

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 518 : 533.6

М. К. Лебедева, А. Е. Медведев, Г. А. Тарнавский  
(Новосибирск)

БАЗА ДАННЫХ ExtFlow2 ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ  
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ  
ВНЕШНЕЙ АЭРОДИНАМИКИ

Изложено общее описание базы данных ExtFlow2, предназначенной для информационной поддержки научных исследований в области численного моделирования обтекания тел различной конфигурации потоком вязкого теплопроводного газа в приближении полных уравнений Навье — Стокса.

**1. Общее описание базы данных. 1. Предметная область научных знаний.** База данных ExtFlow2 предназначена для информационной поддержки фундаментальных и прикладных исследований в области аэродинамики и физической газовой динамики на основе численного моделирования обтекания тел конечного размера сверхзвуковым потоком вязкого теплопроводного газа, в том числе отрывных и безотрывных течений над поверхностью тела, а также в ближнем и дальнем следе за ним. Конфигурация рассматриваемых тел приведена на рис. 1.

Используемое математическое описание физического процесса — модель полных уравнений Навье — Стокса (осредненных по Рейнольдсу). Прототип (первая версия) представляемой БД опирался на проведенные теоретические и вычислительные разработки [1—8] и успешно функционировал в 1980—1990 гг. на ЭВМ типа БЭСМ-6 и «Эльбрус». Настоящая (вторая) версия БД ориентирована на ПЭВМ типа IBM PC и содержит результаты расчетов обтекания тел каплеобразной формы (затупленный по сфере обратный конус с углом полураствора  $\beta$ ) в широком диапазоне определяющих параметров  $2 \leq M_\infty \leq 15$ ,  $10 \leq Re_\infty \leq 10^6$ ,  $1,1 \leq \gamma \leq 1,7$ ,  $0,1 \leq T_w/T_0 \leq 1$  и  $15^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$ , где  $M_\infty$  и  $Re_\infty$  — числа Маха и Рейнольдса набегающего потока,  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $T_w$  — температура тела,  $T_0$  — температура торможения (в БД содержатся также результаты расчетов обтекания теплоизолированных тел).

**2. Назначение базы данных.** БД ExtFlow2 создана и развивается для сохранения и распространения результатов научной деятельности в области вычислительной аэродинамики (методы, алгоритмы, программы и расчетные данные), хранения и систематизации накопленной информации, обеспе-

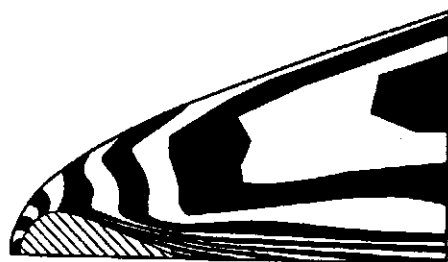


Рис. 1. Одна из конфигураций обтекаемых тел. Изолинии числа Маха в возмущенной области течения

чения непрерывности научного прогресса и его ускорения в данной области знания за счет преемственности осуществленных разработок. Возможно широкое применение БД, подразделяющееся на два основных направления: 1) электронный справочник; 2) инструментарий для научных исследований — и ориентированное на использование в научных, научно-технических и конструкторских организациях, в высших и средних учебных заведениях авиационного и аэрокосмического профиля.

2.1. Электронный справочник. Настоящая БД может быть использована как электронный справочник уже проведенных и хранящихся в ней результатов расчетов для детального анализа или учебной демонстрации полей течения, его структур, локальных и интегральных аэродинамических характеристик, распределения газодинамических величин и влияния на них определяющих задачу параметров — вариации геометрии тела, тепловых условий на его поверхности, чисел Маха, Рейнольдса набегающего потока и т. п.

2.2. Инструментарий для научных исследований. Настоящая БД может быть использована в качестве инструментальной поддержки для проведения расчетов новых классов задач как процессорная система и как генератор наиболее подходящих начальных данных в целях существенного снижения затрат машинного времени; следует отметить при этом, что в некоторых диапазонах определяющих параметров проведение новых расчетов весьма затруднено (или даже невозможно) без использования адекватных начальных распределений газодинамических величин, имеющихся в БД.

