

# On the development of the interactive information and modeling system for gas dynamics and multidisciplinary research

P. Silvestrov<sup>1</sup>, O. Bessonov<sup>2</sup>, A. Rybakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tactical Missiles Corporation, Korolev, Moscow district, 141080, Russia

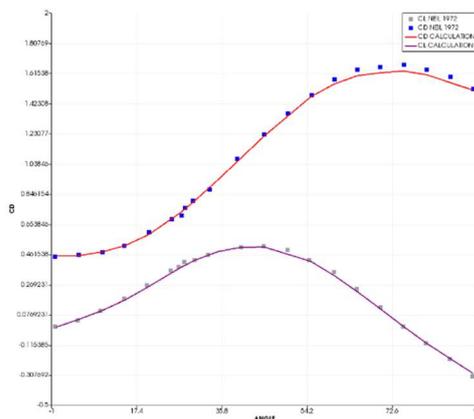
<sup>2</sup> Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences  
Moscow, 119526, Russia

[pavelsilvestrov@yandex.ru](mailto:pavelsilvestrov@yandex.ru)

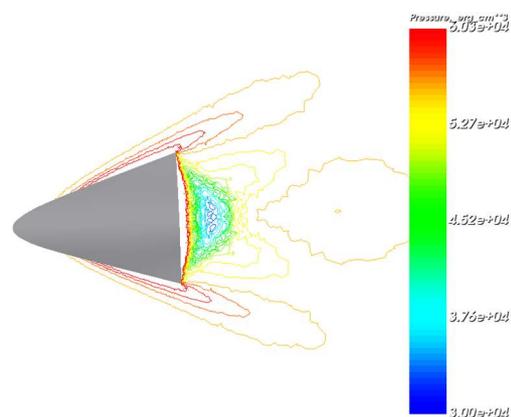
## Abstract

This paper describes the general idea and implementation of the improved Interactive information and modeling system (IIMS) – an integrated environment that combines computational modules for modeling aerodynamics and aerothermodynamics of re-entry space vehicles with a large collection of various information materials on this topic. The paper describes and illustrates changes to the internal architecture and interface of the system. Examples of computation and information windows are presented together with the integrated visualization system. The system has a unified implementation for Windows and Linux operation systems and can be deployed on any modern high-performance personal computer. Support of personal computers based on the Elbrus architecture has also been implemented.

Keywords: gas dynamics, computational aerodynamics, interactive information and simulation system, computer graphics.



Comparison experimental and calculated values of  $C_D$  at different angles of attack for blunt-nose cone [13], visualized using IIMS



Example of the temperature distribution on the surface of Waverider [14], visualized by IIMS

УДК 533.6.01:004.92:004.514

# О развитии интерактивной информационно-расчетной системы для задач газовой динамики и междисциплинарных исследований

П.В. Сильвестров<sup>1</sup>, О.А. Бессонов<sup>2</sup>, А.Н. Рыбаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»,  
Россия, Московская обл., Королев, 141080, ул. Ильича, д.7

<sup>2</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,  
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д.101, корп. 1

[pavelsilvestrov@yandex.ru](mailto:pavelsilvestrov@yandex.ru)

## Аннотация

В статье описывается общая концепция и реализация модернизированной Интерактивной информационно-расчетной системы (ИИРС) – интегрированной среды, которая позволяет объединять вычислительные модули для моделирования аэродинамики и аэротермодинамики спускаемых космических аппаратов с большим количеством информационных материалов по данной тематике. В работе проиллюстрированы изменения внутренней архитектуры и интерфейса Системы. Приведены примеры вычислительного и информационного окон Системы, а также встроенной системы визуализации. Система имеет кроссплатформенную реализацию для операционных систем Windows и Linux, что позволяет ее использовать на любом современном высокопроизводительном персональном компьютере. Также реализована поддержка Системой персональных компьютеров с архитектурой «Эльбрус».

Ключевые слова: газовая динамика, вычислительная аэродинамика, интерактивная информационно-расчетная система, компьютерная графика.

## 1. Введение

В процессе разработки новых моделей летательных аппаратов возникает необходимость проведения компьютерных математических имитационных расчетов аэротермодинамических характеристик [1–6]. Такие расчеты позволяют значительно сократить количество наземных и летных испытаний, а также существенно снизить стоимость разработки будущего аппарата. В [7, 8] была представлена интерактивная информационно-расчетная система (ИИРС), объединяющая вычислительные модули для проведения аэрогазодинамических расчетов, диалоговую графическую оболочку для управления вычислениями и средства информационной поддержки расчетов. Система позволяет проводить весь комплекс работ по моделированию аэродинамических и газодинамических свойств летательного аппарата и его составных частей.

Графический пользовательский интерфейс ИИРС поддерживает два основных режима работы – информационный и расчетный. Информационный режим обеспечивает возможность работы с базами данных, содержащими результаты расчетов, статьи, отчеты, подборки, графики, видеофрагменты и прочие информационные материалы по летательным аппаратам и аэротермодинамике. Расчетный режим реализует все этапы проведения расчета от подготовки начальных данных до просмотра результатов расчетов.

При работе с информационно-расчетной системой возникает проблема обработки результатов расчетов и их визуального представления. В настоящий момент большинство расчетных модулей, входящих в состав системы, выдают результаты численного моделирования в форматах, предназначенных для графического представления в коммерческом средстве визуализации Tecplot [9]. Данное средство нашло широкое применение в вычислительной гидродинамике и аэродинамике и стало де-факто одним из стандартов для визуализации результатов расчетов. Однако использование коммерческих программных продуктов такого типа в отечественных организациях, занимающихся разработкой перспективных летательных аппаратов, может вызвать различные проблемы лицензионного и иного характера. Также ограничение на использование коммерческих пакетов визуализации накладывает возможность использование ИИРС на расчетных станциях с процессорами архитектуры «Эльбрус», для которых отсутствуют сборки коммерческих средств визуализации.

Визуализация данных – это представление данных в том виде, который обеспечивает наиболее эффективную работу человека по их изучению [10].

В [11, 12] представлена концепция и реализация отечественной системы визуализации аэрогазодинамических расчетов, которая была встроена в ИИРС. Внешний вид диалогового интерфейса системы визуализации реализован по подобию интерфейса коммерческой системы Tecplot. Визуализация может использоваться на всех этапах проведения аэрогазодинамических расчетов и включает в себя следующие действия:

- просмотр исходной электронной геометрии объекта;
- просмотр расчетной сетки (этот этап полезен для оценки степени соответствия сетки расчетной области поставленной задаче и визуального контроля характеристик сетки);
- визуализация промежуточных и окончательных результатов расчетов.

В настоящей статье представлен второй вариант ИИРС и встроенной в его состав системы визуализации. Новый вариант ИИРС может быть развернут на компьютере с процессором архитектуры Intel/AMD (32 и 64 бит) или «Эльбрус», поддерживает операционные системы Windows и семейства Linux.

