



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 77 за 2023 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Е.Е. Лобанова, Н.И. Тарасов

Применение цифровой
платформы для
моделирования задач
газовой динамики

Статья доступна по лицензии
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Лобанова Е.Е., Тарасов Н.И. Применение цифровой платформы для моделирования задач газовой динамики // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2023. № 77. 20 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2023-77>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2023-77>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

Е.Е. Лобанова, Н.И. Тарасов

**Применение цифровой платформы
для моделирования задач газовой
динамики**

Москва — 2023

Лобанова Е.Е., Тарасов Н.И.

Применение цифровой платформы для моделирования задач газовой динамики

В работе рассмотрена оригинальная цифровая платформа, предназначенная для проведения суперкомпьютерного моделирования. Предложенная разработка обеспечивает динамическое встраивание пакетных приложений, автоматизацию вычислительных экспериментов путем объединения программ в функциональные блоки и запуск пользовательских заданий на удаленном вычислительном ресурсе с последующим доступом к результатам их работы. На примере встраивания приложения для моделирования задач обтекания были продемонстрированы удобство и эффективность предложенного решения.

Ключевые слова: автоматизация вычислительных экспериментов, цифровая платформа, веб-интерфейс, суперкомпьютерное моделирование, газодинамические расчеты

Ekaterina Evgenevna Lobanova, Nikita Igorevich Tarasov

Application of a digital platform for modeling gas dynamics problems

The paper discusses an original digital platform designed for supercomputer simulation. The proposed realization provides dynamic embedding of batch applications, automation of computational experiments by combining programs into functional blocks and launching user tasks on a remote computing resource with subsequent access to the results of the work. Using the example of embedding an application for modeling flow problems, the convenience and effectiveness of the proposed solution were demonstrated.

Keywords: automation of computational experiments, digital platform, web interface, supercomputer modeling, gas dynamic computations

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22–11-00126).

Оглавление

Введение	3
Постановка задачи и алгоритм расчета газодинамических задач	4
Цифровая платформа	7
Интеграция проблемно-ориентированной программы	9
Проведение вычислительных экспериментов	11
Результаты моделирования	17
Заключение.....	18
Библиографический список.....	19

Введение

Одним из актуальных классов задач газовой динамики сегодня является моделирование обтекания различных объектов потоком газообразных веществ различного состава. Полученные результаты могут быть использованы при разработке конструкций летательных аппаратов, авто- и железнодорожного транспорта. Решение задач обтекания позволяет подробно исследовать аэродинамику рассматриваемых моделей и оптимизировать ее посредством изменения геометрических параметров объектов. Кроме того, полученные распределения давления могут быть впоследствии использованы в качестве исходных данных для дальнейших прочностных расчетов.

Модели газовой динамики строятся на основании уравнений Навье-Стокса, которые решаются впоследствии сеточными методами. Получаемые вычислительные алгоритмы при этом представляют собой высокую вычислительную сложность. Кроме того, при высокой сложности исследуемого объекта, его близости к реальной геометрии увеличивается объем расчетной сетки. Данные факты определяют недостаточность использования в качестве вычислительного устройства персонального компьютера. Для проведения полномасштабных исследований, включающих моделирование большого количества вариантов постановок, приходится прибегать к суперкомпьютерным мощностям.

Для эффективного использования суперкомпьютеров и иных удаленных вычислительных устройств сегодня широко распространяется подход веб-лабораторий. Они могут быть основаны на различных подходах и технологиях, разделяясь, по большому счету, на две категории: сильно интегрированные в предметную область для интерактивной подготовки вычислительного эксперимента и каталогизации результатов расчета [1, 2]; допускающие интеграцию стороннего программного обеспечения для автоматизации процесса проведения вычислительного эксперимента [3, 4]. Кроме того, для моделирования тепломассопереноса (в том числе с применением многомасштабного подхода [5]) была разработана цифровая платформа [6, 7], стремящаяся к объединению представленных категорий.

Основными преимуществами предлагаемой веб-лаборатории являются:

- возможность интеграции пакетных программ, включающая генерацию графического веб-интерфейса;
- доставка конечному пользователю актуальных версий проблемно-ориентированных приложений;
- низкие системные требования к компьютеру пользователя, как программные (для использования достаточно веб-браузера), так и аппаратные (вычисления производятся на удаленном суперкомпьютере);
- возможность работы над одним проектом разными пользователями (многопользовательский режим);

- возможность использовать различные вычислительные ресурсы в рамках единого интегрированного графического интерфейса.

Далее работа построена следующим образом: в начале приводится постановка задачи обтекания цилиндра, описывается модель и алгоритм решения задачи; затем приведено общее описание цифровой платформы и указаны особенности встраивания предложенного проблемно-ориентированного приложения; далее приводятся результаты численного моделирования и подводятся итоги проведенного исследования.

Постановка задачи и алгоритм расчета газодинамических задач

В работе рассматривается сверхзвуковое обтекание сферически затупленного цилиндра (радиус затупления 0.006 м, длина 0.046 м). На рис. 1 изображена геометрия расчетной области, синим цветом показана область течения. Задача решается в осесимметричной постановке. Угол атаки $\alpha = 0^\circ$.

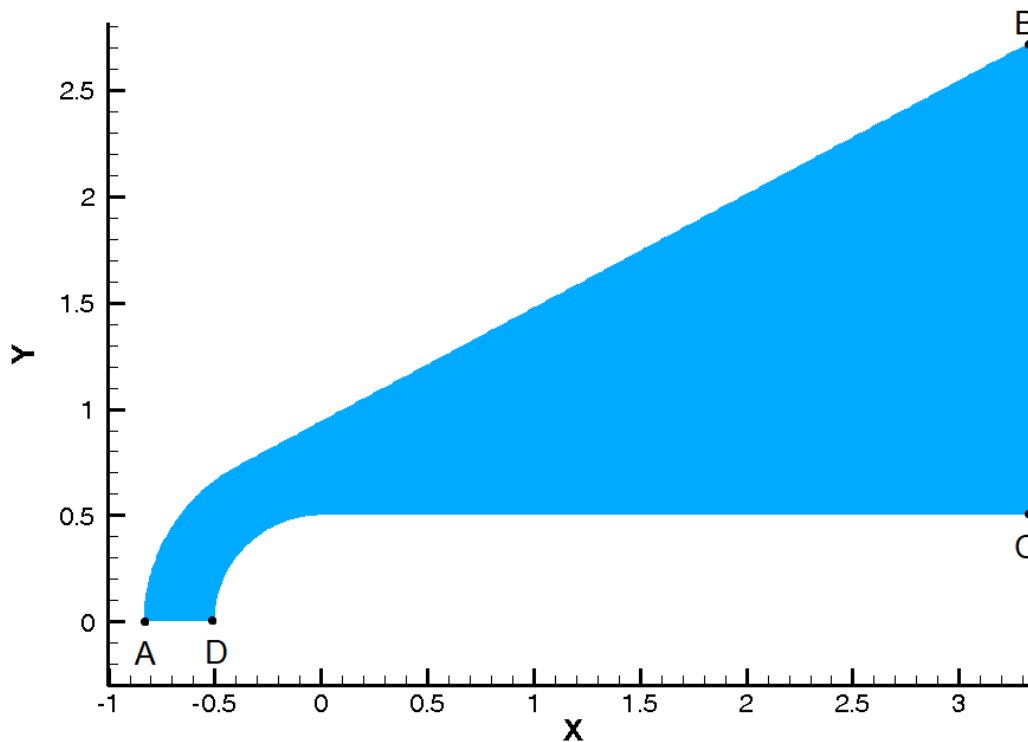


Рис. 1. Расчетная область

Граничные условия:

- на входном участке АВ задается равномерный поток;
- на выходном участке ВС – условия свободного выхода («мягкие» граничные условия);
- на поверхности тела CD – условие прилипания;
- на участке AD задаются условия осевой симметрии.