Другим важным аспектом применения БД является возможность получения приближенной информации для новых задач вообще без проведения расчетов путем интерполяции по имеющимся в БД решениям.

3. *Архитектура базы данных.* Данная ассоциативно-реляционная БД имеет следующие структуры, определяющие его функционирование: архив (АБД), систему управления (СУБД), каталог (КБД), справочную систему (ССБД), административную систему (АСБД) и ряд оболочек, представляющих эффективную технологию подготовки и проведения работы с БД, ориентированную на широкий круг пользователей. Архитектура БД представлена на рис. 2.

3.1. Архив. АБД представляет собой многомерное дискретное квазипространство с координатными осями (направлениями)  $G, M, Re, T, \gamma$ , каждая точка которого есть поле записи результатов расчета соответствующей задачи в предметной области (аэродинамике). Здесь  $G$  — геометрия поверхности движущегося в газе тела;  $M, Re$  — числа Маха и Рейнольдса набегающего потока,  $T$  — тепловые условия на поверхности тела,  $\gamma$  — эффективный показатель адиабаты.

3.1.1. Источники данных. Источниками данных являются проведенные в 1978—1994 гг. многопараметрические циклы расчетов обтекания тел различной конфигурации потоком вязкого теплопроводного газа в широком диапазоне определяющих параметров и пополняющиеся новыми расчетными данными. Данные размещены на встроенном диске и дублированы на внешних носителях (дискетах).

3.1.2. Структура и значение данных. Каждое поле записи (точка в пространстве АБД) имеет стандартизированную форму и представляется в виде ряда чисел:  $I, J, K, R, X, \rho, U, V, W, E$ , где  $I, J, K$  — размерности конечно-разностной сетки, на которой проводилось решение;  $R, X, \rho, U, V, W, E$  — массивы координат узлов сетки, плотности, компонент скорости и удельной внутренней энергии размерностью  $I \times J \times K$ . По этим данным и содержащимся в КБД сведениям о расчете могут быть получены любые другие поля газодинамических функций, локальные и интегральные аэродинамические характеристики тела.

Файлы расчетов, относящихся к обтеканию головных частей тела, течения над его кормой и в ближнем следе, размещены отдельно.

3.2. Каталог. КБД содержит сведения о полях АБД, которые необходимы для функционирования ряда программ СУБД, обеспечивающих нахождение заказанного пользователем (одного или нескольких) файлов АБД.

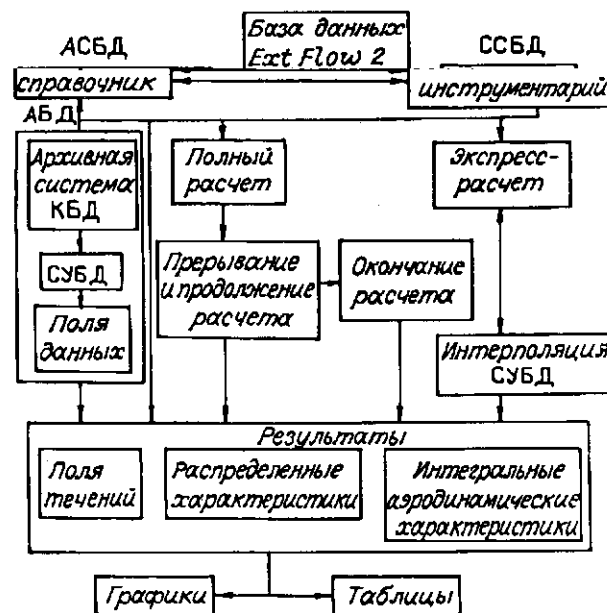


Рис. 2. Архитектура БД ExtFlow2

3.3. Система управления. СУБД является сложным комплексом программ многоцелевого назначения. Основные функции СУБД: обеспечение взаимодействия пользователя с БД, поиск затребованных полей АБД, обработка вызванных полей АБД, предоставление информации в графическом и (или) табличном виде; проведение расчетов новых задач и размещение полученных результатов в АБД и сведений о них в КБД.