Далее в статье описываются основные особенности графического пользовательского интерфейса и прочие отличия второго варианта ИИРС от первоначальной версии.

## 2. Окно информационного режима

В первоначальной версии ИИРС в информационном режиме работы экран разбивается на два поля – верхнее (поле меню), содержащее заголовок экрана и значки (иконки) с указанием выбираемых объектов (например, прототипов летательных аппаратов), и нижнее (информационное поле), предназначенное для описания этих объектов и действий над ними, а также для вывода информационных материалов (рис. 1). Нажатие на иконку или кнопку позволяет загрузить другой экран (более низкого уровня) с аналогичной структурой либо выполнить определенное действие (открытие файла для просмотра или редактирования, или вызова расчетного режима). Также доступны несколько кнопок навигации (возврат в предыдущее окно или в начальный экран и т.п.). Для описания графического интерфейса используются специальные файлы, организованные в виде дерева директорий в соответствии с иерархией экранов (например, файл dirinfo.dif описывает внешний вид поля меню и правила навигации между экранами).

Интерфейс новой версии ИИРС реализует панельную схему размещения, в которой на экране одновременно представлено несколько объектов или списков (директорий), связанных друг с другом. Такой подход обеспечивает большую информативность экрана, облегчает восприятие связей между объектами и упрощает навигацию в ИИРС (рис. 2). Так, на одном экране (рис. 2) можно видеть текущую открытую директорию (средняя панель), предыдущую директорию (левая панель), краткие характеристики выбранного в окне объекта (правая панель, сверху) и, дополнительно, перечень расчетных директорий, созданных пользователем (правая панель, снизу). При необходимости левая и правая панели также могут разделяться на верхнее и нижнее поле.



Рис. 1. Пример информационного режима в первоначальной версии ИИРС

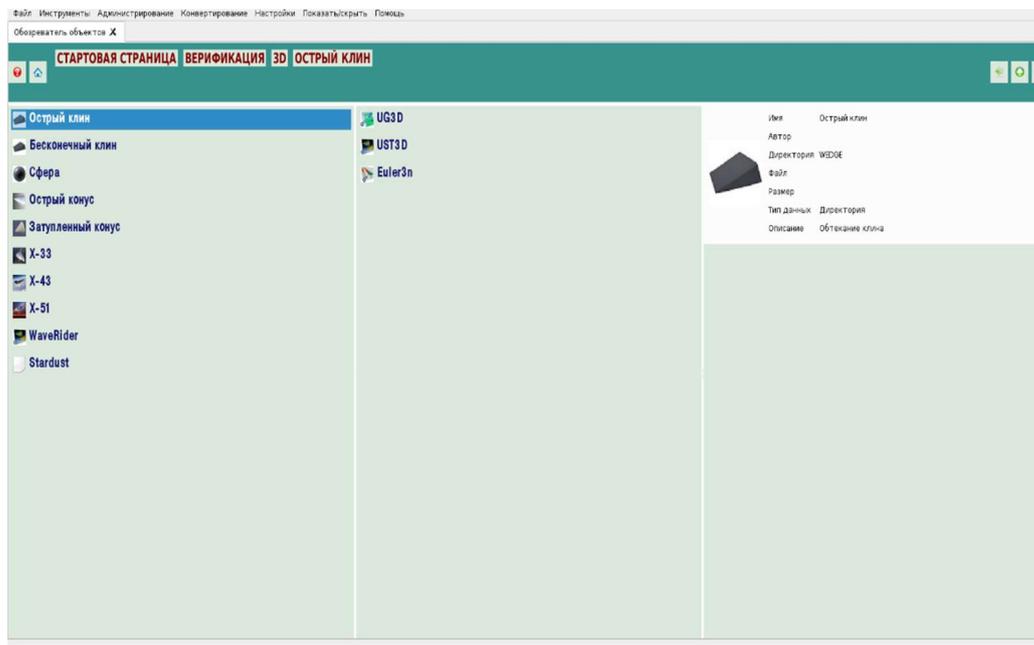


Рис. 2. Пример информационного режима в новой версии ИИРС

Способ описания элементов графического интерфейса в новой версии принципиально не изменился (см. [7, 8]), отличия касаются только определенных деталей.

Для описания нижнего поля используется файл `dirinfo2.dif`, аналогичный по структуре файлу `dirinfo.dif`, описывающему верхнее поле. Сверху отображаются названия вызванных панелей в соответствии с последовательностью вызовов. Нажатие на элемент этого списка позволяет вернуться к указанной директории. Помимо этого, сохранилась возможность перехода между директориями посредством кнопок навигации.

Из перечня расчетных директорий, созданных пользователем (находится в нижней части правой панели, на рис. 2 отображается пустым) можно перейти в панель запуска расчета путем двойного нажатия на соответствующее название директории. Также возможно внесение полученного результата в основную базу данных ИИРС путем переноса директории на левую или центральную панель.

### 3. Окно расчетного режима

При вызове расчетного режима работы в первоначальной версии ИИРС в левой части экрана открывается дерево описания проекта (рис. 3), а в правой части (в информационном поле) появляется краткое описание работы с расчетным модулем.