Начальное условие задается параметрами невозмущенного потока.

Для моделирования процесса обтекания сферически-затупленного цилиндра воспользуемся системой уравнений Навье-Стокса в осесимметричной постановке. В консервативной форме система имеет следующий вид [8]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = H, \quad (1)$$

где $U = (\rho, \rho u, \rho v, e)^T$ – вектор консервативных переменных, здесь ρ – плотность, (u, v) – компоненты вектора скорости, e – полная энергия течения,

$F = F^i + F^v$, $G = G^i + G^v$, $H = \frac{\omega}{y}(H^i + H^v)$ – векторы потоков,

$$\omega = \begin{cases} 0 & \text{плоская постановка} \\ 1 & \text{осесимметричная постановка} \end{cases},$$

$$F^i = (\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (e + p)u)^T, \quad F^v = (0, -\tau_{xx}, -\tau_{xy}, -u\tau_{xx} - v\tau_{xy} - q_x)^T,$$

$$G^i = (\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (e + p)v)^T, \quad G^v = (0, -\tau_{xy}, -\tau_{yy}, -u\tau_{xy} - v\tau_{yy} - q_y)^T,$$

$$H^i = (-\rho v, -\rho uv, -\rho v^2, -(e + p)v)^T, \quad H^v = (0, \tau_{xx}, \tau_{yy} - \tau_{\varphi\varphi}, u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + q_y)^T,$$

$$F^i = (\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (e + p)u)^T, \quad F^v = (0, -\tau_{xx}, -\tau_{xy}, -u\tau_{xx} - v\tau_{xy} - q_x)^T,$$

$$G^i = (\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (e + p)v)^T, \quad G^v = (0, -\tau_{xy}, -\tau_{yy}, -u\tau_{xy} - v\tau_{yy} - q_y)^T,$$

$$H^i = (-\rho v, -\rho uv, -\rho v^2, -(e + p)v)^T, \quad H^v = (0, \tau_{xx}, \tau_{yy} - \tau_{\varphi\varphi}, u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + q_y)^T.$$

Компоненты тензора напряжений:

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3}\mu \left(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

$$\tau_{yy} = \frac{2}{3}\mu \left(2\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad \tau_{\varphi\varphi} = -2\mu \left[\frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{v}{y} \right],$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, $q = (q_x, q_y)$ – тепловой поток, p – давление.

Термодинамическое давление p вычисляется по уравнению состояния совершенного газа:

$$p = (\gamma - 1) \rho \left(e - \frac{u^2 + v^2}{2} \right). \quad (2)$$

Здесь γ – показатель адиабаты, для воздуха $\gamma = 1.4$. Он может вычисляться также с помощью функции TGAS4, разработанной в NASA [9] и предназначенной для расчета термодинамических свойств равновесного газа.

Система уравнений (1)–(2) дополняется граничными и начальными условиями и приводится к безразмерной форме.

Полученные уравнения дискретизируются по пространственным переменным методом конечных объемов [10]. Для аппроксимации уравнений по времени используется явный метод Эйлера [11]. Численные потоки, отвечающие невязким членам, находятся из решения задачи Римана (точного или приближенного [12]). Для этого требуется восстановить значения плотности, давления и скорости на гранях ячеек сетки расчетной области, что выполняется с помощью WENO-реконструкции [13].

Вычислительный алгоритм имеет следующий вид. Для каждого временного шага:

- 1) в цикле по всем внутренним граням сетки вычисляются потоки; Невязкий поток на грани ячейки представляется через локально-одномерный поток в нормальном для грани направлении. Для аппроксимации невязкого потока на грани счетной ячейки используется обобщенная схема Годунова с интерполяционной схемой WENO. Шаблон для WENO-реконструкции выстраивается на основе информации о соседях. Аппроксимация вязкого потока на грани счетной ячейки в правой части уравнения вычисляется интерполяцией сеточных значений и их производных;
- 2) в цикле по всем граням, принадлежащим границе определенного типа, вычисляются соответствующие потоки на основании заданных граничных условий;
- 3) в цикле по всем ячейкам сетки вычисляются функции на следующем временном слое;
- 4) обмен данными между процессорами (в случае многопроцессорного варианта).

Представленный вычислительный алгоритм был реализован в рамках оригинального проблемно-ориентированного приложения. Программа предназначена для расчета двумерных течений вязкого сжимаемого газа на структурированных сетках в рамках моделей уравнений Навье-Стокса с расчетом термодинамических свойств равновесного газа. Уравнения Эйлера и Навье-Стокса решаются методами WENO и TVD. Течение может быть плоским или осесимметричным.

Код программы реализован посредством языка программирования C++. Он принимает на вход текстовый файл с параметрами расчета и файл с сеткой с расширением .dat. На выходе создается два файла: бинарный файл с

результатом расчета и файл с расширением .dat. Используя бинарный файл, можно продолжить расчет с точки остановки.

Цифровая платформа

Предлагаемая цифровая платформа представляет собой клиент-серверное решение. Разработанная архитектура позволяет осуществлять динамическое встраивание удаленных вычислительных ресурсов, а также проблемно-ориентированных приложений для проведения вычислительных экспериментов на удаленных суперкомпьютерах. Сервер цифровой платформы разработан с применением программного каркаса NestJS [14], обеспечивающего возможности маршрутизации и взаимодействия с базой данных, и основывается на работе в рамках окружения Node.js [15]. Схема взаимодействия сервера веб-лаборатории приведена на рис. 2.

Пользователь системы имеет возможность обращения к цифровой лаборатории посредством веб-браузера, в результате которого платформа представит необходимый для генерации графического интерфейса набор разметок страниц и скриптов. Отметим, что графический интерфейс реализован посредством программного каркаса Vue.js [16], обеспечивающего одностраничный подход построения приложений с использованием реактивной парадигмы. Последующие запросы данных от сервера, включающие получение информации из базы данных, осуществляются через веб-сокеты [17] соединения, устанавливаемое после авторизации пользователя.

Сервер веб-лаборатории организует взаимодействие с удаленными вычислительными ресурсами на основании записей в базе данных, содержащих информацию об имени хоста и порте подключения, типе протокола (в настоящий момент поддерживается SSH-протокол) и системе прохождения пользовательских заданий. Данные сведения позволяют осуществлять соединение для выполнения команд, в том числе запуска расчетных заданий, и доступа к файловой системе удаленного вычислительного ресурса, для подготовки прикладных программ и сервисных утилит, а также исходных данных вычислительных экспериментов.