3.4. Административная система. АСБД предназначена для решения организационных вопросов по эксплуатации и развитию БД: привязки компонент БД к аппаратному и программному окружению, развития средств СУБД (подключение новых модулей, организация и реорганизация структур данных и т. д.); организации и сопровождения информационного фонда БД, организации справочной системы по текущему состоянию БД, определения списка пользователей БД и их статуса.

3.5. Справочная система. СББД обеспечивает пользователя необходимой для работы со всеми системами БД информацией, содержащей общее описание БД и ее отдельных компонент, диапазоны допустимого изменения входных данных, список выдаваемой выходной информации и т. п., а также диалоговый режим контекстной помощи "Help" пользователю в затруднительных ситуациях.

3.6. Оболочки. Оболочки БД организованы в единую многоуровневую систему, обеспечивающую: предварительную настройку БД под конкретную ПЭВМ, входы в главные режимы работы БД (электронный справочник, вычислительный инструментарий), просмотр результатов работы программ БД в табличном и графическом виде, сохранение состояния проводящегося расчета и при необходимости его продолжение, вызов электронного справочника и контекстной помощи на любом уровне работы с оболочкой БД, работу с вычислительным инструментарием БД (расчетные модули, модуль

расчета параметров стандартной атмосферы, модули графической обработки результатов и модули настройки БД под конкретную ПЭВМ).

П. Инструментальная поддержка базы данных. 1. *Общее описание системной части базы данных.* База данных ExtFlow2 представляет собой единый комплекс программ, работающих только под управлением инструментальной оболочки.

Назначение инструментальной оболочки: организация дружественного интерфейса с пользователем, настройка базы данных ExtFlow2 на конкретную ПЭВМ и на конкретный вариант расчетной задачи, ведение протокола работы с базой данных, контекстная помощь пользователю на всех этапах работы с базой данных, организация системного интерфейса между программными модулями базы данных.

Инструментальная оболочка БД ExtFlow2 позволяет пользователю: считывать данные из архива БД, записывать данные в архив БД (доступно только по паролю или для администратора БД), проводить расчеты конкретных вариантов задач как для данных, взятых из архива, так и для новых данных, не представленных в архиве (доступно только для администратора БД), получать результаты расчета в графическом виде (одно- и двумерные графики, изолинии полей, линии тока, векторы скоростей — более 50 различных графиков для одного варианта расчетных данных, взятых из архива БД или полученных в новом расчете), выдавать результаты расчета в табличном виде (текстовом файле), доступном для просмотра в рамках инструментальной оболочки или после окончания сеанса работы с БД ExtFlow2, получать результаты расчета параметров стандартной атмосферы (ГОСТ 4101-73) для различных вариантов входных параметров, для последующих версий инструментальной оболочки реализуется механизм многооконного просмотра графиков для нескольких различных данных расчетов.

2. *Программная реализация инструментальной поддержки базы данных.* Основные расчетные модули БД ExtFlow2 программно реализованы на языке Фортран. Ориентация на стандарт языка Фортран позволяет без существенных переработок переносить расчетные модули БД на ЭВМ другого типа.

Модули инструментальной поддержки БД реализованы на языке Си. В силу большой зависимости от типа ЭВМ модули инструментальной поддержки БД реализованы на ПЭВМ типа IBM PC/AT под управлением операционной системы MS DOS.

III. Предоставление информации из базы данных. Пользователю, работающему с БД как в режиме «Электронный справочник», так и «Вычислительный инструментарий», предоставляется информация в одинаковом, стандартизированном виде: поля газо- и термодинамических параметров в области течения, локальные распределения величин на поверхности тела и головного скачка, интегральные аэродинамические характеристики тела. Информация выдается в графическом и табличном виде на экран монитора и (или) принтер. Данные приводятся в безразмерном и размерном виде.