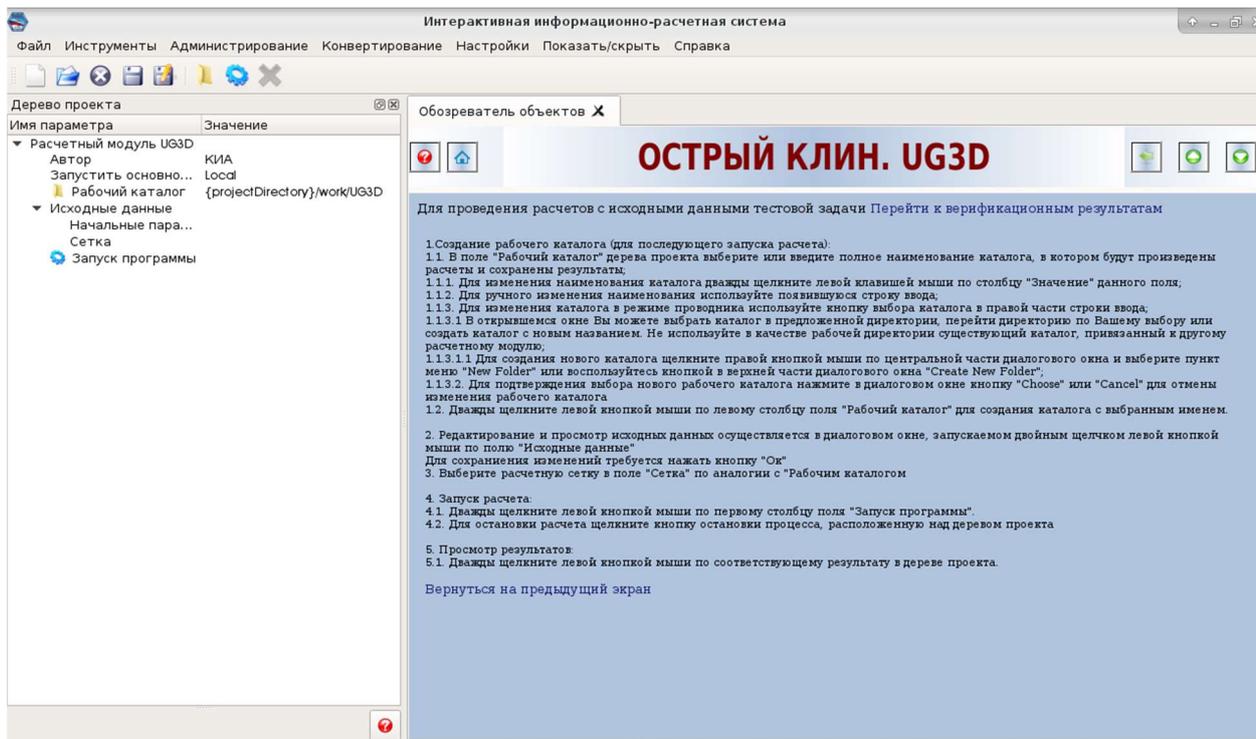


Рис. 3. Пример расчетного режима в первоначальной версии ИИРС

Дерево описания проекта содержит элементы двух типов – информационные поля (пассивные) и элементы действия (активные). Элементы организованы в иерархическую структуру с возможностью скрывать отдельные ветви. Нажатие на активный элемент вызывает определенную функцию, например, инициализацию и создание рабочего каталога, выбор начальных параметров, выбор и просмотр расчетной сетки и, наконец, запуск расчета либо его этапа (пре-процессора, постпроцессора). После завершения расчета в дереве описания проекта отображаются дополнительные элементы, соответствующие файлам результатов с возможностью их визуализации (рис. 4).

В новой версии ИИРС реализован подход к проведению расчета с использованием последовательности диалоговых окон (рис. 5). При этом существует возможность к возврату использования дерева проекта выбором соответствующего пункта в верхней части окна, но без открытия описания работы с расчетным модулем. Новая версия ИИРС позволяет одновременно работать с несколькими расчетными проектами посредством отдельных вкладок.

Последовательность диалоговых окон реализует логику последовательности проведения расчета, заложенную в файле дерева проекта [8]. Переход от этапа к этапу происходит по нажатию кнопки «Далее». Также возможен возврат к предыдущему этапу работы кнопкой «Назад».

На начальном экране отображается информация о расчетном модуле, а также опции запуска расчета (локального либо удаленного) и вычислителя (центрального либо графического процессора).

На последующих этапах производится инициализация и создание расчетного каталога, редактирование исходных данных, выбор расчетной сетки (геометрии) и запуск расчета соответственно.

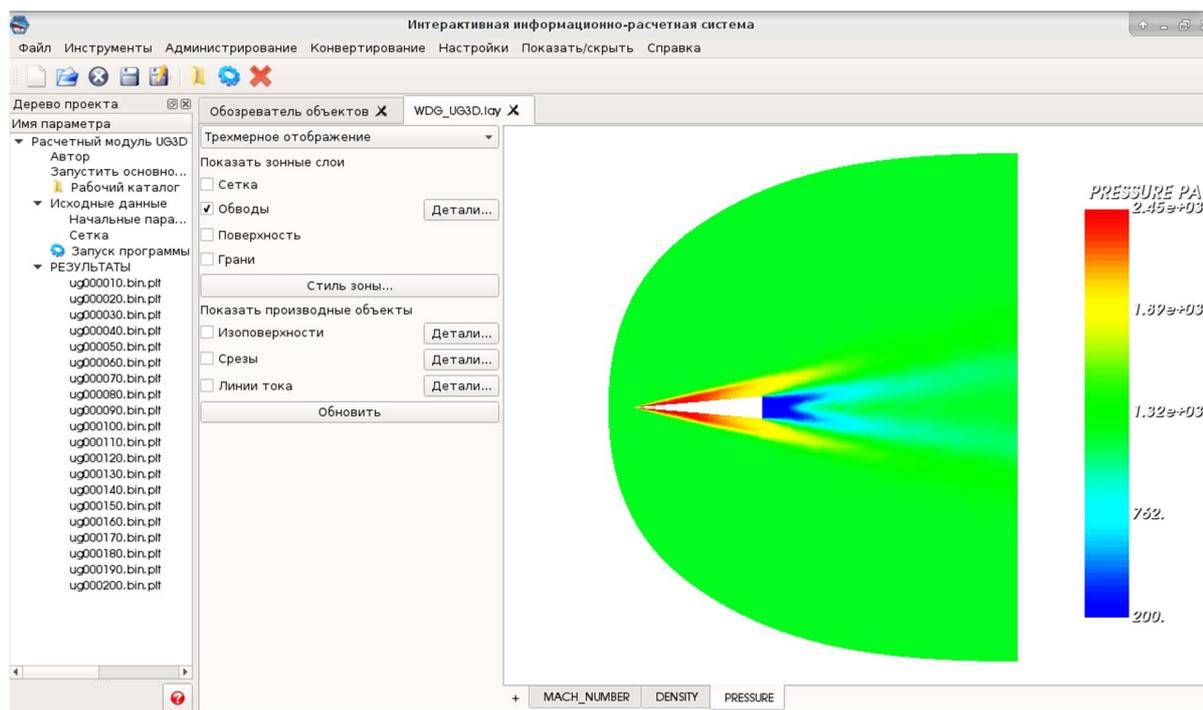


Рис. 4. Пример визуализации результатов расчета для объекта «Острый клин» в интерфейсе первоначальной версии ИИРС. Рисунок получен с помощью встроенного в ИИРС графического визуализатора

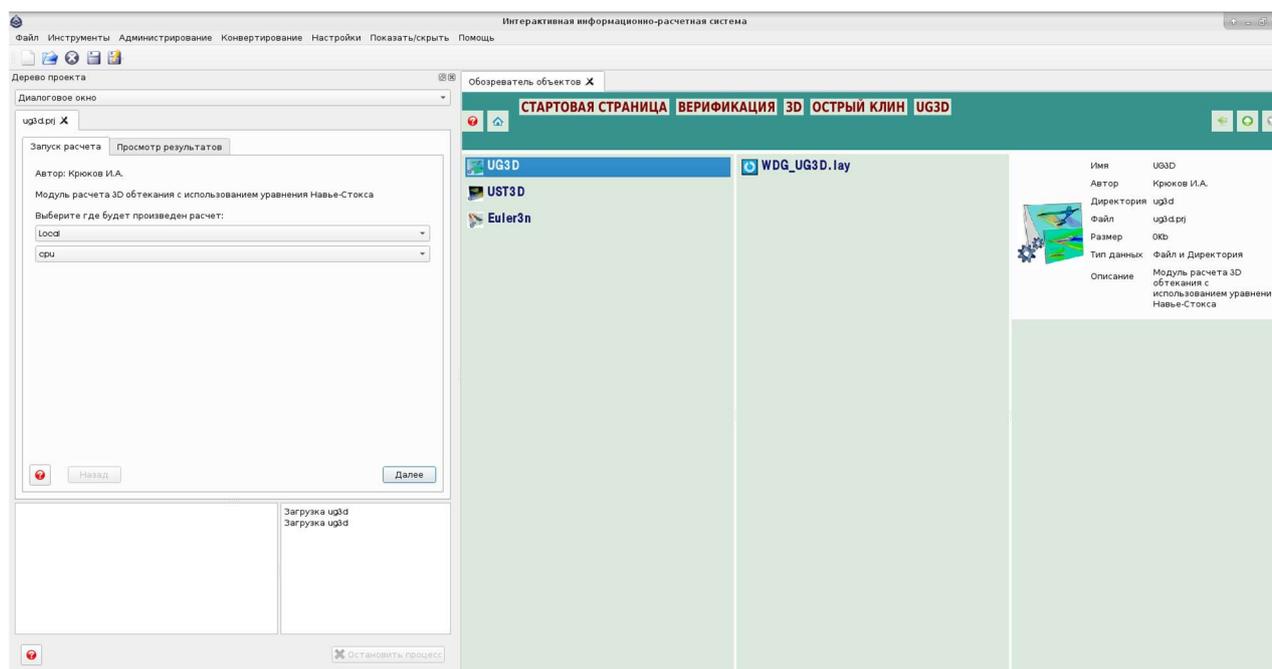


Рис. 5. Пример расчетного режима в новой версии ИИРС

Выбор сетки (или геометрии) возможен из расчетной директории (при наличии), из всей базы наполнения ИМК, а также через проводник. Расширение имени файла выбирается в соответствии с файлом дерева проекта для выбранного расчетного кода.

На рис. 6 показан пример с выбором сетки из списка по кнопке «Все файлы в базе». Данная вкладка позволяет фильтровать файлы по названию и местоположению файлов. Выделенную сетку можно просмотреть нажатием кнопки «Открыть».

Запуск расчета на выполнение может включать в себя несколько шагов, выбираемых в выпадающем меню, например, «Запуск препроцессора», «Запуск программы» и «Запуск постпроцессора». Для выполнения конкретного шага нужно выбрать соответствующий пункт в выпадающем меню и нажать «Далее» (рис. 7).

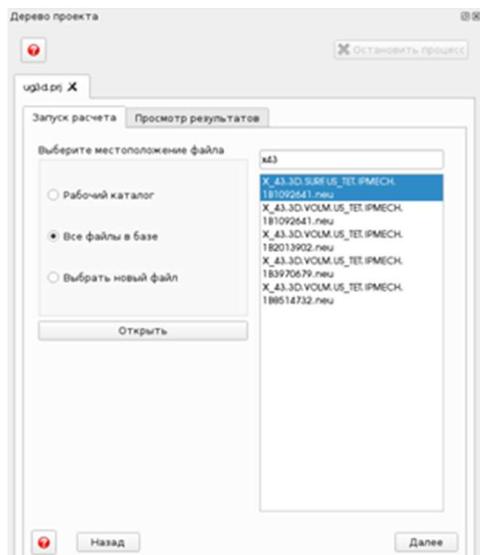


Рис. 6. Этап выбора расчетной сетки

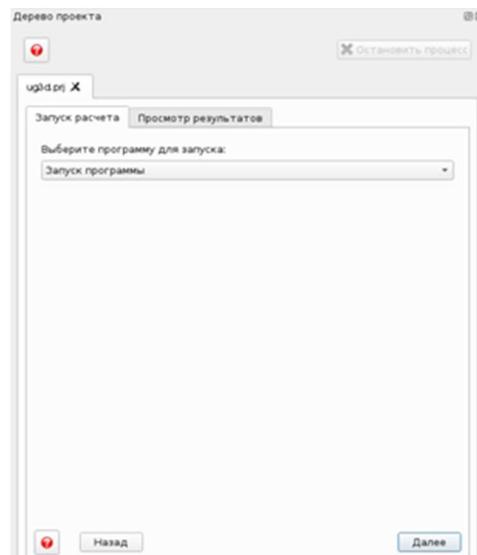


Рис. 7. Этап запуска расчета на выполнение

При запуске каждого шага расчета выводится сообщение «Процесс запущен», а при завершении шага – сообщение «Завершена работа расчетного модуля». Выполнение расчета можно прервать нажатием кнопки «Остановить процесс», расположенной в верхней части панели.

После завершения расчета в отдельной вкладке «Просмотр результатов» отображается список файлов результатов, полученных в процессе расчета (рис. 8). В директории с результатами размещен настроечный файл dirinfo.dif, описывающий содержание списка.

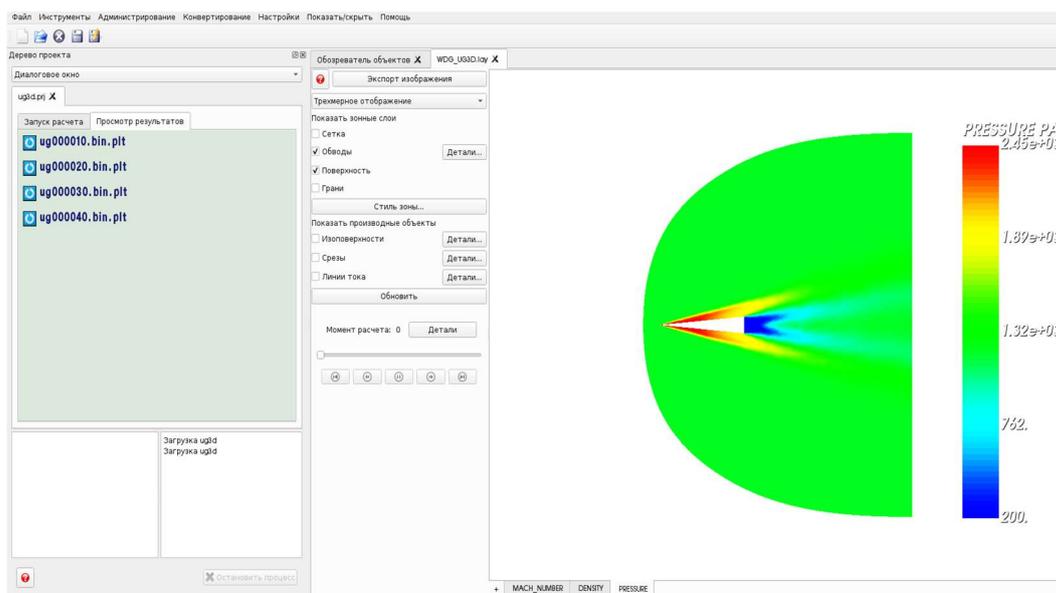


Рис. 8. Пример визуализации результатов расчета для объекта «Острый клин», полученный после нажатия на соответствующий элемент в списке файлов результатов (в интерфейсе новой версии ИИРС). Рисунок получен с помощью встроенного в ИИРС графического визуализатора

При запуске расчета на удаленной вычислительной системе становятся доступными шаги проверки («ПРОВЕРКА») и завершения («ЗАВЕРШЕНИЕ») расчета. В результате выполнения указанных шагов во вкладке с результатами становятся доступными файлы отслеживания работы расчетного модуля («ОШИБКИ», «СОСТОЯНИЕ», «ПРОТОКОЛ»). Удаленный запуск доступен только для основной программы.

## 4. Окно встроенного визуализатора

Внешний вид интерфейса встроенной системы визуализации реализован по подобию интерфейса коммерческой системы Tecplot.

Система визуализации поддерживает следующие входные форматы данных:

- стандартные геометрические форматы (\*.stl в бинарном и текстовом вариантах);
- стандартные сеточные форматы (\*.neu);
- графические форматы распространенных систем визуализации – Tecplot (\*.plt, \*.dat) и ParaView (\*.vtk, \*.vtu).

Для настройки сложной визуализации используются управляющие файлы в формате системы Tecplot (\*.lay). К настоящему моменту реализована часть возможностей по настройке с помощью таких файлов.

Система визуализации поддерживает два режима вывода данных – трехмерный и двухмерный. В обоих режимах для ускорения работы визуализатора реализовано распараллеливание обработки данных в стандарте OpenMP.

### 4.1. Трехмерный режим визуализации

Трехмерный режим визуализации предназначен для построения и представления пространственных изображений и их фрагментов, в том числе двумерных сечений пространственных распределений физических величин. Ниже приведен список основных типов пространственных изображений, поддерживаемых визуализатором, а также отдельные примеры визуализации:

- контуры изолиний и цветные распределения физических величин в сечениях (срезах) и на поверхностях объектов;
- пространственные изображения поверхностных и объемных расчетных сеток с возможностью скрытия невидимых линий;
- полутоновые изображения поверхностей летательных аппаратов и элементов конструкции;
- картины распределения физических величин в плоских сечениях расчетных областей с возможностью наложения пространственных изображений летательных аппаратов;
- изоповерхности с возможностью вывода на них цветных распределений физических величин;
- траектории и линии тока.

С выведенным изображением возможно проведение различных манипуляций – перемещение по экрану, масштабирование, ориентация и вращение пространственных объектов. Манипуляции производятся с помощью компьютерной мыши.

Настройка изображаемых объектов производится с помощью диалоговых окон с элементами управления. Для указания параметров изображения и степени детализации используются диалоговые окна описания зон, срезов, контуров, изоповерхностей и линий тока.

В новой версии встроенного визуализатора расширен функционал диалоговых окон в части создания новых контуров (рис. 9–11), а также группировки зон по временным периодам (рис. 12). Дополнительно реализована возможность экспорта изображения в формате png и сохранения динамики по временным шагам в файл avi.

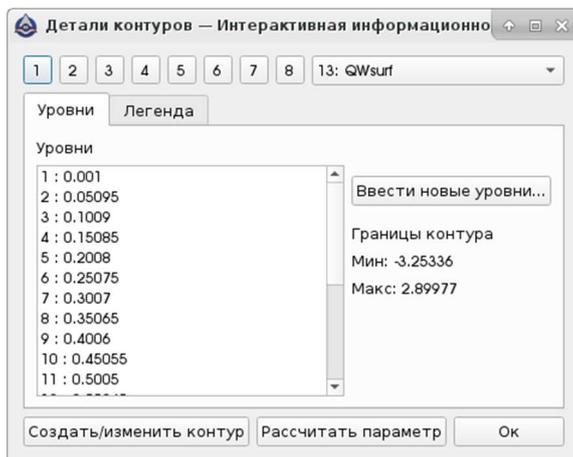


Рис. 9. Окно работы с контурами

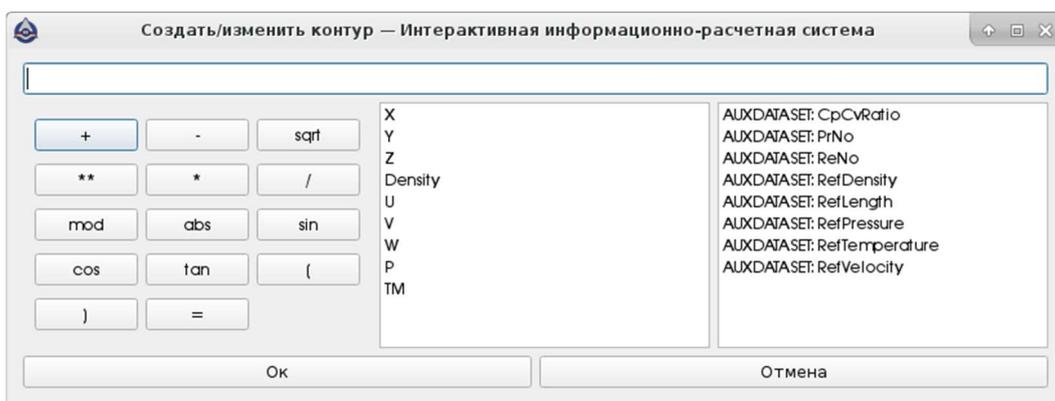


Рис. 10. Создание новых контуров из уравнения

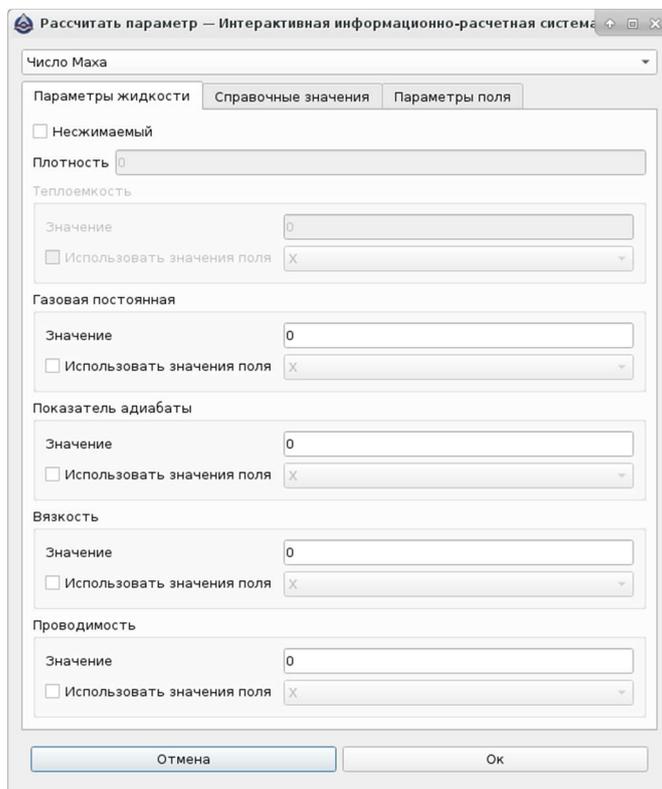


Рис. 11. Создание стандартных контуров по заданным параметрам

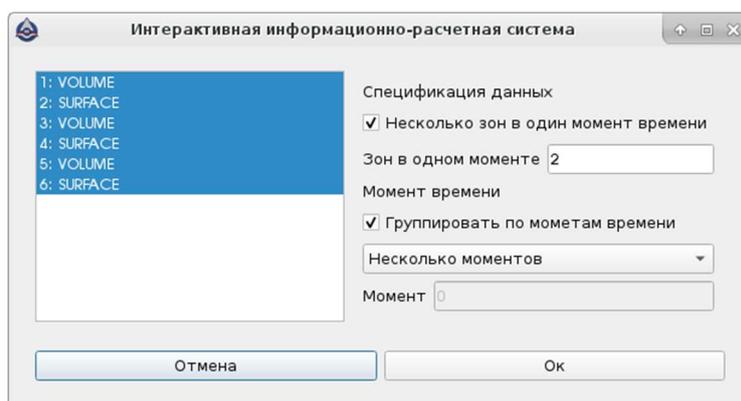


Рис. 12. Группировка зон по временным периодам

## 4.2. Двухмерный режим визуализации

Двухмерный режим визуализации предназначен для построения распределения физических величин как функции одной переменной в виде графиков. При построении могут использоваться линии, точки и их сочетания. В дополнение к реализованным ранее возможностям, расширен функционал по настройке отображения осей двумерного графика (рис. 13–14).

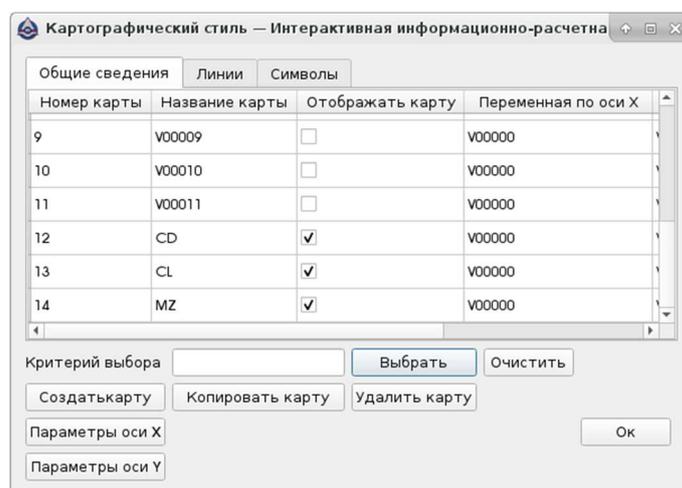


Рис. 13. Окно работы с картографическим стилем

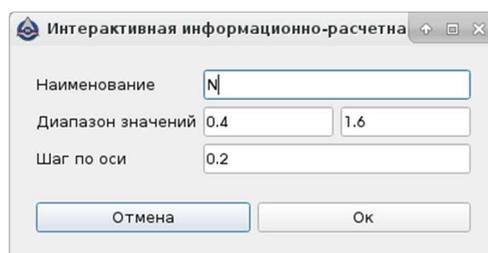


Рис. 14. Окно настройки оси X

Таким образом, разработанная система визуализации содержит все необходимые элементы и способы графического представления данных, а также инструменты для интерактивного управления процессом просмотра.

Встроенная система визуализации реализована для обеих поддерживаемых аппаратных платформ – процессоров архитектуры Intel/AMD x86 и «Эльбрус». На рис. 15–16 показаны примеры работы встроенного визуализатора на компьютере с процессором «Эльбрус-8С».

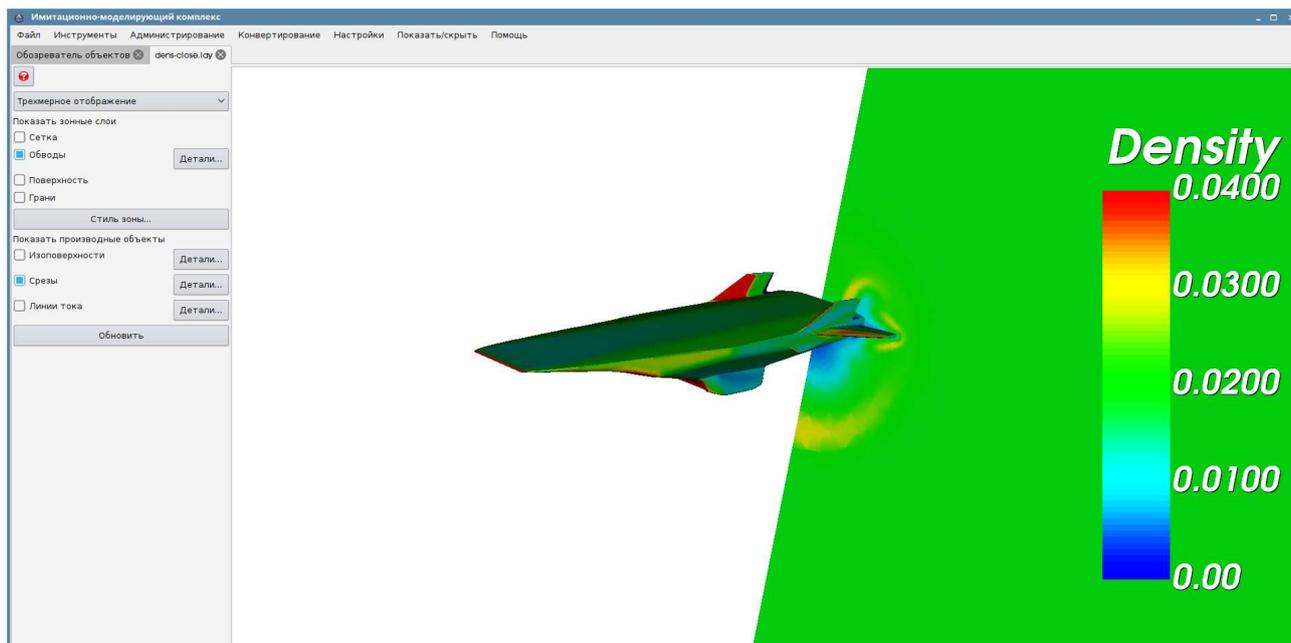


Рис. 15. Пример пространственной визуализации на компьютере с процессором «Эльбрус»

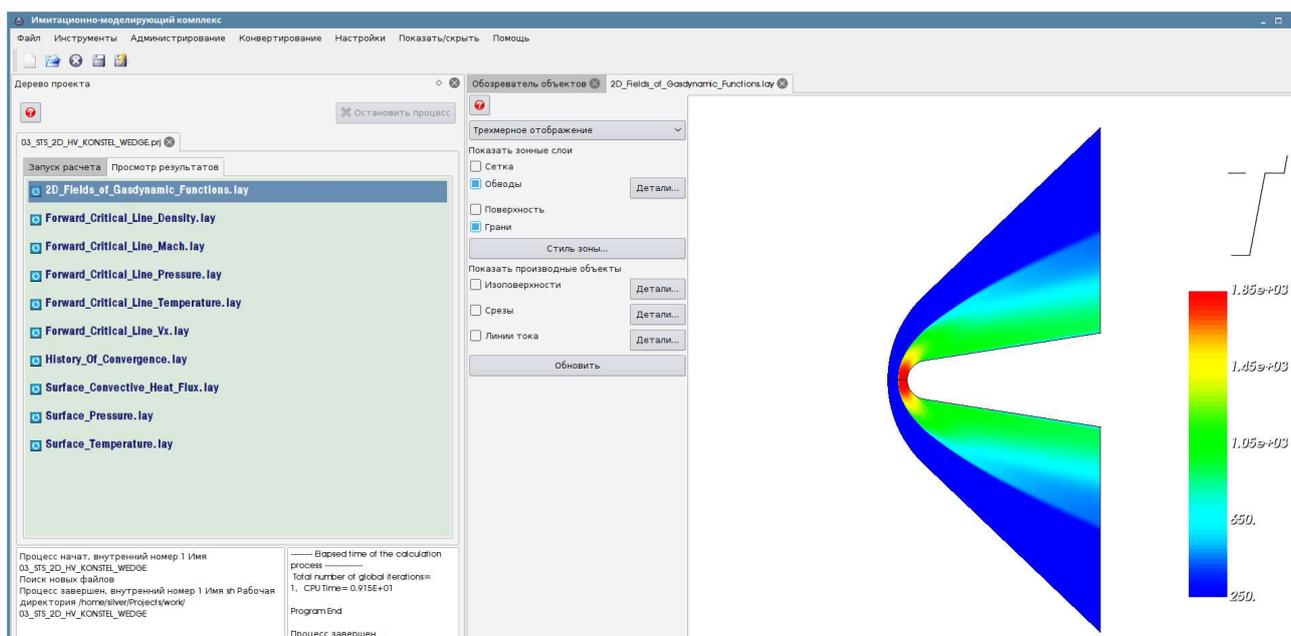


Рис. 16. Визуализация расчета затупленного клина на компьютере с процессором «Эльбрус»

## 5. Дополнительные возможности

Для облегчения навигации в ИИРС внедрена возможность вызова вкладки со списком всех файлов, хранящихся в базе данных информационного режима (рис. 17). При нажатии на элемент списка происходит переход в соответствующую директорию на экране информационного режима. При наведении на элемент списка отображается полный путь к файлу.

Также реализован ряд других дополнительных возможностей, улучшающих работу системы ИИРС.

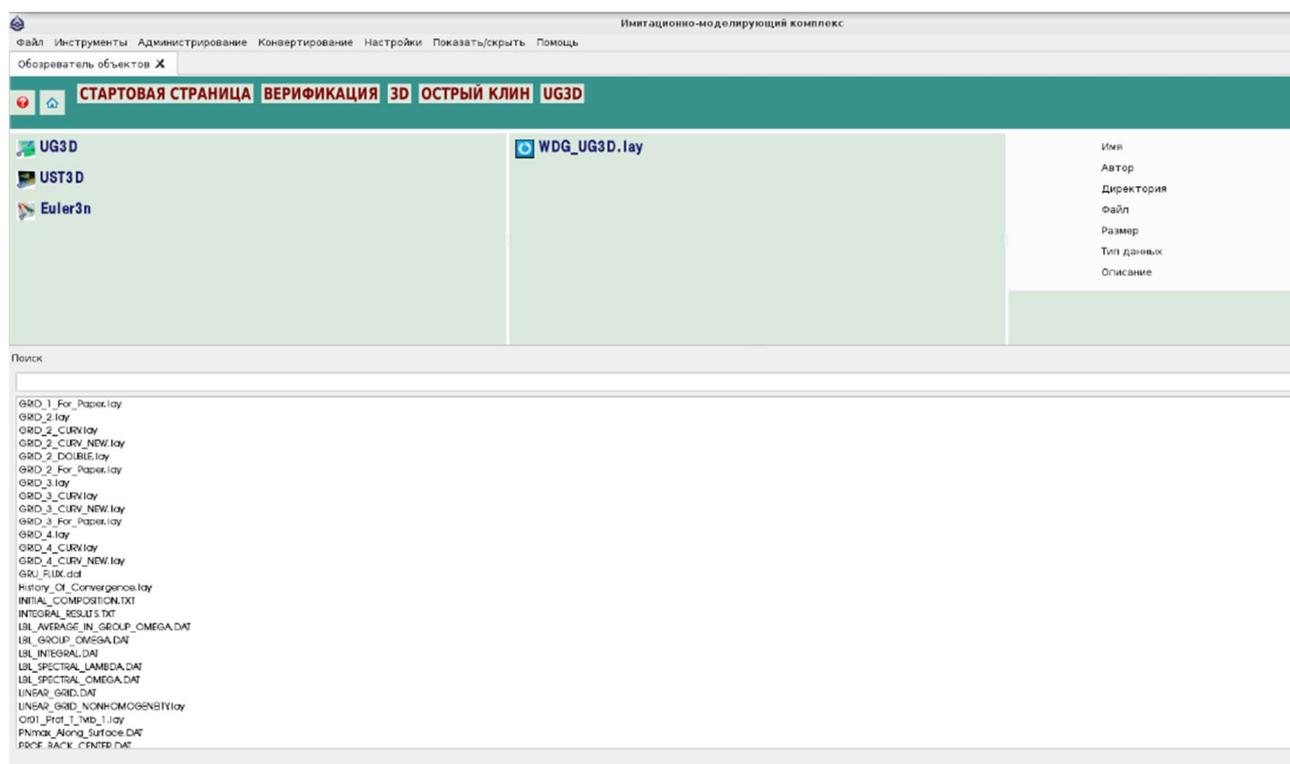


Рис. 17. Вкладка со списком всех файлов ИИРС

## 6. Заключение

Представленная интерактивная информационно-расчетная система и ее основной элемент, графическая оболочка, обеспечивают интеграцию вычислительных модулей, инструментов для работы с расчетными сетками, механизмов проведения расчетов, информационных ресурсов и других элементов в единую информационно-вычислительную среду. Дальнейшее развитие системы осуществляется путем расширения возможностей графической оболочки и добавления новых вычислительных модулей вместе с соответствующими информационными элементами (руководства по эксплуатации, статьи, результаты вычислений). ИИРС является эффективной и удобной технологической и образовательной средой для выполнения вычислений, визуализации и анализа результатов при решении задач газовой динамики и проведении междисциплинарных исследований.

Разработанная система визуализации обеспечивает широкий спектр возможностей для графического представления результатов численного моделирования, а также для просмотра исходной геометрии объекта и расчетной сетки. Визуализатор интегрирован в ИИРС и является ее составной частью.

Изменения, внесённые в интерфейс ИИРС в процессе её развития, позволили значительно упростить работу для пользователей, а интеграция в окружение OpenMP и другие оптимизации ускорили выполнение операций.

Интерактивная информационно-расчетная система реализована для двух семейств компьютеров, построенных на процессорах архитектуры Intel/AMD x86 и «Эльбрус».

Разработанная платформа станет эффективным и удобным инструментом как для проведения аэрогидродинамических расчетов, так и для визуального анализа получаемых результатов.

## Благодарности и ссылки на гранты

Авторы благодарят д.ф.-м.н., профессора, академика РАН С.Т. Суржикова за руководство работой, разработку концепции и основополагающего предметно-ориентированного сценария работы ИИРС.

Работа выполнена по теме государственного контракта № 18208.4470019.19003 от 21.12.2018.

## Литература

1. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Поле течения около космического аппарата FIRE II под углом атаки // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/139/>
2. Surzhikov S.T. Radiative-convective heat transfer of a spherically shaped space vehicle in Carbon dioxide // High Temperature. 2011. Vol. 49. Pp. 92–107.
3. Surzhikov S.T. Coupled radiative gasdynamic interaction and non-equilibrium dissociation for large-scale returned space vehicles // Chemical Physics. 2012. Vol. 398. Pp. 56–63.
4. Shang J.S., Surzhikov S.T. Nonequilibrium radiative hypersonic flow simulation // Progress in Aerospace Sciences. 2012. Vol. 53. Pp. 46–65.
5. Surzhikov S.T. Radiative-collisional models in non-equilibrium aerothermodynamics of entry probes // J. Heat Transfer. 2012. Vol. 134. 031002.
6. Surzhikov S.T. Two-dimensional numerical analysis of flow ionization in the RAM-C-II flight experiment // Russian J. Physical Chemistry B. 2015. Vol. 9. Pp. 69–86.
7. Bessonov O.A., Silvestrov P.V. On the concept of the interactive information and simulation system for gas dynamics and multiphysics problems // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 815. 012019.
8. Сильвестров П.В., Бессонов О.А., Рыбаков А.Н. О концепции интерактивной информационно-расчетной системы для задач газовой динамики и междисциплинарных исследований // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т. 20, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-4/articles/864>
9. Tecplot Home – CFD visualization & analysis post-processing software. <https://www.tecplot.com/>
10. Паклин Н. Б., Орешков В. И. Визуализация данных // Бизнес-аналитика. От данных к знаниям. СПб.: Питер, 2013. С. 173–210.
11. Bessonov O.A., Silvestrov P.V. Development of a visualization module for aerogasdynamic computations // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1009. 012035.
12. Сильвестров П.В., Бессонов О.А., Ярмолюк В.Н. Концепция создания отечественного визуализатора результатов аэротермогазодинамических расчетов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т. 19, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-2/articles/725/>
13. Назаров В.С., Ларина Е.В., Смоляков А.А., Иванов И.Э., Крюков И.А. Численное исследование сверхзвукового обтекания затупленного конуса // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 8. С. 24–29. DOI: 10.14489/VKIT.2017.08. С. 024–029.
14. Яцухно Д.С. Численное моделирование аэродинамики волнолетов построенных на скачках уплотнения различной формы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2020. Т. 21, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-1/articles/881/>

## Reference

1. Zheleznyakova, A. L., Surzhikov, S. T., “Flow field around Fire II space vehicle under angle of attack,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 9, 2010. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/139/>

2. Surzhikov, S. T., “Radiative-convective heat transfer of a spherically shaped space vehicle in Carbon dioxide,” *High Temperature*, Vol. 49, 2011, pp. 92–107.
3. Surzhikov, S. T., “Coupled radiative gasdynamic interaction and non-equilibrium dissociation for large-scale returned space vehicles,” *Chemical Physics*, Vol. 398, 2012, pp. 56–63.
4. Shang, J. S., Surzhikov, S. T., “Nonequilibrium radiative hypersonic flow simulation,” *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 53, 2012, pp. 46–65.
5. Surzhikov, S. T., “Radiative-collisional models in non-equilibrium aerothermodynamics of entry probes,” *J. Heat Transfer*, Vol. 134, 2012. 031002.
6. Surzhikov, S. T., “Two-dimensional numerical analysis of flow ionization in the RAM-C-II flight experiment,” *Russian J. Physical Chemistry B*, Vol. 9, 2015, pp. 69–86.
7. Bessonov, O. A., Silvestrov, P. V., “On the concept of the interactive information and simulation system for gas dynamics and multiphysics problems,” *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 815, 2017, 012019.
8. Silvestrov, P.V., Bessonov, O. A., Rybakov, A. N., “A Concept of the Interactive Information and Modeling System for Gas Dynamics and Multidisciplinary Research,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 20, No. 4, 2019. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-4/articles/864>
9. Tecplot Home – CFD visualization & analysis post-processing software. <https://www.tecplot.com/>
10. Paklin, N. B., Oreshkov, V. I., “Vizualizacija dannyh,” *Biznes-analitika. Ot dannyh k znaniyam. SPb.: Piter*, 2013, pp. 173–210.
11. Bessonov, O. A., Silvestrov, P. V., “Development of a visualization module for aerogasdynamic computations,” *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1009, 2018, 012035.
12. Silvestrov, P.V., Bessonov, O. A., Yarmolyuk, V. N., “On the Concept of the National Visualization System for Aerogasdynamic Computations,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 19, No. 2, 2018. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-2/articles/725/>
13. Nazarov, V. S., Larina, E. V., Smoljakov, A. A., Ivanov, I. Je., Krjukov, I. A., “Chislennoe issledovanie sverhzhukovogo obtekanija zatuplennogo konusa,” *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tehnologij*, No. 8, 2017, pp. 24–29. DOI: 10.14489/VKIT.2017.08, pp. 024–029.
14. Yatsukhno, D. S., “Computational Study of the Different Waverider Configurations Aerodynamics,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 21, No. 1, 2020. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-1/articles/881/>

Статья поступила в редакцию 8 июня 2021 г.