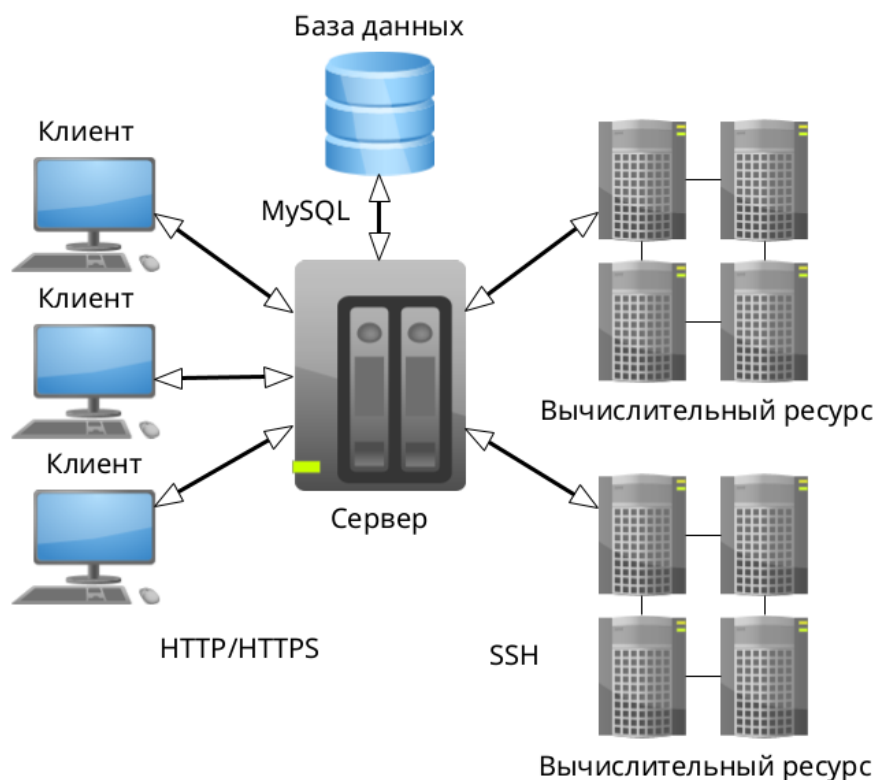


Рис. 2. Схема взаимодействия цифровой платформы

Рассмотрим основные особенности организации доступа к веб-платформе. Поскольку подобные веб-лаборатории предполагают ограниченный и авторизованный доступ к функциональным возможностям системы, регистрация осуществляется посредством специального ключа, предоставляемого пользователям администратором, задаваемого в специальном поле формы регистрации. На основании данного ключа пользователю назначаются роли, определяющие его возможности взаимодействия с цифровой платформой. На текущий момент предусмотрены следующие роли:

- расчетчик, основная деятельность которого связана с проведением вычислительных экспериментов;
- разработчик программного обеспечения, имеющий возможность интеграции проблемно-ориентированных приложений;
- администратор системы, отвечающий за базу данных системы, также имеющий возможность регистрации новых вычислительных ресурсов.

После регистрации, кроме записи с учетными данными, в базе платформы генерируются записи-связи с вычислительными ресурсами, в рамках которых посредством специальных форм задаются рабочая директория и имя пользователя, а также происходит генерация SSH-RSA-ключа, по которому будет происходить авторизация на удаленном вычислительном ресурсе.

Рассмотрим далее общие принципы использования веб-среды пользователями-разработчиками и расчетчиками.

Интеграция проблемно-ориентированной программы

Интеграция прикладных программ в систему происходит посредством создания новой сущности «Приложение» с помощью соответствующей графической формы. Данная форма содержит строковые поля «Название», используемое для отображения программы в системе; «Идентификатор», обеспечивающий доступ к сущности в рамках сценария (сущность «Сценарий» будет рассмотрена далее) и список пользователей, являющихся разработчиками приложения. Кроме того, поскольку для хранения исходного кода цифровая платформа использует систему управления версиями git[18], пользователю предлагается выбрать тип инициализации директории-репозитория: пустым; на основе приложенного архива; посредством клонирования репозитория. Дальнейшее взаимодействие с исходным кодом приложения осуществляется посредством утилиты git с указанием специально выделенного маршрута сервера цифровой платформы, указанного на странице приложения (см. рис. 3, поле «url»).

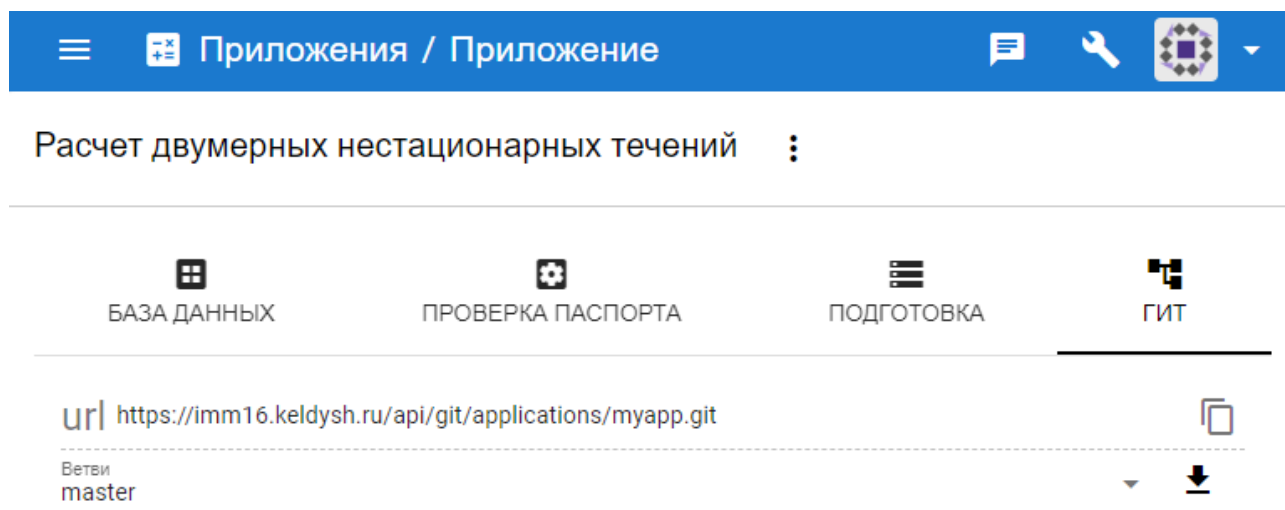


Рис. 3. Страница приложения

Репозиторий с исходным кодом приложения должен содержать файл-метаописание под названием «passport.yaml» в формате YAML[19]. Данный файл содержит команду сборки, описание запуска, дерево входных параметров и список выходных данных. На его основе цифровая платформа будет осуществлять использование программы, включая следующее: сборку на удаленном вычислительном ресурсе; подготовку файлов и параметров конфигурации; генерацию элементов графического интерфейса для задания исходных данных; запуск и слежение за выполнением приложения; доступ к результатам расчета. Пример паспорта приложения приведен на рис. 4.

```

build:
  g++ -o test f1.cpp f2.cpp riem_cuda.cpp
exec:
  runBy: exec
  command: test
  args:
    - key: ''
      val: argg

inputs:
  ident: all
  name: all
  descr: All params category
  type: category
  options:
    format: tabs
  children:
    - ident: config
      name: Параметры расчета и потока
      descr: Файл с параметрами
      type: config
      options:
        path: par_i.txt
        format: plain
      children:
        - ident: par1
          name: Параметры расчета
          descr: Параметры расчета
          type: form
          children:
            - ident: IT
              name: IT
              descr: Количество ячеек по  $x + 4$ 
              type: field
              options:
                default: 388
                format: int
            - ident: JT
              name: JT