В дальнейшем для краткости определим обозначения геометрических расчетных зон (подобластей, на которые делится полная область проведения расчета), из которых производится вывод информации:

- 1) Geo1 — подобласть расчета обтекания головной части тела;
- 2) Geo2 — подобласть расчета течения над боковой поверхностью тела;
- 3) Geo3 — подобласть расчета течения над кормой тела и в ближнем следе за ним;
- 4) Geo4 — подобласть расчета течения в дальнем следе за телом;
- 5) GeoS — полная область расчета.

В общем случае  $GeoS = Geo1 + Geo2 + Geo3 + Geo4$ , для различных задач возможны их комбинации, например, для расчета обтекания коротких тел  $GeoS = Geo1 + Geo3$ . Области ограничены поверхностью тела, внешней границей (головным скачком), осью симметрии, входными (без Geo1) и выходными границами.

1. *Графическая информация.* Пользователю БД предоставляется графическая информация двух типов: в виде элементарных (простых) страниц, полных

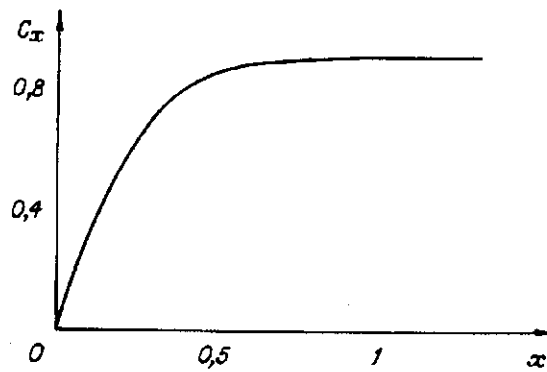


Рис. 3. Коэффициент сопротивления тела  $c_x(x)$

страниц и составных страниц в соответствии с заказанным режимом выдачи. Под графической страницей понимается изображение, занимающее весь экран монитора. Графики предоставляются в цветном (на мониторе) и черно-белом (на принтере) изображениях.

1.1. Элементарная (простая) страница 1-го типа. Элементарной страницей 1-го типа является одномерный график распределения какой-либо функции вдоль определенной координатной линии. При этом выдача графиков в Geo1, Geo2, Geo3 и Geo4 производится отдельно.

На графики выводятся: конфигурация головного скачка, распределения плотности  $\rho(r)$  и давления  $P(r)$  для трех значений  $x$  (на входе, в центре и на выходе расчетной подобласти), распределения коэффициентов давления  $c_p(x)$  и трения  $c_f(x)$ , теплового потока  $q(x)$  и нарастание сопротивления тела  $c_x(x)$ . Пример графика коэффициента сопротивления тела  $c_x(x)$  показан на рис. 3.

1.2. Элементарная (простая) страница 2-го типа. Элементарными страницами 2-го типа являются двумерные графики распределений газодинамических параметров в поле течения. При этом выдача графиков в Geo1, Geo2, Geo3 и Geo4 производится отдельно.

В Geo1 выводятся изолинии плотности, давления, температуры, локального числа Маха. Пример графика изолиний температур для головной части тела приведен на рис. 4.

В Geo2, Geo3, Geo4 выводятся изолинии: числа Маха; давления; плотности; логарифма давления; логарифма плотности, а также линии тока, векторные поля скоростей и расчетные сетки. Пример графика изолиний  $\lg P$  для ближнего следа дан на рис. 5.

Графики предоставляются в цветном (на мониторе) и черно-белом (на принтере) изображениях с соответствующими цвету цифровыми шкалами.

1.3. Полная страница. Полной графической страницей БД называется страница сводной информации в полной геометрической области расчета

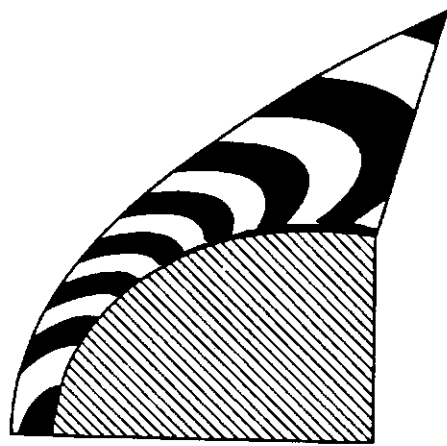


Рис. 4. Изолинии температур для головной части тела



Рис. 5. Изолинии логарифма давления для ближнего следа

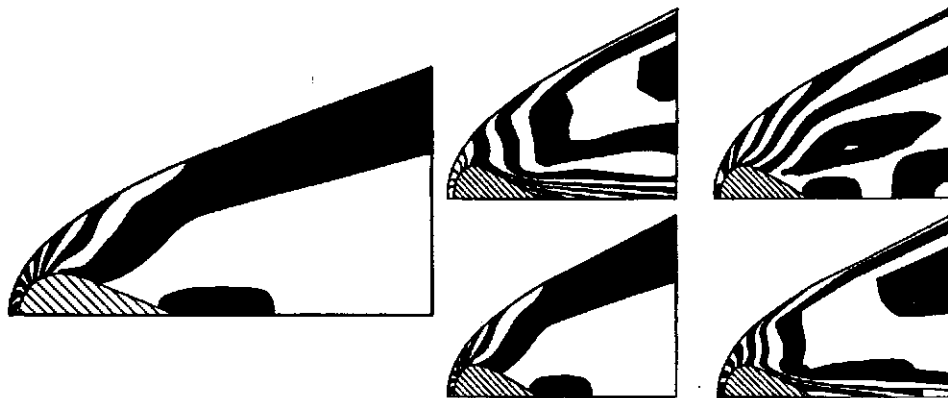


Рис. 6. Изолинии поля давления

Рис. 7. Сложная составная страница

GeoS. При этом выдаются графики двумерных распределений газодинамических параметров в поле течения (см. п. 1.2.). Пример графика изолиний давления для всего тела приведен на рис. 6.

1.4. Сложная составная страница. Сложной составной страницей БД называется страница, на которой размещены результаты расчетов нескольких задач в одной и той же геометрической области (Geo1, ..., Geo4 или GeoS) при вариации одного параметра и постоянных остальных параметрах, определяющих физическую постановку задачи (например, при вариации числа  $M_\infty$  и фиксированных  $Re_\infty$ ,  $T$ ,  $\gamma$  и т. д.), предоставляющих пользователю БД возможность проследить влияние этого фактора на структуру течения, или несколько графиков одной задачи, представляющих поля различных газодинамических функций. Пример графика сложной составной страницы дан на рис. 7.

2. Табличная информация. Табличная информация БД предоставляет пользователю БД числовую информацию о проведенном расчете для возможности детального количественного анализа задачи.

2.1. Таблица входных данных содержит полную общую информацию о значениях физико-математических и алгоритмических параметров, определяющих задачу.

2.2. Полная таблица вывода информации из БД есть форма представления числовых значений какой-либо газодинамической функции в поле течения, расчет которого осуществлен средствами БД. При этом информация представляется в каждом из геометрических сегментов Geo1, Geo2, Geo3 и Geo4 отдельно.

Полная таблица имеет следующий вид (здесь представляется отдельный фрагмент):

Плотность $\rho(I, J)$								
31	4,512	4,503	4,476	4,425	4,364	4,281	4,188	4,088
29	3,500	3,492	3,469	3,436	3,389	3,348	3,297	3,258
27	4,560	4,552	4,529	4,492	4,414	4,319	4,170	3,978
.....								
5	5,725	5,655	5,448	5,110	4,672	4,159	3,604	3,029
3	5,859	5,781	5,547	5,167	4,680	4,114	3,508	2,892
1	5,914	5,832	5,586	5,187	4,676	4,087	3,456	2,828
I/J	1	2	3	4	5	6	7	8

Печатается: сверху заголовки таблицы (наименование выводимого поля параметров); левый столбец: нумерация узлов сетки по радиальному направлению, начиная от поверхности тела (индекс  $I = 1$ ) для Geo1, Geo2 и Geo3 или

от оси симметрии для Geo4 до внешней границы ( $I = I_{\max}$ ); нижняя строка: нумерация узлов расчетной сетки в продольном направлении от левой (индекс  $J = 1$ ) до правой ( $J = J_{\max}$ ) границы геометрического сегмента; на пересечении строки  $I$  и столбца  $J$  находится значение выводимой величины в узле расчетной сетки  $F_{I,J}$ .

На экран монитора выводятся:

1) поля двумерных параметров: радиальные координаты узлов сетки, плотность, радиальная и продольная компоненты скорости, внутренняя энергия, локальное число Маха, невязка решения (только в режиме работы БД «Вычислительный инструментарий»);

2) поля одномерных параметров (локальных и интегральных аэродинамических характеристик): положение и интенсивность головного скачка уплотнения, коэффициент давления, тепловой поток на поверхности тела, коэффициенты теплового сопротивления, сопротивления вязкого трения, полного сопротивления без нормировки и с нормировкой к площади мишеля, площади локального сечения тела.

2.3. Разреженная таблица вывода информации из БД есть укороченный вариант полной таблицы, при котором вывод полей параметров осуществляется не для каждого узла расчетной сетки, а с интервалом  $\Delta I$  и  $\Delta J$ , например, в узлах  $I = 1, 3, 5, 7, \dots$ ;  $J = 1, 4, 7, 10, \dots$ . Интервалы вывода заказываются пользователем БД.

2.4. Локальная таблица вывода информации из БД есть укороченный вариант полной таблицы, при котором пользователь имеет возможность осуществить вывод информации в некоторой подобласти течения  $\{I_1 \leq I \leq I_2, J_1 \leq J \leq J_2\}$  для детального анализа числовых данных, например, вблизи точки отрыва потока от поверхности тела. Параметры «окна» вывода информации заказываются пользователем БД.

3. *Справочная многопараметрическая система «Стандартная атмосфера».* При решении большого класса реальных задач недостаточно знать только набор определяющих задачу входных безразмерных параметров — чисел  $M_\infty$ ,  $Re_\infty$ ,  $\rho_\infty$ ,  $\gamma$ , безразмерной геометрии и т. п., а требуется информация о соответствующих им размерных параметрах, описывающих движение реального тела в реальном газе (атмосфере), — геометрия и характерный размер тела (в м), скорость полета (в км/с), высота полета (в км) и соответствующие ей условия набегающего потока (давление в атм, температура в град К и т. д.). Для этого в БД существует специальная сервисная система ATMOS, обеспечивающая расчет параметров стандартной атмосферы на основе ГОСТ 4401-73. Пользователю БД предоставляется возможность работы с многопараметрической системой ATMOS в нескольких режимах, кратко описываемых ниже.

3.1. Первой группой входных/выходных параметров системы ATMOS, связанных между собой, являются: высота полета  $H$  (в км), давление  $P$  и температура  $T$  набегающего потока (в атм и град К соответственно). Пользователь БД имеет возможность задать  $H$  как входной параметр и получить  $P$  и  $T$  или, наоборот, задать  $P$  и  $T$  как входные параметры и получить  $H$  (отметим, что не всякому сочетанию  $P$  и  $T$  соответствует  $H$ , и эта возможность предусмотрена в системе в основном для работы с экспериментальными данными, полученными в аэродинамических трубах).

3.2. Второй группой входных/выходных параметров системы ATMOS, связанных между собой, являются: число Маха  $M_\infty$  набегающего потока или скорость полета  $V$  (в км/с). Пользователь БД имеет возможность задать  $M_\infty$  и получить  $V$ , или, наоборот, необходимая для соответствующих преобразований скорость звука в набегающем потоке определяется по параметрам, описанным выше (см. п. 3.1).

3.3. Третьей группой входных/выходных параметров системы ATMOS, связанных между собой, являются: число Рейнольдса набегающего потока  $Re_\infty$  и характерный размер тела  $L$  (в м). Пользователь БД имеет возможность задать  $Re_\infty$  и получить  $L$ , или, наоборот, необходимые для соответствующих преобразований параметры определены выше (см. пп. 3.1—3.2).

3.4. Таким образом, пользователь БД имеет возможность многорежимного общения с системой ATMOS, варианты которого описаны в пп. 3.1—3.3, в зависимости от поставленных целей проведения расчета и определяемых различными типами задания входных параметров. Кроме получения выходных параметров, необходимых для организации вычислительного процесса, система ATMOS выдает дополнительную информацию, представляющую реальные физические условия, в которых происходит движение тела: параметры набегающего потока, параметры за прямым скачком уплотнения и в точке торможения потока в лобовой точке поверхности тела, значения молярной массы, длины свободного пробега, числа Кнудсена и характеристику режима обтекания (режим сплошной среды, переходный режим, свободномолекулярный режим), позволяющую сделать вывод о степени пригодности применения уравнений Навье—Стокса для расчета данного режима течения.

**Заключение.** На современном этапе развития науки численный эксперимент является одним из важнейших направлений исследований в области аэродинамики. Информация, полученная с помощью численных расчетов, позволяет не только осмыслить и понять физические эффекты, происходящие, например, на экспериментальных установках, но и в ряде случаев заменить физический или натурный эксперимент численным как более дешевым. Кроме того, численный эксперимент является иногда и единственным возможным способом получения новой информации.

Учитывая изложенное выше, укажем, что представленная в настоящей работе БД ExtFlow2 является мощным средством информационной поддержки научных исследований в данной области знаний и обладает свойствами адаптивности на большой ряд существующих и создаваемых ЭВМ, достаточной точности получаемых решений за приемлемое время работы ЭВМ, надежности и безотказности в большом диапазоне определяющих параметров, простоты и удобства эксплуатации широким кругом пользователей, открытости возможностей расширения классов решаемых задач за счет усложнения физико-математических моделей и геометрий расчетных областей, дополнения, модификации или изменения методов численного решения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковеня В. М., Тарнавский Г. А. Метод решения пространственных уравнений газовой динамики // Числ. методы механики сплош. среды.—Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1978.—9, № 1.
2. Kovenja V. M., Tarnavsky G. A., Yanenko N. N. Economical method of solving problem of gas dynamics // Proc. of the 7 Intern. Conf. on Numerical Methods in Fluid Problem.—Stanford, California, USA: NASA Research Centre, 1980.—P. 61.
3. Тарнавский Г. А. Об использовании уравнений Навье — Стокса с граничным условием скольжения на поверхности тела для расчета течений разреженного газа в переходном режиме // Числ. методы механики вязкой жидкости.—Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1983.—С. 282.
4. Тарнавский Г. А. Обзор некоторых проблем численного моделирования обтекания затупленных головных частей тел сверхзвуковым потоком вязкого и теплопроводного газа.—Новосибирск, 1987.—(Препр. /ИТПМ СО АН СССР; № 18).
5. Тарнавский Г. А. Методологические вопросы автоматизированного обеспечения расчета течений в ближнем и дальнем следе за телом // Моделирование в механике.—Новосибирск: ИТПМ, 1988.—2(19), № 3.
6. Тарнавский Г. А. Некоторые основные критерии и система поиска решений в банках данных пакетов прикладных программ в области аэродинамики // Числ. методы механики сплош. среды.—Красноярск: ВЦ СО РАН, 1992.—С. 196.
7. Тарнавский Г. А. Таблицы обтекания передней части тел, имеющих сферическое затупление, сверхзвуковым потоком вязкого газа.—М., 1987.—Деп. в ВИНТИ, № 2512.
8. Ковеня В. М., Тарнавский Г. А., Черный С. Г. Применение метода расщепления в задачах газовой динамики.—Новосибирск: Наука, 1990.

*Поступила в редакцию 6 мая 1994 г.*