частности:

- прорисовать границы сечения;
- закрасить внутренность сечения.

**Допущение:** не ограничивая общности, будем рассматривать один ЛБП из системы  $G$ , обозначим его  $G^*$ . Алгоритм КОНТУР и АСЛ работают аналогично для других ЛБП из  $G$ .

Все заданные объекты определены в базовой декартовой системе координат (БСК). Это означает, что все коэффициенты ПВП  $F_i$  и коэффициенты в уравнении плоскости сечения  $P$  согласованы с БСК. Виртуальный экран, на котором будет формироваться изображение, принадлежит  $P$ . В реальных задачах численного моделирования ММК все объекты из  $G$  связаны иерархией (топологией) вложенности, которая определена конкретной конструкцией. В результате, всегда известна информация о вложенности объектов  $G_i$  друг в друга. Информация о вложенности является чрезвычайно полезной для увеличения скорости локализации контура и визуализации.

#### 4. Системы координат

С плоскостью  $P$  связывается экранная система координат (ЭСК). Реализация механизмов задания ПС, ее перемещение и повороты могут быть различными. От них зависит метод расчета взаимного расположения БСК и ЭСК. Уравнение (2) для  $P$  не определяет однозначно ЭСК, необходимы дополнительные условия. Всегда можно определить нормированную матрицу  $T$  преобразования координат из БСК в ЭСК и, соответственно, матрицу  $T^{-1}$  обратного преобразования из ЭСК в БСК [14]. На рисунке 1 приведена схема соответствия систем координат, которой пользуется автор. Обозначим координаты начала ЭСК в БСК:  $X_b, Y_b, Z_b$ .

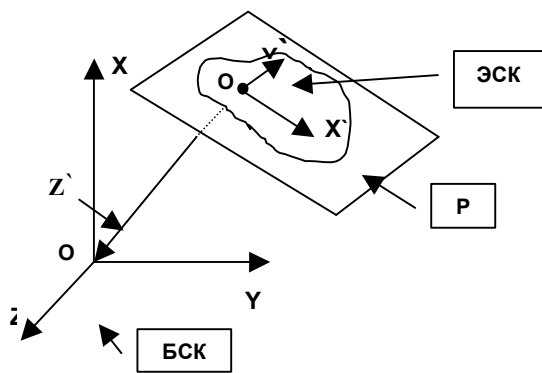


Рис. 1

Схема соответствия БСК и ЭСК.

Координаты некоторой точки из  $R^3$  в ЭСК могут быть преобразованы в БСК:  $(X, Y, Z) = (x, y, z) T^{-1}$ , где  $X, Y, Z$  – координаты в БСК, а  $x, y, z$  – координаты в ЭСК.

**Замечание 1:** в ЭСК  $\forall A \in P \Rightarrow z_a \equiv C \equiv Const$ .

Очевидное, на первый взгляд, замечание имеет решающее значение для применения алгоритмов локализации изолиний в  $R^2$  для локализации и описания контура сечения ЛБП.

#### 5. Габариты сечения объекта

Необходимо кратко обозначить одну из важных подзадач – определение описывающих габаритов потенциального сечения. Для успешной локализации контуров сечения в ПС нужно знать ориентировочные габариты сечения объекта. Трудность задачи заключается в сложности точного ее

решения в автоматическом режиме. Предлагается четыре варианта решения:

1. Эмпирический способ задания габаритов - исследователь задает ориентировочные габариты, опираясь на свои знания.
2. Автоматический способ заключается в грубом сканировании предполагаемого местоположения объекта.
3. Определение эмпирически или грубым сканированием “хорошей” внутренней точки объекта. Далее из этой точки выпускаются лучи сканирования и определяются граничные точки, которые и составляют ориентировочные габариты объекта.
4. Сочетание всех способов.

Допустим, что каким-то образом, габариты сечения объекта определены и приведены к ЭСК:

$X_{max}$  и  $X_{min}$  – габариты по оси  $X'$ ,  $Y_{max}$  и  $Y_{min}$  – габариты по оси  $Y'$ .

Найденные габариты определяют описывающий прямоугольник  $REG$  в ПС  $P$  (Рис. 2). С прямоугольником  $REG$  ассоциируется виртуальный экран, который будет соответствовать реальной области на экране монитора. В терминах компьютерной графики  $REG$  задает ViewPort видимости.

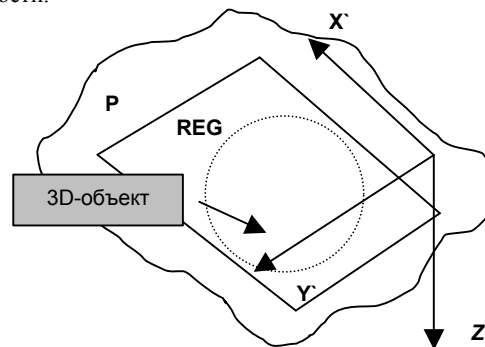


Рис. 2

Схема габаритного прямоугольника  $REG$  в ПС.

#### 6. Алгоритм сканирующих лучей

##### 6.1 Основная идея

Краткое рассмотрение АСЛ необходимо по следующим причинам:

1. АСЛ можно назвать классическим подходом.
2. Методический аспект для сравнения с алгоритмом КОНТУР.
3. Алгоритм КОНТУР базируется на двух процедурах из АСЛ для сбора предварительной информации.

На рисунке 3 схематично представлены описывающий прямоугольник  $REG$ , лучи сканирования параллельные оси  $X'$ , 3D-объект и выделено сечение. АСЛ позволяет последовательно найти точки пересечения лучей сканирования с границами объекта и, как следствие, все отрезки, которые составляют внутренность сечения (Рис.4).

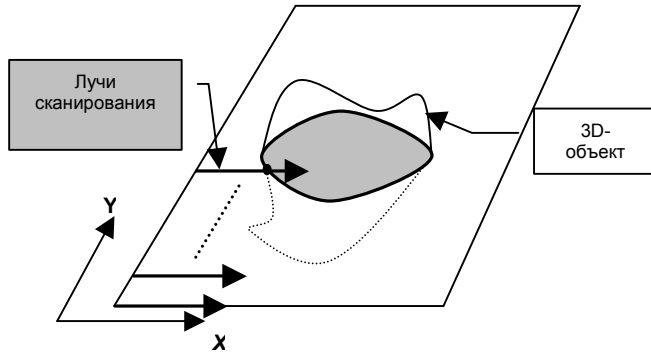
##### 6.2 Процедуры локализации

При реализации АСЛ и алгоритма КОНТУР основополагающее значение имеют две процедуры. Автором работы применялись процедуры, которые разработаны математиками РФЯЦ-ВНИИТФ и представлены в работе [5].

**Процедура 1.** Локализация точки из  $R^3$  относительно системы объектов  $G$ .

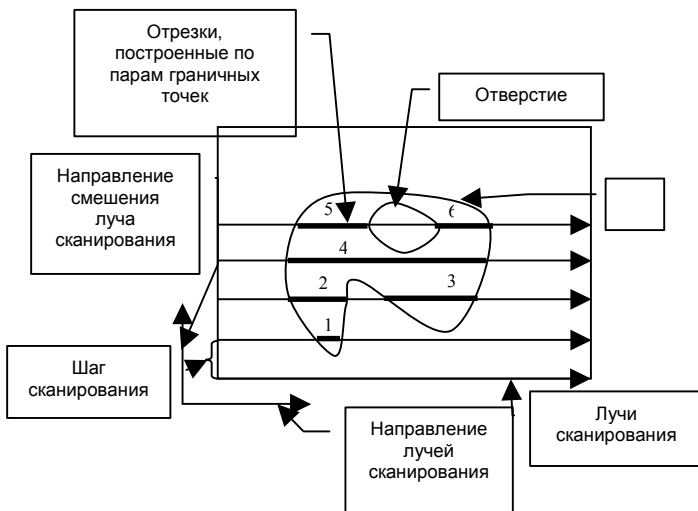
**Процедура 2.** Определение ближайшего расстояния от точки из  $R^3$  в заданном направлении до границы объекта  $G^*$ , из системы  $G$ .

Подробное описание данных процедур выходит за рамки этой работы, поэтому только кратко охарактеризуем способ их применения в данной работе, и, тем более, реализации этих процедур разными авторами различны. Данные процедуры работают в БСК. Реализация процедур основана на теоретико-множественном подходе с учетом информации о вложенности объектов в системе  $G$  и свойстве знакоопределенности.



**Рис. 3**

Схематичное представление 3D-объекта, его сечения и лучей сканирования.



**Рис. 4**

Схема представления внутренних отрезков сечения.

### 6.3 Локализация границ сечения АСЛ

Вводится одномерный список внутренних отрезков (СВО) для покоординатной последовательной записи граничных точек объекта  $G^*$ . Размерность СВО заранее не известна. Организуется сканирование области вывода  $VIEW$ , как показано на рисунке 4. Координата ординат начала всех лучей сканирования в области вывода  $VIEW$  равна 0. Длина лучей сканирования равна  $X\_View$ . Для каждого луча, применяя процедуры 1 и 2, локализуются последовательно все граничные точки объекта  $G^*$  и последовательно записываются в СВО.

### 6.4 Визуализация

Результатом работы АСЛ является последовательный, упорядоченный схемой сканирования СВО сечения объекта  $G^*$ , которые записан по координатам. На рисунке 4 схематично представлен результат сканирования. Внутренние

отрезки выделены толщиной. Эти отрезки пронумерованы согласно порядку их локализации.

**Пример:** Иллюстрации на Рисунках 7, 9, 10, 12, 13, 14, 19, 20, 21 получены сечением плоскостью  $Y = -1$  одного и того же объекта  $G^*$ . Объект  $G^*$  представляет собой муфту с разными радиусами кривизны (Рис. 5). На рисунке 6 представлено трехмерное изображение объекта  $G^*$ .

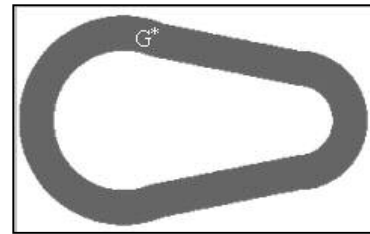
Объект  $G^*$  задан 12-тью поверхностями:

1.  $F_1: 5x + z - 15 = 0;$
2.  $F_2: x^2 + z^2 - 9 = 0;$
3.  $F_3: -5x + z - 15 = 0;$
4.  $F_4: x^2 + z^2 - 10z + 21 = 0;$
5.  $F_5: z = 0;$
6.  $F_6: z = -5;$
7.  $F_7: 5x + z - 10 = 0;$
8.  $F_8: x^2 + z^2 - 4 = 0;$
9.  $F_9: -5x + z - 10 = 0;$
10.  $F_{10}: x^2 + z^2 - 10z + 24 = 0;$
11.  $F_{11}: y = 0;$
12.  $F_{12}: y = -5.$

Теоретико-множественное описание объекта  $G^*$ :

$G^* = ((-2 \cup -4 \cup (+5 \cap -6 \cap -3 \cap -1)) \cap -11 \cap +12) \cap ((-8 \cup -10 \cup (+5 \cap -6 \cap -9 \cap -7)) \cap -11 \cap +12).$

Знаки  $\pm$  в формуле означают, какое подпространство  $R^3$  участвует в формуле, т. к. все поверхности знакоопределенные [6].



**Рис. 5**

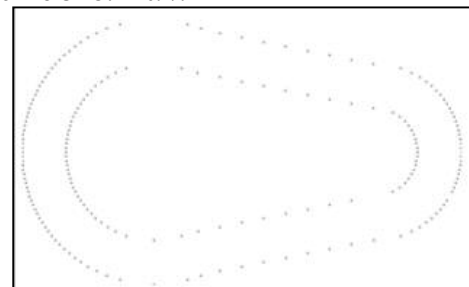
Сечение трехмерной муфты плоскостью  $Y = -1$ .



**Рис. 6**

Трехмерное представление объекта  $G^*$ .

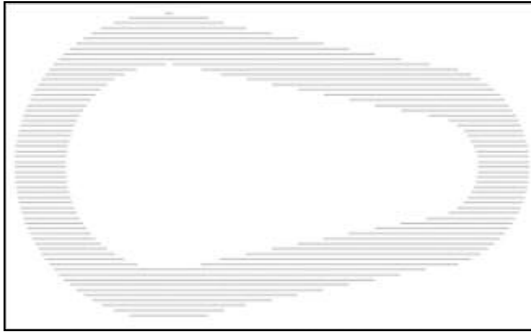
Для визуализации границ сечения объекта  $G^*$  достаточно нарисовать в области вывода  $VIEW$  все концевые точки отрезков из СВО. Рис. 7.



**Рис. 7**

Визуализация границы сечения.

Для визуализации внутренности сечения объекта  $G^*$  достаточно нарисовать последовательно в области вывода  $VIEW$  все отрезки СВО (Рис.8).



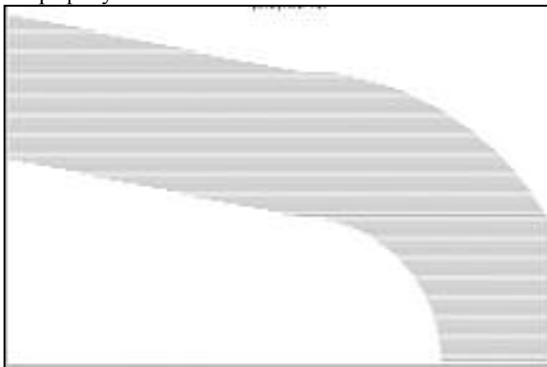
**Рис. 8**

Визуализация внутренности сечения при неплотном сканировании.

### 6.5 Недостатки АСЛ при визуализации сечений трехмерных объектов

#### Недостатки АСЛ и замечания:

1. В результате работы АСЛ описание границ сечения не получается в виде последовательного перечисления вершин контура сечения. Иными словами, контур сечения не описывается полигонами, поэтому рисование границ контура происходит по точкам (Рис. 7), а закрашка внутренности происходит с помощью прорисовки внутренних отрезков (Рис.8).
2. Возможен способ генерации последовательной линии контура сечения, в виде ориентированных полигонов после или во время работы АСЛ. Однако, при сложной геометрии (объекты с дырками, тонкие объекты, невыпуклые объекты) этот способ становится практически трудно применимым.
3. Для получения хорошего плотного изображения необходимо большое количество лучей сканирования. Пример плотного сканирования на рисунке 5.
4. Для качественной визуализации увеличенной части изображения нужно заново делать сканирование, т. к. изображение становится полосатым. Пример увеличенного участка показан на рисунке 9, который выделен на рисунке 10.
5. При визуализации границы контура по точкам на экране или на бумаге качество изображения плохое - очевиден лестничный эффект, разная видимая толщина линий. При этом подходе невозможно применить стандартные механизмы для качественного рисования, например, векторную графику. Рис. 10.

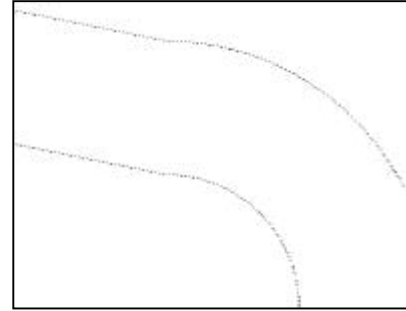


**Рис. 9**

Эффект при увеличении некоторой области плотного изображения.

6. Практика показала еще один значимый недостаток, который выявился при 3D-визуализации сечения, совместно с частью 3D-объекта. Закраска плоских фигур отрезками дает очень плохое качество при 3D-визуализации. Появляются просветы, т. к. нет необходимой плотности закрашки. Особенно это заметно при интерактивном трехмерном повороте объекта вместе с сечением.

В алгоритме КОНТУР остается неизменным принцип метода сканирования, меняется интерпретация и обработка результатов сканирования. В итоге алгоритм визуализации и генерации контура сечения становится существенно другим.



**Рис. 10**

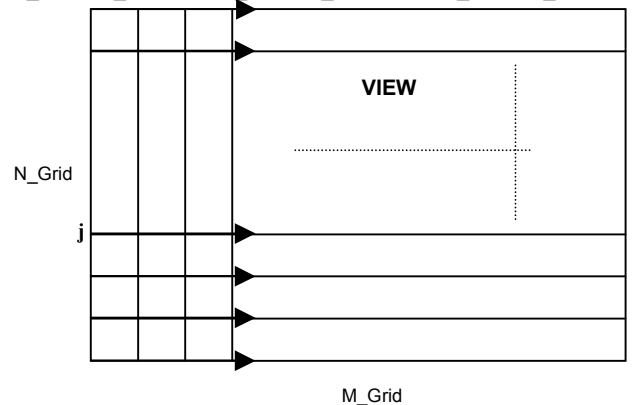
Представлено плохое качество рисования границ сечения АСЛ.

### 7. Алгоритм локализации и описания контура сечения последовательностью отрезков. Метод построения изолиний по специальному скалярному полю. (Алгоритм КОНТУР)

#### 7.1 Предварительные построения

**Основная идея:** Построить в области вывода *VIEW* на прямоугольной двумерной сетке специальное дискретное скалярное поле при помощи АСЛ, а затем с помощью любого корректного алгоритма генерации изолиний восстановить последовательный контур сечения 3D-объекта в виде полигонов.

В прямоугольной области вывода *VIEW* определим двумерную регулярную дополнительную сетку (ДС) размерностью (*M\_Grid* x *N\_Grid*) (Рис.11). Можно вычислить и явно записать координаты узлов ДС в БСК:  $X[M\_Grid, N\_Grid], Y[M\_Grid, N\_Grid], Z[M\_Grid, N\_Grid]$ .



**Рис. 11**

Способ построения ДС.

Для представления алгоритма рассматривается ДС, у которой направляющие являются горизонтальными и вертикальными. Введем специальную эмпирическую величину *DAT*, по которой будем строить скалярное поле.

Введем матрицу  $DAT[M\_Grid, N\_Grid]$  для записи специальной величины  $DAT$ , которая будет формироваться в узлах двумерной сетки. Смысл величины  $DAT$ : для каждого узла ДС можно определить принадлежит или не принадлежит узел внутренности сечения объекта  $G^*$ :  
 если  $DAT[i, j] \geq 0$ , то узел  $(i, j) \in$  сечению  $G^*$ ,  
 если  $DAT[i, j] < 0$ , то узел  $(i, j) \notin$  сечению  $G^*$ .

## 7.2 Генерация скалярного поля на дополнительной сетке горизонтальным сканированием

**Описание алгоритма генерации эмпирической величины  $DAT$  на ДС представлен по шагам.**

Заполнение  $DAT$  производим с помощью АСЛ по горизонтали (Рис. 11). Организуем цикл по горизонтальным лучам:  $j$  изменяется от  $\theta$  до  $N\_Grid$  (Рис.11). Иллюстрация алгоритма генерации и фрагмент ДС представлены на рисунке 12.

### Шаг 1.

Рассмотрим текущий луч  $j$ . Проанализируем точку начало луча:  $B = (X[0, j], Y[0, j])$ . Применим **процедуру 1**.

Если точка  $B \in G^*$ , то  $DAT[0, j] = 1$ ,

иначе  $B \notin G^*$  и  $DAT[0, j] = -1$ .

Пусть  $B \notin G^*$  и  $DAT[0, j] = -1$ .

### Шаг 2.

Выпускаем луч из точки  $B$  в некотором направлении, например, в горизонтальном направлении (Рис. 12).

Применяем **процедуру 2** с  $V$ -направляющим вектором.

Если точек пересечения с границей объекта  $G^*$  нет, тогда

$DAT[i, j] = DAT[0, j]$  для  $1 \leq i \leq M\_Grid$ .

Переходим к следующему лучу  $j+1$ , и на **Шаг 1**.

Если есть точка пересечения с границей объекта  $G^*$ :  $A(Xa, Ya)$ .

### Шаг 3.

Допустим точка  $A$  лежит между узлами  $(i-1, j)$  и  $(i, j)$ .

**Основной момент:** Необходимо, чтобы при линейной интерполяции величины  $DAT$  в точку  $A$  из узлов  $(i-1, j)$  и  $(i, j)$  значение  $DAT$  в точке  $A$  равнялось  $\theta$ , т. е.  $DAT(A) = \theta$ .

Следовательно, зная значение  $DAT$  в узле  $(i-1, j)$  и условие, что в точке  $A$  значение  $DAT$  должно равняться  $\theta$ , необходимо экстраполировать значение  $DAT$  в узел  $(i, j)$ . Вдоль

горизонтального направления изменяется координата  $X$ . Составим пропорцию:

$$(Xa - X[i-1, j]) / (X[i, j] - Xa) = DAT[i-1, j] / DAT[i, j];$$

Вычислим значение  $DAT$  в узле  $(i, j)$ :

$$DAT[i, j] = DAT[i-1, j] * ((X[i, j] - Xa) / (Xa - X[i-1, j])).$$

На рисунке 13 представлен график изменения величины  $DAT$  по направляющей сетки и показана линейная экстраполяция.

### Шаг 4.

Делаем замену текущей точки:  $B = A$ .

Затем из точки  $B$  выпускаем луч дальше, т. е. применяем **процедуру 2**:

Если нет точек пересечения с границей объекта  $G^*$ , тогда

$$DAT[k, j] = DAT[i, j] \text{ для } i+1 \leq k \leq M\_Grid.$$

Переходим к следующему лучу  $j+1$ , и на **Шаг 1**.

Если найдена точка пересечения с границей объекта  $G^*$ :  $A^*(Xa, Ya)$ . Допустим, что точка  $A^*$  лежит между узлами  $(k-1, j)$  и  $(k, j)$ , тогда  $DAT[n, j] = DAT[i, j]$  для  $i+1 \leq n \leq k-1$ .

Переход на **Шаг 4**.

**Алгоритм завершен.** Генерация эмпирической величины  $DAT$  на ДС закончена.

## 7.3 Генерация контура сечения

В результате генерации величины  $DAT$  получаем дискретное двумерное скалярное поле.

**Замечание 2:** Для найденного распределения величины  $DAT$  применяется любой корректный алгоритм построения изолинии на двумерной сетке по значению величины:  $DAT = \theta$ .

Результатом работы алгоритма построения изолинии, является последовательное описание соответствующей линии точками.

Автор применяет модифицированный алгоритм прослеживания изолинии из [15]. На рисунке 14 представлен результат работы алгоритма КОНУР с горизонтальной генерацией величины  $DAT$  и построенные изолинии.

### Выводы:

1. Гладкость линии контура сечения на всем контуре не отвечает требуемому качеству.
2. Слева и справа гладкость линии адекватная.
3. Необходимо дополнительно для генерации эмпирической величины  $DAT$  применить сканирование по вертикальным направляющим сетки.

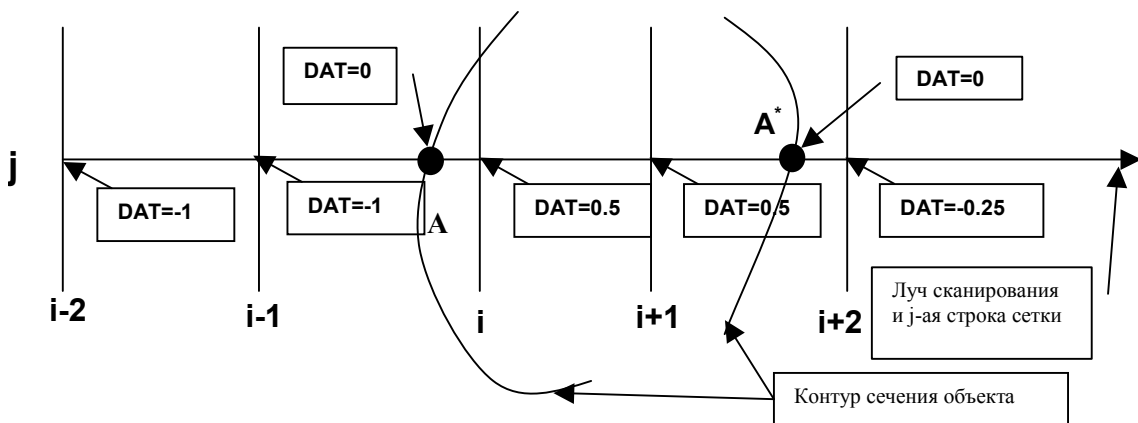


Рис. 12

Схема алгоритма генерации величины  $DAT$  на ДС.

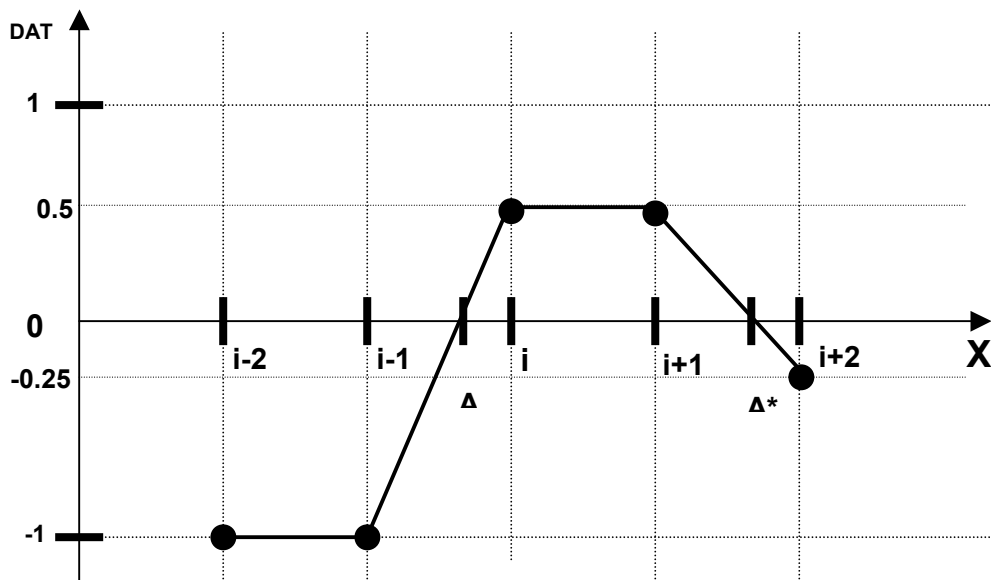


Рис. 13

График изменения величины DAT по лучу сканирования и пересечение луча с объектом  $G^*$  в точках  $A$  и  $A^*$ .

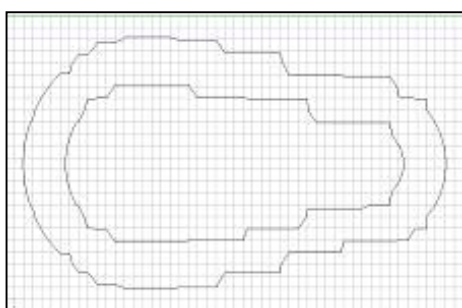


Рис. 14

Пример изображения контура сечения с горизонтальной генерацией величины  $DAT$ . Пример представлен на том же объекте, что и на рисунках 5-10.

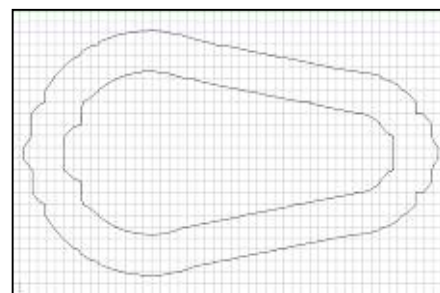


Рис. 15

Пример изображения контура сечения с вертикальной генерацией величины  $DATI$ . Пример представлен на том же объекте, что и на рисунках 5-10,14.

#### 7.4 Генерация скалярного поля на дополнительной сетке вертикальным сканированием

Введем эмпирическую величину  $DATI$ , которая аналогична по смыслу величине  $DAT$ , но формируется при помощи вертикального сканирования. Генерация величины  $DATI$  на ДС идентична, с точностью до перемены индексов узлов сетки, генерации величины  $DAT$  в разделе 7.2. По этой причине, нет необходимости повторять пошаговое описание алгоритма генерации величины  $DATI$ . Пусть массив  $DATI[M\_Grid, N\_Grid]$  сформирован. Далее повторяем работу раздела 7.3 по генерации изолинии для значения величины  $DATI = 0$ . На рисунке 15 представлен результат работы алгоритма КОНУР с вертикальной генерацией величины  $DATI$  и построенные изолинии (ДС размером 50x25).

##### Вывод:

1. Гладкость линии контура сечения на всем контуре не отвечает требуемому качеству
2. Вверху и внизу гладкость линии адекватная.
3. При построении изолинии необходимо учитывать обе накопленные эмпирические величины.

**Утверждение:** Корректное объединение накопленной информации в массивах  $DAT$  и  $DATI$  в один массив невозможно из-за корреляции величин.

#### 7.5 Интегральная генерация контура сечения объекта

Предлагается в процессе генерации изолинии учитывать значение то одной эмпирической величины, то другой. Кратко рассмотрим это решение при реализации одного алгоритма генерации изолинии из [15]. Построение изолинии происходит последовательно от одной ячейки сетки к соседней ячейке. Анализируются пересечения изолинией ребер ячейки и направление выхода изолинии из ячейки.

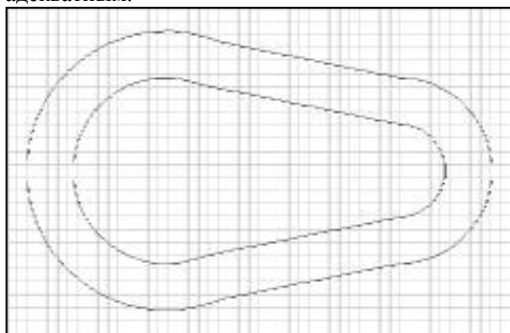
##### Алгоритм генерации изолинии остается без изменений.

Алгоритм дополняется проверкой двух условий:

1. Если изолиния пересекает горизонтальное ребро ячейки, то координаты ее точки пересечения с ребром находятся линейной интерполяцией, используя значения  $DAT$  в узлах соответствующего ребра.
2. Если изолиния пересекает вертикальное ребро ячейки, то координаты ее точки пересечения с ребром находятся линейной интерполяцией, используя значения  $DATI$  в узлах соответствующего ребра.

На рисунке 16 представлен результат работы интегрального алгоритма КОНУР с вертикальной и горизонтальной генерацией величин  $DAT$  и  $DATI$  соответственно (ДС размером 50x25).

**Вывод:** Найдено решение и построен алгоритм решения задачи локализации и последовательного описания границ сечения 3D-объекта, результат работы алгоритма КОНТУР является адекватным.



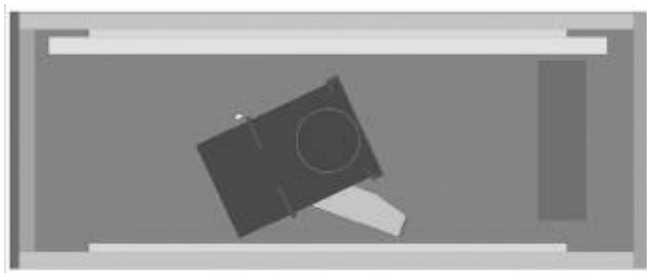
**Рис. 16**

Пример изображения контура сечения с горизонтальной и вертикальной генерацией величин  $DAT$  и  $DATI$ . Пример представлен на том же объекте, что на рисунках 5-10, 14, 15.

Алгоритм КОНТУР является алгоритмом второго порядка точности. Можно добиваться практически любой точности, гладкости и детализации линии контура, увеличивая локально или глобально размерность ДС. Если размерность сетки недостаточна, или толщина объекта очень мала, то между соседними узлами может попадать несколько граничных точек. Этот случай можно корректно обработать. Варианты обработки:

1. Между граничными точками поставить дополнительный узел, т. е. увеличить размерность сетки по одному из направлений на единицу.
2. Можно сослаться на грубую сетку и взять вместо двух граничных точек одну или же взять среднюю между ними точку.
3. Произвести рекурсивное деление ячейки.

На рисунке 17 представлен пример локализации и визуализации плоского сечения более сложного трехмерного объекта.



**Рис. 17**

Визуализация сечения плоскостью  $Y=0$  системы объектов.

## 8. Выводы и заключение

**Результат:** На базе генерации специальной двумерной дополнительной сетки и применения алгоритма построения изолинии разработан и реализован алгоритм КОНТУР для генерации последовательного контура плоского сечения трехмерного объекта.

**Выводы:**

1. Создан и реализован алгоритм **КОНТУР** для генерации плоского сечения трехмерных объектов, геометрия которых задана теоретико-множественными операциями.
2. В результате работы алгоритма **КОНТУР** сечения описываются в виде замкнутой последовательности отрезков, а не в виде набора внутренних отрезков.
3. Новое применение алгоритмам генерации изолиний.

4. Упрощается реализация и улучшается качество многих операций визуализации, например:

- Закраска внутренности сечения производится в виде закрашки полигона или треугольников, в отличие от рисования отрезками в АСЛ, что особенно важно в 3D-визуализации;
- Увеличение изображения становится более простой и быстрой операцией;
- При повороте объекта в плоскости сечения рисование границ и закрашка внутренности производится корректно, в отличие точечного рисования границ и закрашки отрезками в АСЛ;
- Проще и быстрее осуществляется экранное отсечение;
- Есть возможность качественного и корректного рисования линий на векторных печатных устройствах.

Идея алгоритма КОНТУР может быть перенесена на трехмерный случай для 3D-визуализации поверхности 3D-объекта. Эта идея уже реализована в системе **“VIZI\_PRIZMA”**. В результате поверхность 3D-объекта представлена в виде триангуляции, и ее вывод становится возможным с помощью функций OpenGL.

В заключение надо отметить, что описанные алгоритмы реализованы в системе научной визуализации **“VIZI\_PRIZMA”** и применяются для представления и контроля геометрии в ММК. Все иллюстрации были созданы в данной системе визуализации.

## 9. Литература

1. Thomas N. K. Goldfrey. Geometry in MCNP. LA-8353-MS, 1980.
2. Блыскавка А. А., Деева В. В., Прокофьева З. А. Расширение геометрических и некоторых функциональных возможностей программного комплекса ММКФК для расчета реакторов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. 1985. – Вып. 7.
3. James T. West. Sabrina – an Interactive Solid Geometry Modelling Program for Monte-Carlo // LA-UR-85-1175/ - 1985.
4. Осташенко С. В. Графические представления реакторных сборок в расчетах методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – 1989. – Вып. 2.
5. А.В. Адеев, И.В. Адеева, Н.А. Павлова. Теоретико-множественный подход для трехмерной геометрии в пакете программ МК на ЭЛБРУС-2 // VII Всесоюзное совещание “Методы Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике”. Тезисы докладов. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1991.
6. Огибин В. Н., Холушкин В. С., Нестеренко Л. В. Проблемно-ориентированный интерфейс для решения уравнений с частными производными // Вычислительные технологии. – Новосибирск: ИВТ РАН, 1992.
7. А.В. Адеев, И.В. Адеева, Н.А. Павлова О геометрическом обеспечении расчетов методом Монте-Карло в РФЯЦ-ВНИИТФ. Препринт №160. Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ. Снежинск. 1999.
8. Куратовский К., Мостовский А. Теория множеств. – М.: Мир, 1970.
9. В. П. Иванов, А. С. Батраков. Трехмерная компьютерная графика. Радио и связь. Москва. 1995.
10. Кандиев Я. З., Куропатенко Э. С., Лифанова И. В. и др. Расчет методом Монте-Карло взаимодействия частиц с веществом в программном комплексе ПРИЗМА. // Сборник тезисов докладов III



Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. – Тбилиси, 1981.

11. Arnautova M. A., Kandiev Ya. Z., Lukhminsky B. E., Malyshkin G.N. Monte Carlo Simulation in Nuclear Geophysics. Intercomparison of the PRIZMA Monte Carlo Program and Benchmark Experiments // Nucl. Geophys. – 1993. – Vol. 7, N3. – P. 407-418.
12. Kandiev Ya. Z., Malyshkin G. N. Modeling by Value Implemented in Prizma Code / V Joint Russian-American Computational Mathematics Conference. Sandia Report. SAN98-1591.-1998.-P. 149-158.
13. Roth S. D. Ray Casting for Modelling Solids // Comput. Graph. and Image Prog. – 1982. – Vol.18, N2.
14. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1968.
15. Баяковский Ю. М., Галактионов В. А., Михайлова Т. Н. Графор. Графическое расширение Фортрана. – М.:Наука, 1985.