```

→

ЗАПУСК

📄

ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

📤

ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТА И ПОТОКА

ФАЙЛ С СЕТКОЙ

БИОАФ

ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТА

ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА

Данные не сохранены

IT

388

Количество ячеек по $x + 4$

JT

100

Количество ячеек по $y + 4$

Максимальное время расчета

10

Максимальное количество шагов расчета

250

Количество шагов для выдачи промежуточного файла

100

Флаг начала расчета с предварительного файла

0

0 - расчет с начальных данных, 1 - расчет с предварительного файла

ПРИНЯТЬ

ОТМЕНИТЬ

Рис. 4. Фрагмент паспорта приложения (слева) и пример сгенерированного на его основе веб-интерфейса (справа)

Перед непосредственным использованием приложения необходимо осуществить его подготовку на удаленных вычислительных ресурсах, доступных пользователю. Для этого необходимо обратиться к вкладке «Подготовка» страницы приложения (см. рис. 5), выбрать версию (git-ветвь) для вычислительного ресурса и нажать кнопку «Развернуть». В результате данных действий сервер веб-лаборатории отправит исходный код указанной версии на удаленный вычислительный ресурс в рабочую директорию и вызовет команду сборки, указанную в паспорте приложения. Интерфейс при этом будет предоставлять актуальную информацию о процессе подготовки.

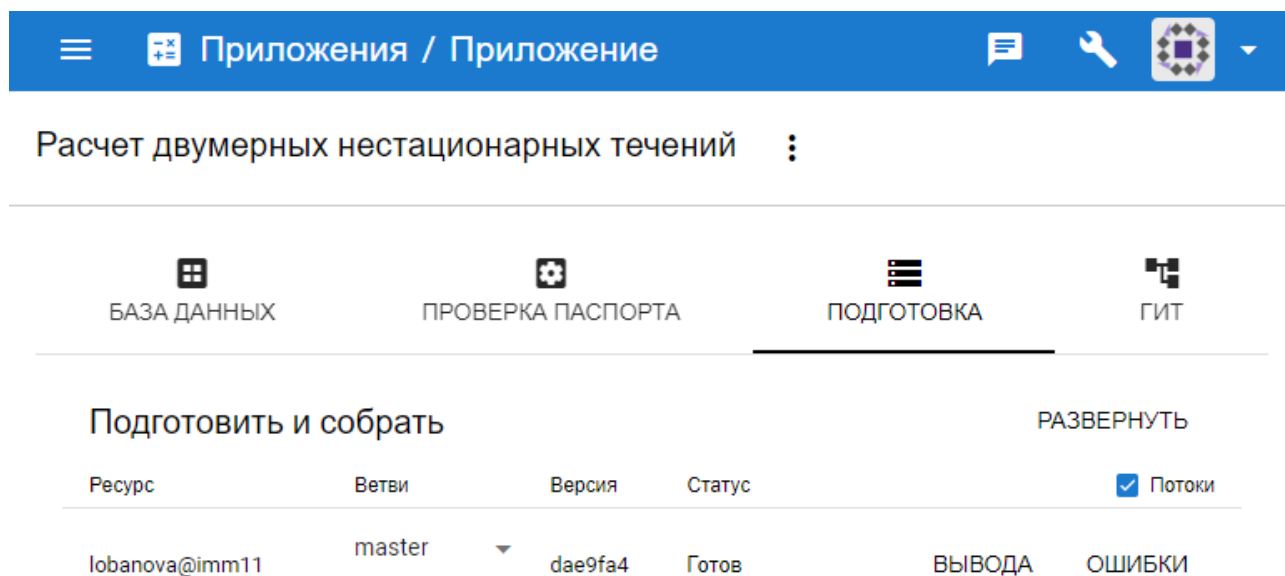


Рис. 5. Интерфейс подготовки приложения

Для автоматизации вызова приложений и утилит в рамках системы используется сущность «Сценарий». Основным его предназначением является группировка зарегистрированных в системе программ в функциональные блоки с определенными связями входных и выходных параметров и порядком запуска.

Для создания нового сценария необходимо обратиться к соответствующей странице, содержащей форму описания. По аналогии с приложением, сценарий требует задания названия, пользователей-разработчиков и тип инициализации репозитория. Репозиторий должен содержать файл «script.yaml», который будет использован системой для генерации интерфейса вычислительного эксперимента. В рамках данного метаописания задаются используемые приложения с обращением через идентификатор, список связей между данными приложениями и список этапов исполнения.

Проведение вычислительных экспериментов

Проведение вычислительных экспериментов основывается на сущностях «Проект» и «Расчет». Проекты, создаваемые в системе, предназначены в первую очередь для группировки расчетов и определения участников для обеспечения многопользовательской работы. При обращении к форме создания нового проекта от пользователя требуется задание его названия, текстового описания и списка пользователей, которые будут иметь полный доступ как к проекту, так и к его расчетам.

Расчет, создаваемый в рамках конкретного проекта в рамках своей формы, кроме информационных полей «Название» и «Описание», требует выбора сценария работы и версии (git-ветви). На основании выбранного сценария и

входящих в него приложений генерируется веб-интерфейс страницы расчета (примером могут выступить вкладки, изображенные на рис. 6–10).

На вкладке «Подготовка», изображенной на рис. 6, пользователи могут осуществить выбор вычислительного ресурса (с учетом доступа пользователя) для каждого из приложений, участвующих в сценарии. При нажатии кнопки «Принять» веб-лаборатория подготовит рабочую директорию для приложения, создаст мягкую ссылку на исполняемый файл приложения, а также создаст выходные директории, указанные в паспорте.

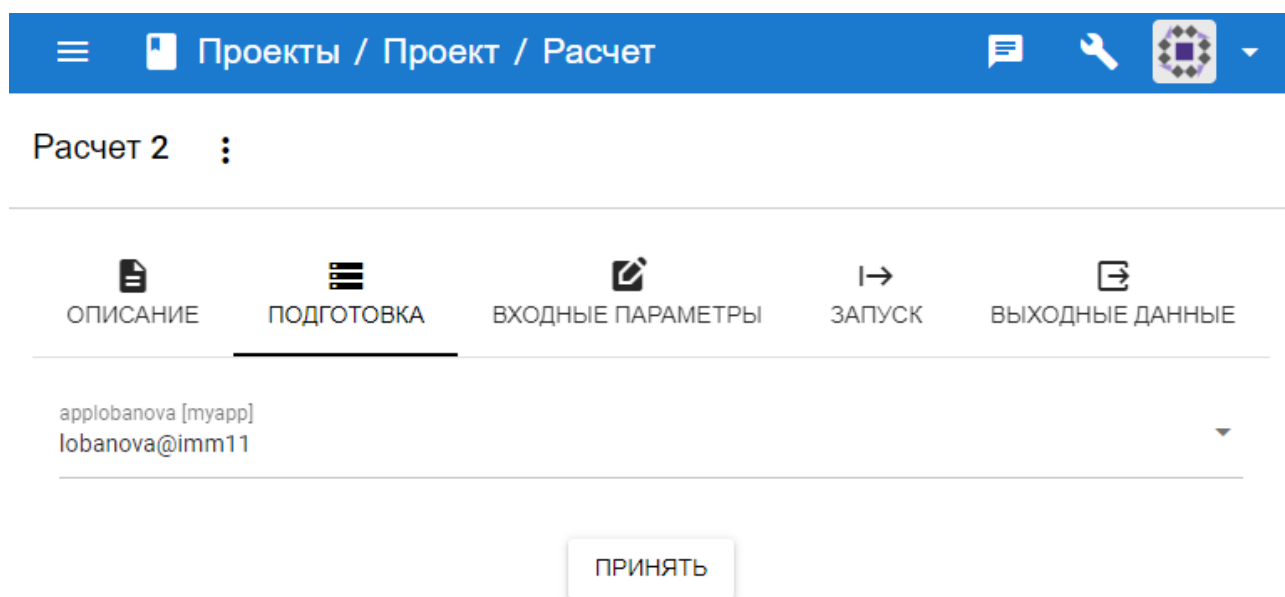


Рис. 6. Подготовка расчета

На вкладке «Входные параметры» пользователем задаются управляющие параметры и файлы данных, необходимые для запуска приложений. В случае приложения для расчета газодинамических течений, описанного в рамках данной работы, в их число входят следующие категории.

Категория «Параметры расчета» позволяет задать параметры расчета: количество ячеек, максимальное время расчета, максимальное количество шагов расчета, количество шагов для выдачи промежуточного файла и флаг начала расчета с предварительного файла (см. рис. 7).

Категория «Параметры потока» содержит поля, позволяющие задать параметры потока и термодинамические характеристики: число Маха, число Рейнольдса, флаг постановки задачи (плоская или осесимметричная), число Куранта.

Проекты / Проект / Расчет

ОПИСАНИЕПОДГОТОВКАВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫЗАПУСКВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТА И ПОТОКАФАЙЛ С СЕТКОЙБИНАРНЫЙ ФАЙЛ

ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТАПАРАМЕТРЫ ПОТОКА

Данные не сохранены

IT

388

Количество ячеек по x + 4

JT

100

Количество ячеек по y + 4

Максимальное время расчета

10

Максимальное количество шагов расчета

250

Количество шагов для выдачи промежуточного файла

100

Флаг начала расчета с предварительного файла

0

0 - расчет с начальных данных, 1 - расчет с предварительного файла

ПРИНЯТЬОТМЕНИТЬ

Рис. 7. Графический интерфейс окна входных параметров.
Параметры расчета и потока

Категория «Файл с сеткой» позволяет приложить сетку либо посредством отправки файла с компьютера пользователя, либо посредством связи с выходными данными, полученными в других расчетах. Продолжение расчета с

контрольной точки осуществляется загрузкой бинарного файла, полученного в результате прошлого запуска программы в категории «Бинарный файл».

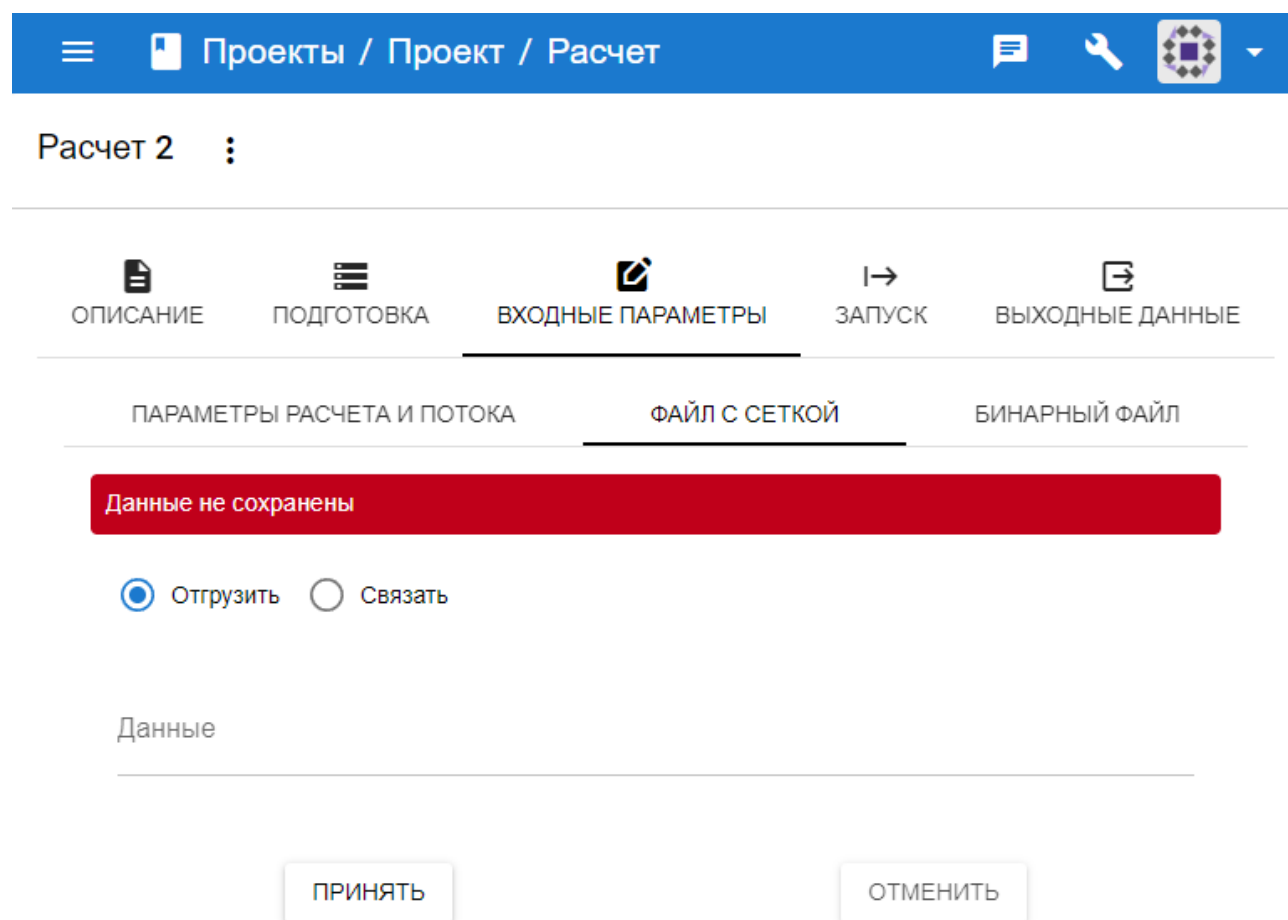


Рис. 8. Графический интерфейс окна входных параметров.
Окно загрузки файла с сеткой

На вкладке «Запуск», изображенной на рис. 9, осуществляется управление пользовательским заданием в соответствии со списком исполнения сценария. В рамках предлагаемого интерфейса реализованы возможности остановки и запуска как каждого отдельного приложения, так и сценария в целом, осуществляется вывод актуального состояния пользовательского задания, а также возможен доступ к содержимому стандартных потоков вывода и ошибки.

При запуске задачи веб-лаборатория подготавливает файлы конфигурации приложения, отправляет исходные данные на удаленный вычислитель, формирует команду запуска на основании системы прохождения заданий и типа выполняемого приложения, осуществляет ее вызов.

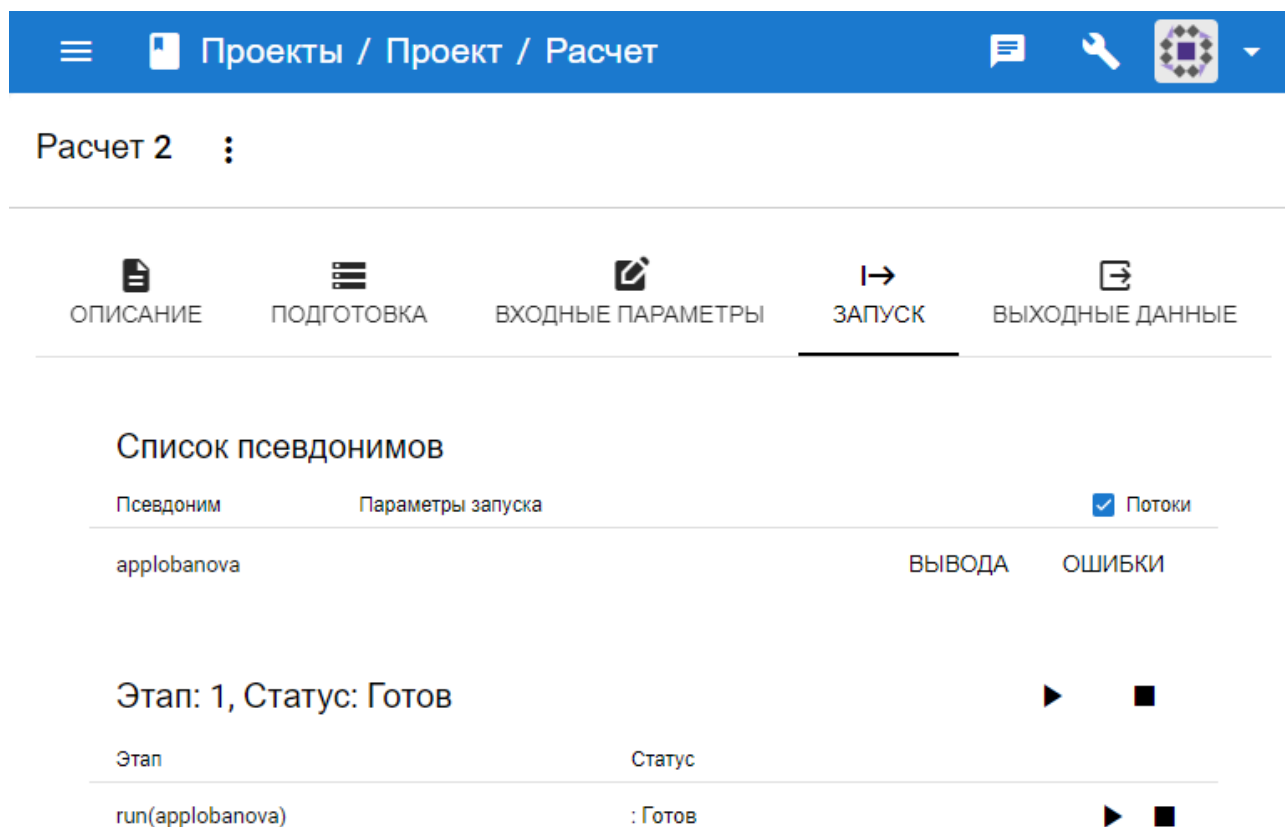


Рис. 9. Графический интерфейс окна запуска расчета

В любой момент расчета пользователь системы может обратиться к вкладке «Выходные данные» (см. рис. 10), содержащей список выходных данных для каждого приложения сценария, указанный в паспорте. В рамках системы реализованы возможности очистки и загрузки на компьютер пользователя выходных данных. Кроме того, реализована возможность просмотра непосредственно в рамках веб-интерфейса текстовых файлов, изображений и видеофайлов. Также на основе ParaViewWeb [20] реализован интерфейс интерактивной трехмерной визуализации, поддерживающий средствами ParaView широкий набор форматов сеточных и несеточных данных. Основной особенностью предлагаемой технологии является возможность отрисовки данных на удаленном вычислительном ресурсе. В графический интерфейс при этом отправляются растровые изображения, что позволяет существенно уменьшить нагрузку на компьютер пользователя, а также уменьшить размер передаваемых данных.

В рамках веб-лаборатории с использованием представленного интерфейса была проведен вычислительный эксперимент посредством встроенного приложения. После завершения расчета проблемно-ориентированным приложением был подготовлен файл визуализации. Интерфейс удаленной визуализации представлен на рис. 11.

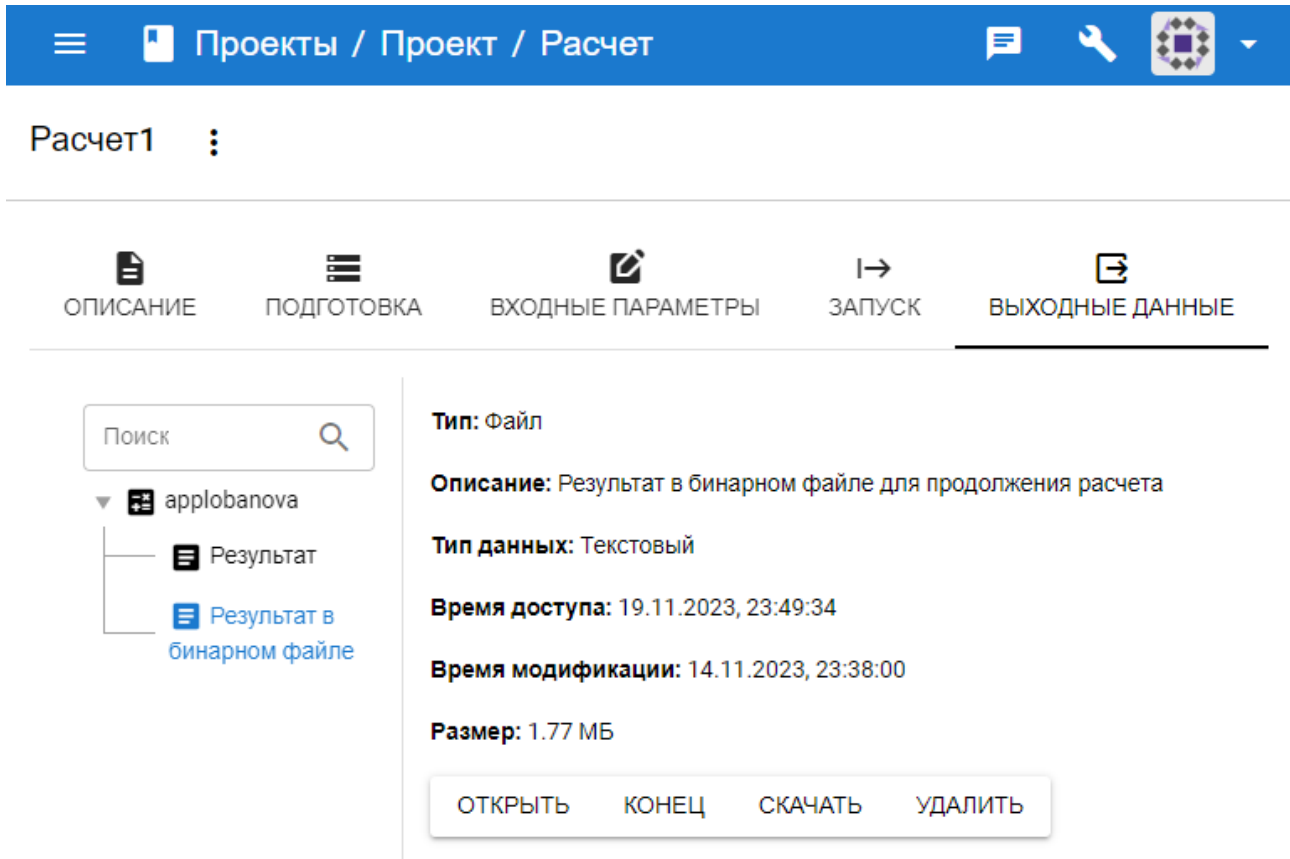


Рис. 10. Выходные данные расчета

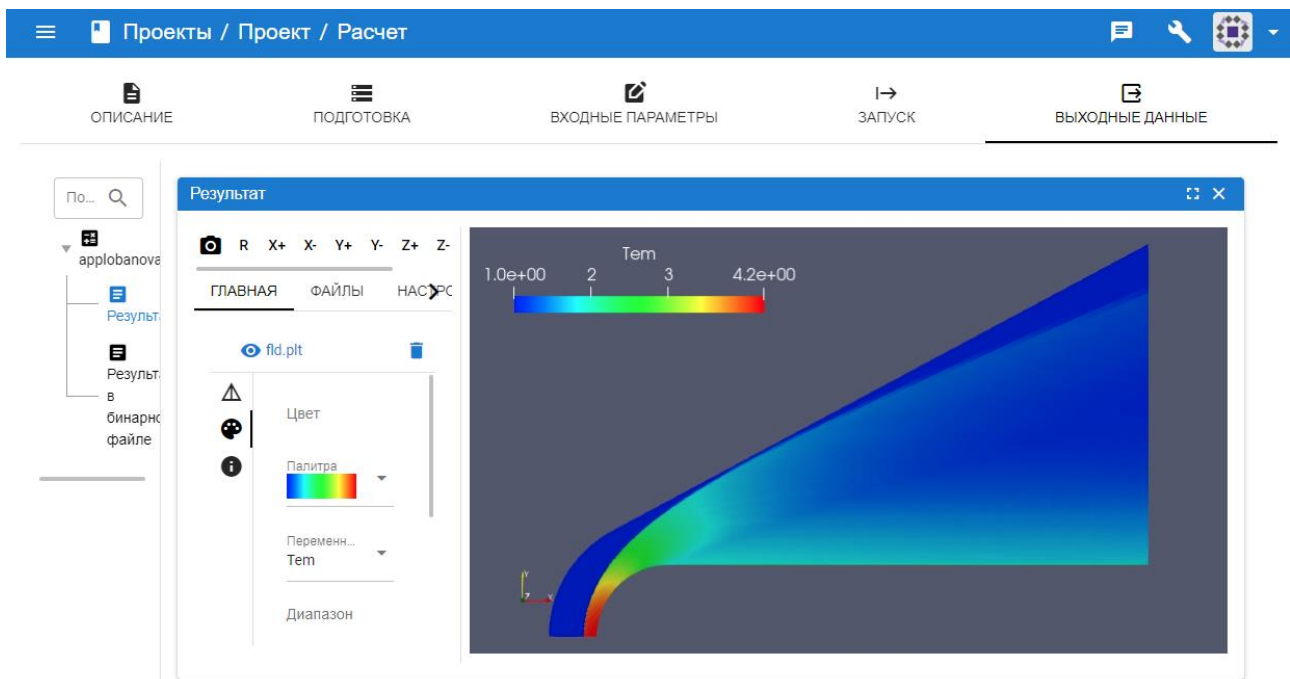


Рис. 11. Интерфейс интерактивной визуализации

Результаты моделирования

В расчете рассматривался набегающий поток с параметрами: число Маха 4, число Рейнольдса 10^7 , угол атаки $\alpha = 0^\circ$. Расчетная сетка, изображенная на рис. 12, содержит 36864 ячеек (384 поперечных шагов, 96 продольных). Шаг по времени был рассчитан программой – $2.5e-04$ с, количество шагов – 250000. Результаты модельного расчета приведены на рис. 13 и рис. 14.

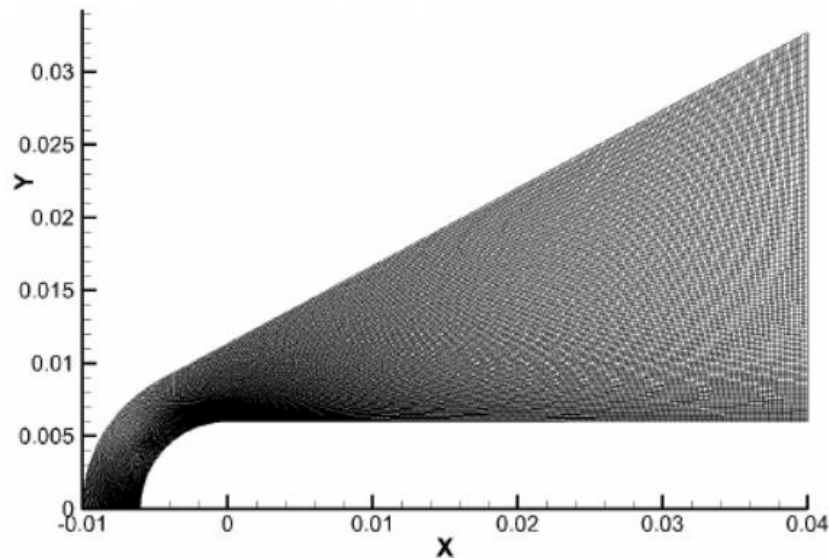


Рис. 12. Расчетная сетка

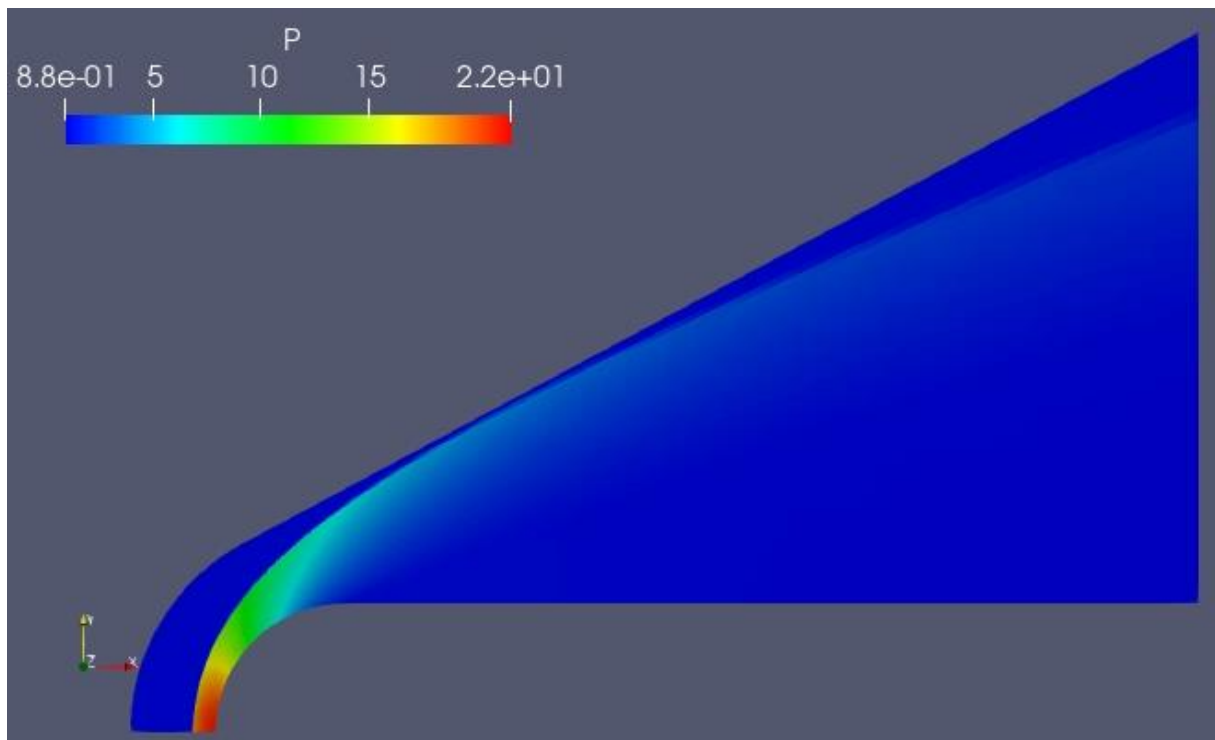


Рис. 13. Распределение давления

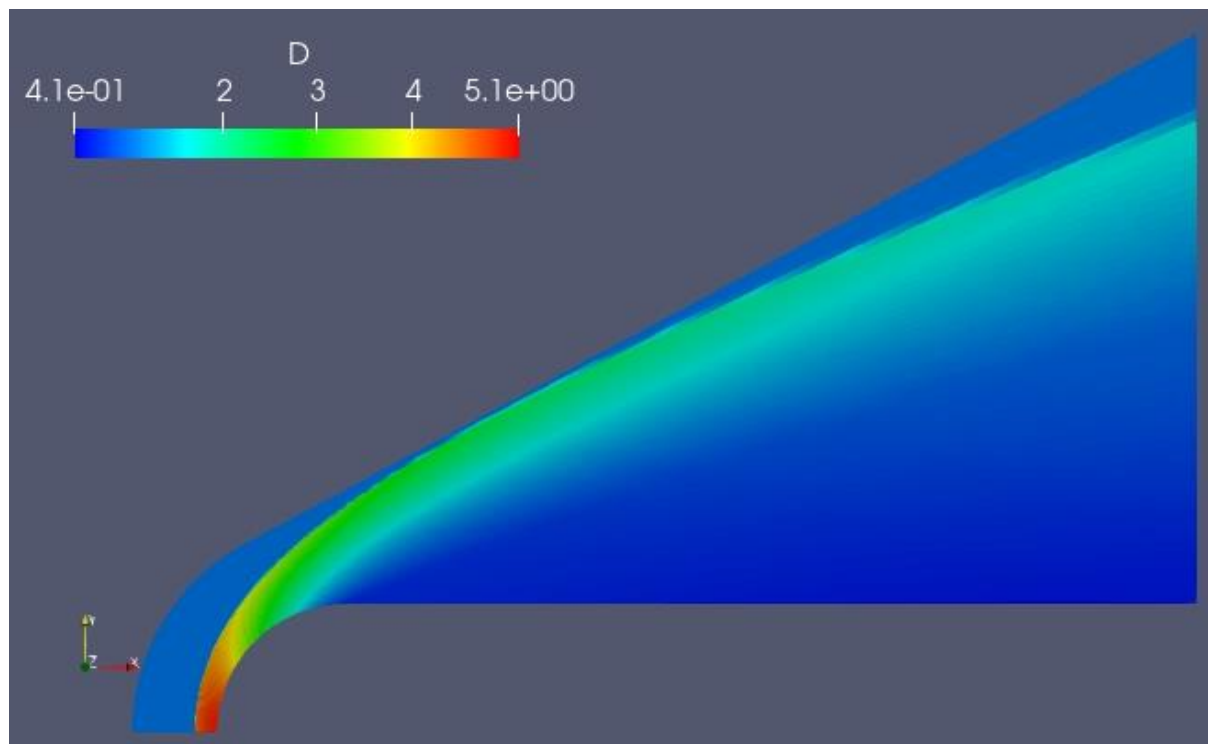


Рис. 14. Распределение плотности

Полученные в рамках вычислительного эксперимента распределения характеристик потока согласуются с теоретическими представлениями о процессе и данными, известными из литературы [21]. При этом существующая функциональность цифровой платформы позволила провести полный цикл вычислительного эксперимента, включающий подготовку приложения, конфигурацию и запуск расчетного задания, анализ результатов расчета, посредством предлагаемого веб-интерфейса.

Заключение

В проведенном исследовании была рассмотрена оригинальная цифровая платформа, унифицирующая взаимодействие с различными удаленными вычислительными ресурсами и позволяющая интегрировать сторонние прикладные приложения. Интеграция программ позволяет осуществлять их подготовку на удаленных вычислительных ресурсах, а также конфигурировать, запускать и управлять пользовательскими заданиями – вычислительными экспериментами. Для анализа результатов в рамках платформы предлагается набор средств интерактивной визуализации.

Использование веб-среды позволяет без установки дополнительного программного обеспечения с помощью веб-браузера производить научные вычисления, использующие сложные модели и требующие большой вычислительной мощности, удаленно подключаясь к суперкомпьютерам и вычислительным кластерам. Таким образом, предложенное решение может

быть полезно как для разработчиков проблемно-ориентированных программ, так и для конечных пользователей данного программного обеспечения.

Библиографический список

1. Sukhoroslov O., