

# Визуальный анализ движения жидкости в системе *FlowVision*

А.А. Аксенов, А.А. Дядькин  
Институт автоматизации проектирования РАН,  
Москва, Россия  
А.Ю. Сельвачев  
Московский физико-технический институт,  
Москва, Россия  
В.И. Похилко,  
Институт Математического моделирования РАН  
Москва, Россия  
С.В. Клименко,  
Институт высоких энергий РАН  
Протвино, Россия

## Аннотация

Приводится описание системы *FlowVision* v2.0 для решения задач динамики несжимаемой вязкой жидкости, ориентированной на использование совместно с системами автоматизированного проектирования (САПР). Системы САПР используются для генерации геометрической информации о форме расчетной области, которая импортируется *FlowVision* в формате VRML. Система представляет собой интегрированную среду, в которой препроцессор и блок решения сопряжены с системой визуального анализа течений жидкости.

В качестве примера использования *FlowVision* для решения практических задач приводятся результаты визуального анализа аквапланирования автомобильного колеса.

**Ключевые слова:** *Моделирование Движение жидкости, визуализация, моделирование.*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Создание любого объекта проходит долгий путь от идеи, технического задания, проекта через стадии экспериментальной доводки, до объекта, функционирующего согласно первоначальной идее. Конечная цель САПР - сократить этот путь до минимума, в идеале иметь цепочку Идея - САПР - Изготовление - Объект. Для достижения этой цели САПР должна предсказывать функциональные свойства проектируемого объекта. Это обеспечивается подсистемами автоматизированного инженерного проектирования (САИП), включающими, например, расчет прочностных свойств объекта, его взаимодействие с окружающей средой и с рабочим телом. Развитие САИП, предназначенных для моделирования взаимодействия объекта с жидкостью, тесно связано с развитием индустриальной вычислительной гидродинамики (ИВГД).

Круг задач ИВГД широк - от обтекания самолета до течения питательной среды в

биореакторе для выращивания живых клеток. Соответственно обширно и число моделей этих течений.

На подходы и методы моделирования движения жидкости накладывается условие их интегрируемости с САПР. Для реализации этого условия необходимо преодолеть барьер между методами вычислительной гидродинамики и САПР, который заключается в том, что геометрия объектов в САПР задается в виде поверхностей, а для методов вычислительной гидродинамики необходима генерация объемной сетки между поверхностями этих объектов.

Существует несколько типов сеток, которые отличаются друг от друга формой образующих ее ячеек [1]. Наиболее используемыми являются сетки из тетраэдров и из шестигранников.

Методы генерации неструктурированной сетки из тетраэдров в настоящее время хорошо отработаны и широко используются для решения прочностных задач методами конечных элементов. Однако точность и скорость решения уравнений гидродинамики на такой сетке является невысокой по сравнению со скоростью расчета на структурированной сетке из шестигранников. На сегодняшний день построение сетки из шестигранников без “плохих” ячеек (т. е. ячеек с большим отношением площадей сторон) представляет собой серьезную проблему.

В задачах ИВГД обычно присутствует большая разница пространственных масштабов, сложная геометрия объектов в расчетной области и широкий набор физико-химических процессов и явлений, подлежащих учету при моделировании поведения объекта. Все эти процессы необходимо разрешать с высокой точностью и максимально быстро. Это достигается использованием расчетных сеток, адаптирующихся к решению и геометрическим особенностям расчетной области. Причем использование адаптивной сетки целесообразно только при наличии быстрой системы ее генерации и адаптации.

В настоящей работе рассматривается система *FlowVision* [2,3], использующая метод расчета уравнений гидродинамики, ориентированный на интеграцию в САПР. В системе используется прямоугольная сетка в области расчета, генерация которой не зависит от геометрии объектов. Поверхность объектов представляется в виде плоских фасеток, созданных в САПР. Для учета граничных условий на поверхностях объектов применяется метод подсеточного разрешения геометрии. Метод решения уравнений основан на конечно-объемном подходе.

Подсистема инженерного проектирования, кроме сопряжения по форматам данным с системами САПР, должна иметь соответствующий пользовательский интерфейс. Интерфейс должен подчиняться принципу WYSIWYG и быть максимально приближен к стандартам, принятым в интерфейсах САПР. Чтобы удовлетворить этим принципам, система *FlowVision* оснащена встроенным блоком визуального анализа гидродинамических течений. Блок визуального анализа работает параллельно на всех стадиях расчета – как препроцессор во время задания исходных данных, как средство быстрого анализа сходимости решения при работе блока расчета, как постпроцессор для анализа полученных результатов. В качестве базового принципа построения пользовательского интерфейса взята идеология, принятая в системах САПР Unigraphics и SolidWorks. Интерфейс имеет два взаимозависимых окна – графическое окно и окно рабочего со структурированным описанием задачи.

Для иллюстрации возможностей моделирования и визуализации *FlowVision*, в настоящей работе приводятся результаты решения задачи обтекания автомобильного колеса, движущегося по слою воды небольшой толщины на дороге (аквапланирование автомобильного колеса). Визуализация поверхности воды позволила понять влияние рисунка протектора шины на структуру течения воды.

## 2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ

### 2.1 Адаптивная сетка с локальным измельчением

Для разрешения малых деталей геометрии расчетной области и высоких градиентов рассчитываемых величин в настоящей работе используется прямоугольная адаптивная локально измельченная сетка (АЛИС).

Сущность 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 ограничить друг с другом только ячейки с номерами уровней, отличающимися не более, чем на единицу.

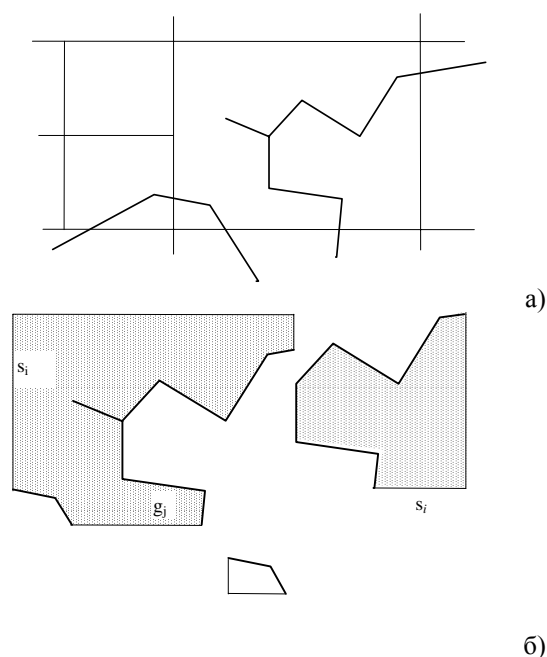
Традиционно в подсистемах САИП для моделирования движения жидкости используются неструктурированные сетки (для систем на базе конечно-элементных методов), либо структурированные мультиблоковые сетки (для конечно-объемных и конечно-разностных методов). Ячейки таких сеток вдали от границ расчетной области 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 'ступеньками' (первым порядком точности). Повышение порядка разбиения сетки около поверхностей позволяет уменьшить вносимую такой аппроксимацией погрешность, но может потребовать слишком больших ресурсов компьютера, что не позволительно для САПР. В системе *FlowVision* используется новый подход описания произвольной криволинейной геометрии на прямоугольной сетке с использованием метода подсеточного разрешения геометрии.

### 2.2 Метод подсеточного разрешения геометрии

Метод подсеточного разрешения геометрии позволяет преодолеть барьера между САПР и системами моделирования движения жидкости. Из САПР импортируется информация о поверхности объекта в виде набора плоских, выпуклых, непересекающихся фасеток (через форматы VRML или STL). На обеих поверхностях фасеток ставятся граничные условия и указывается набор уравнений гидродинамики, которые необходимо решать по ту или иную сторону фасетки.



**Рис. 1.** Подсеточное разрешение геометрии. а) выделение фасеток, пересекающих ячейки сетки; б) разъединение ячеек сетки на конечные объемы

Пусть в расчетной области задана АЛИС. На первом этапе алгоритма определяются какие фасетки, формирующие геометрию расчетной области, попали в ячейки сетки (рис. 1а). Части фасеток, попавшие внутрь ячеек, назовем осколками фасеток; части граней ячеек, отсекаемые фасетками, назовем осколками граней. Затем ячейка сетки делится на конечные объемы  $V_i$ , ограниченные гранями ячеек  $s_i$  (или осколками ячеек) и фасетками  $g_j$  (или осколками фасеток) (рис. 1б). Если в ячейке нет фасеток, то конечный объем совпадает с ней.

Расчетная сетка, полученная таким образом, состоит из прямоугольных ячеек и ячеек произвольной формы. Уравнения гидродинамики аппроксимируются на такого рода сетке конечно-объемным методом, описанным в работе [2].

### 3. СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Интерфейс пользователя в системе *FlowVision* реализован с помощью двух взаимосвязанных окон (рис. 2). Одно из окон предназначено для отображения графических объектов – геометрии и результатов визуализации течения жидкости. В другом окне отображается текстовая информация, которая организована в виде дерева объектов. Последнее окно обычно называется "Рабочее пространство". Подобный интерфейс является в настоящее время стандартным для большого количества программ под Windows 95/NT.

Окно рабочего пространства имеет три раздела – постпроцессор, препроцессор и справочник. Раздел препроцессора состоит из папок граничных условий ("B-Conditions"), геометрии расчетной области ("Geometry"), параметров ("Parameters") и сетки ("Grid"). В папке граничных условий содержатся все типы граничных условий, заданные для конкретной задачи моделирования движения жидкости. В папке геометрии в виде дерева хранится информация о фасетках, образующих поверхность расчетной области. В папке параметров задаются константы математической модели движения жидкости (вязкость, плотность и т.д.) и параметры методов расчета основных уравнений (количества итераций, числа релаксации и т.п.). В папке сетки задается сетка первого уровня и условия адаптации сетки.

Графическое окно реагирует на выделение пунктов из окна рабочего пространства. Например, выделение фасетки из папки геометрии вызовет изменение способа отображения этой фасетки в графическом окне. Выделение граничного условия вызовет отображение всех поверхностей фасеток, которым это граничное условие принадлежит (рис. 3).

Раздел постпроцессора (рис. 4) имеет три папки – переменные ("Variables") слои ("Layers") и объекты ("Objects"). Целью визуализатора данных является составление итогового изображения из различных частей – слоев. Под слоем понимается любое изображение, появляющееся в графическом окне. Например, слоями являются изображения геометрии расчетной области, орт системы координат или поля скорости в плоскости, проходящей через расчетную область.

Набор из трех папок в разделе постпроцессора определяет три способа задания пользователем последовательности своих действий для составления изображения. Можно создать слой, открыв папку "переменные" и, выбрав переменную (например, компоненту скорости), визуализировать ее на различных геометрических объектах (объем, поверхность и т.д.) с помощью соответствующего метода, который совместим с данным геометрическим объектом. Например, визуализация изолиниями возможна при отрисовке на поверхности, объемная визуализация – в объеме.

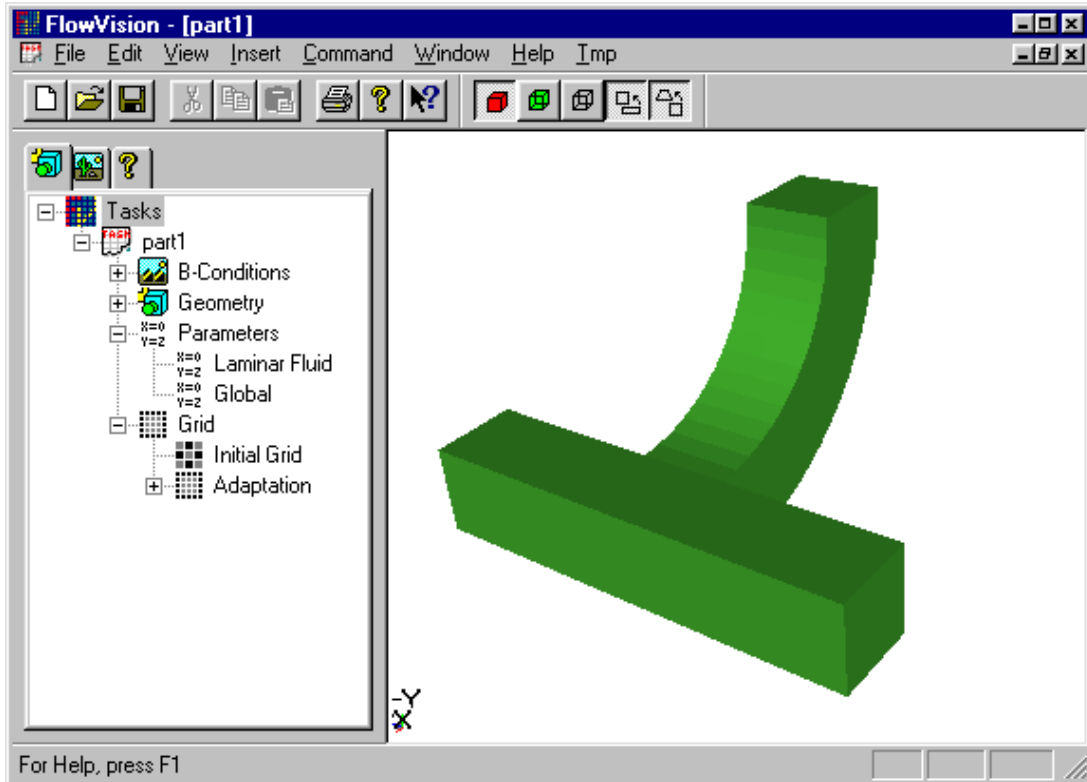


Рис. 2. Общий вид системы визуального анализа

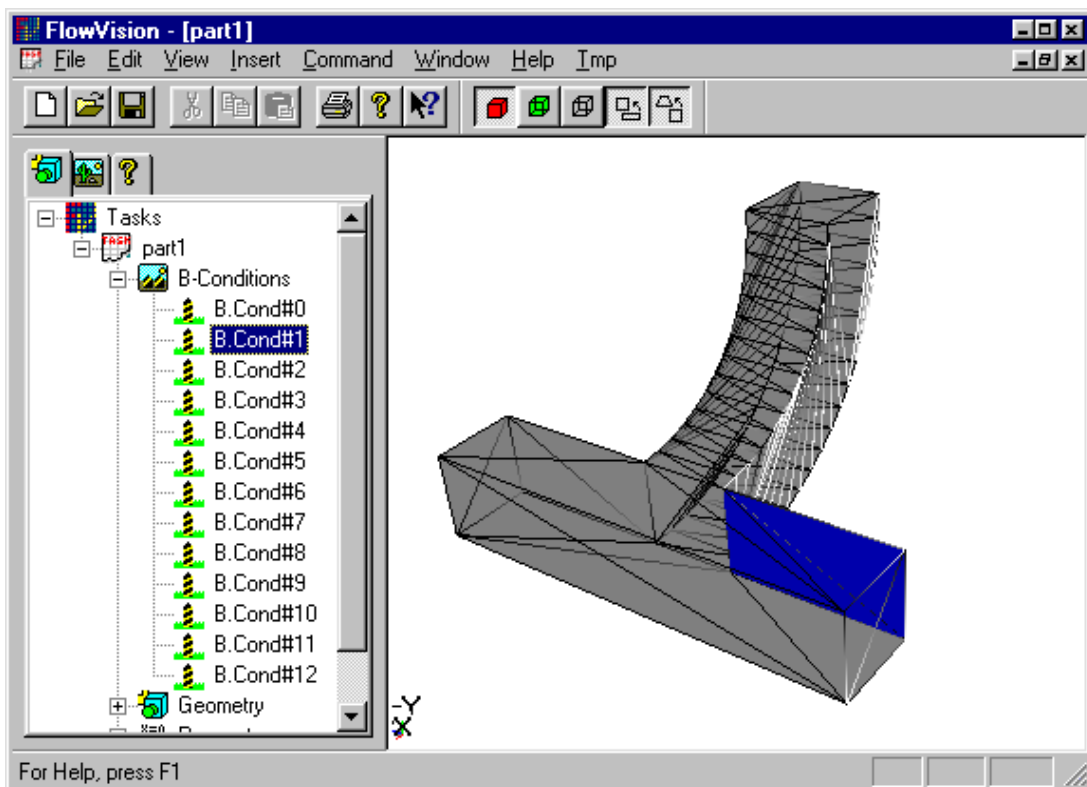


Рис. 3. Отображение элементов окна рабочего пространства в графическом окне

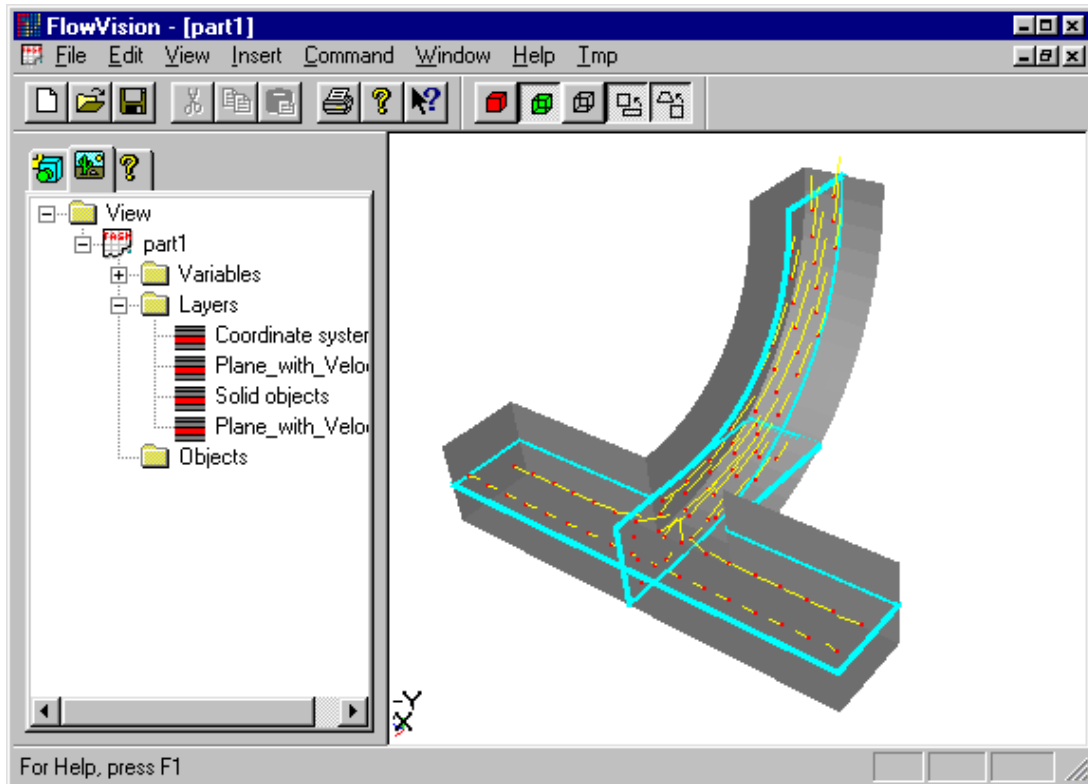


Рис. 4. Раздел постпроцессора.  
Визуализация движения жидкости векторами скорости.

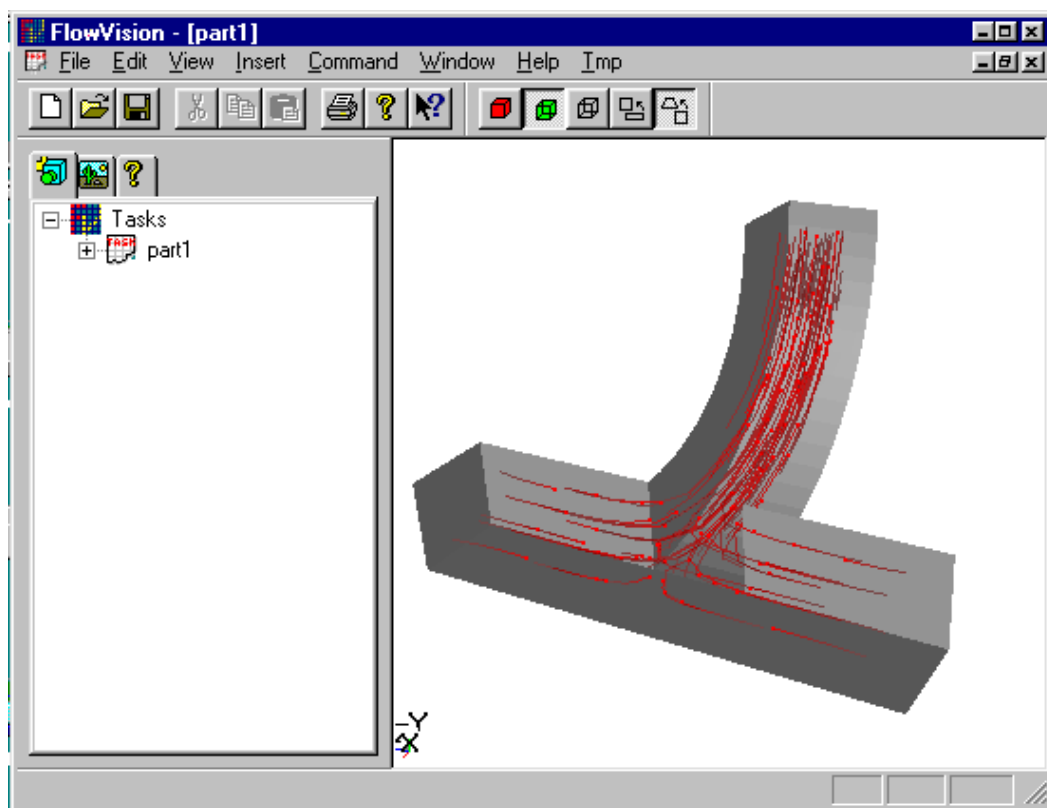


Рис. 5. Объемно-анимационная визуализация движения жидкости маркерами.

Можно создать слой, выбирая геометрический объект из папки объектов и задавая его метод визуализации. Третий способ – создать слой непосредственно из папки слоев, одновременно выбирая переменную, геометрический объект и способ визуализации. В каждой папке определены операции показа/сокрытия/удаления слоев и геометрических объектов. Таким образом, в рассматриваемой системе визуального анализа предусмотрено несколько путей создания итогового изображения. Цель такого построения интерфейса заключается в обеспечении гибкого, быстрого и понятного для пользователя создания изображения.

Наряду с традиционными методами визуализации гидродинамических данных (отрисовка в плоскостях, изоповерхности и объемная визуализация) в системе *FlowVision* большое внимание уделяется объемно-анимационным методам визуализации. На рис. 5 показана визуализация течения жидкости с помощью маркеров, хаотически рождающихся в объеме расчетной области и имеющих некоторое одинаковое для всех время жизни. Такой подход позволяет исследователю качественно представить сложное трехмерное течение в целом, чтобы выявить особенности течения (например возвратные и застойные зоны), структура которых далее может быть исследована с помощью традиционных методов.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКВАПЛАНИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО КОЛЕСА

В настоящем разделе приводятся результаты численного моделирования аквапланирования автомобильного колеса – движения колеса по слою воды на дороге [2,4]. Рассматривается упрощенная конструкция колеса, показанная на рис. 6. Радиус колеса полагается равным 33 см (13 дюймов), ширина 20 см. Рисунок протектора составлен из каналов, которые наклонены к оси колеса под углом  $\phi$ , равным  $0^\circ$ ;  $12,5^\circ$ ;  $25^\circ$  для разных расчетов. Глубина каналов и глубина водного слоя на поверхности дороги равна 2 см. Все вычисления проводились для скорости автомобиля 20 м/с (76 км/час).

В расчетах АЛИС адаптировалась только к особенностям протектора колеса. Результирующее измельчение сетки вблизи протектора в плоскости симметрии колеса показано на рис. 7.

Поверхность воды, возмущенная движением автомобильного колеса, показана на рис. 8. Поверхность воды реконструировалась из поля плотности как изоповерхность постоянного уровня. На рис. 8 видны две волны, распространяющиеся от колеса – носовая и кормовая, которые аналогичны корабельным волнам. Непосредственно за колесом поднимается столб воды и брызг, которые моделируются в настоящем методе как среда с меньшей, чем у воды, плотностью. За колесом

образуется дорожка пониженной толщины воды, причем ближе к колесу водный слой может исчезать, оголяя дорогу.

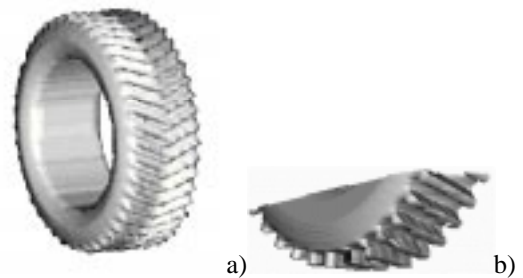


Рис. 6. Модель автомобильного колеса с наклонными каналами протектора; а) колесо полностью, б) рассчитываемая часть

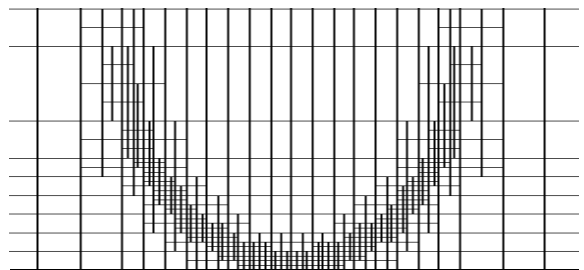


Рис. 7. Локальное измельчение сетки вблизи протектора

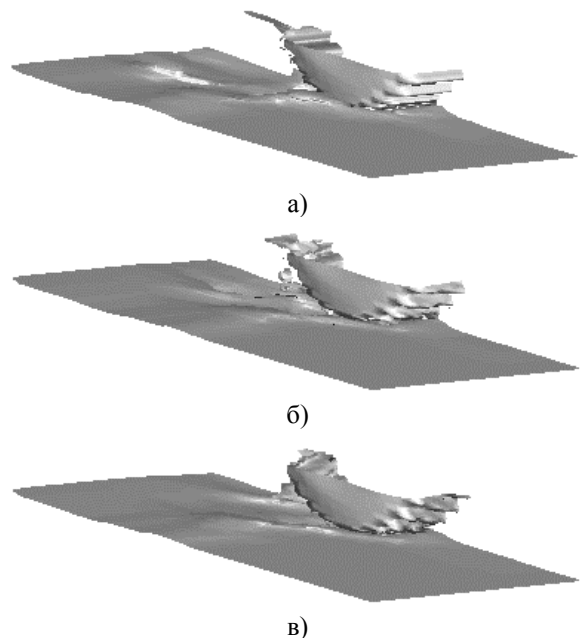


Рис. 8. Поверхность воды вокруг колеса для  $\phi = 0^\circ$ (а),  $12,5^\circ$ (б),  $25^\circ$ (в)

Подобного рода расчеты, показанные в настоящем разделе, занимают большое время работы

компьютера – от нескольких часов до нескольких суток. В силу этого пользователю необходимо контролировать процесс расчета – принимать решение об окончании процесса моделирования, изменении параметров методов расчета и т.д. Как показывает практика, очень важным является контроль задания исходных данных: правильность задания граничных условий, параметров математической модели движения жидкости. В системе **FlowVision** блок визуального анализа, работающий параллельно блоку решения гидродинамических уравнений, позволяет осуществлять такой контроль непосредственно в процессе моделирования. В приведенном примере еще на начальных этапах расчета по форме поверхности воды (сильно возмущенная поверхность – большая подъемная сила, слабо возмущенная – малая подъемная сила) можно оценить качество того или иного рисунка протектора, не дожидаясь получения окончательного результата и его всестороннего анализа.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описана система инженерного автоматизированного проектирования **FlowVision**, предназначенная для моделирования движения жидкости в технических устройствах различного назначения. Моделирование движения жидкости происходит путем моделирования уравнений гидродинамики с помощью конечно-объемного метода, использующего прямоугольную сетку совместно с методом подсеточного разрешения геометрии.

**FlowVision** совместим с системами САПР как по входным данным (через формат VRML), так и по идеологии построения интерфейса пользователя.

Работа проводилась при финансировании РФФИ, гранты № 96-01-1273 и № 98-01-00484.

## 6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. //М., Мир, 1991.

[2] 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.

[3] Аксенов А.А., Гудзовский А.В., Дядькин А.А., Тишин А.П. Смещение газов при вдуве низконапорной струи в поперечный поток // Известия Академии наук. серия Механика жидкости и газа, 1996, №3, с. 67-74.

[4] Zmindak M., Grajciar I. Simulation of the Aquaplane Problem // Computer & Structures, Vol. 64, No. 5/6, 1997, pp. 1155-1164.

## Авторы:

Андрей Аксенов, старший научный сотрудник и  
Александр Дядькин, научный сотрудник  
Института автоматизации проектирования РАН  
2-я Брестская, 19/18, Москва, Россия  
Телефон: (095) 250-92-51

E-mail: flowvision@glas.apc.org

Александр Сельвачев, студент,  
Московского физико-технического института  
Институтский пер. 9, Долгопрудный М.о., Россия  
Телефон: (095) 250-92-51

E-mail: flowvision@glas.apc.org

Виктор Похилко, старший научный сотрудник  
Института автоматизации проектирования РАН  
2-я Брестская, 19/18, Москва, Россия  
Телефон: (095) 250-92-51

E-mail: flowvision@glas.apc.org

Станислав Клименко, нач. отдела  
Института высоких энергий РАН  
Протвино, Россия

Телефон: (095) 258-38-01

E-mail: klimenko@mx.ihep.su

## Visual analyzing fluid flows by **FlowVision**

A.A. Aksenov, A.A. Dyadkin  
Institute for Computer Aided Design of RAS,  
A.U. Selvachev  
Moscow Institute of Physics and Technology  
V.I. Pokhilko,  
Insitute for Mathematical Modelling of RAS  
С.В. Клименко,  
Institute for High Energy of RAS

## Abstract

System **FlowVision** v2.0 for modeling fluid flows in industrial applications is described. The system is created for use with computer aided design (CAD) systems. CAD systems are used as geometry generators. **FlowVision** imports geometry in VRML format. **FlowVision** is integrated system, where pre-processor and solver of the system is controlled by system of visual analysis of fluid motion. Results of modeling and visual analysis of car tire aquaplane problem is presented as example of using **FlowVision** for solving practical problems

**Key words:** Computational fluid dynamics, fluid visualization, industrial flows.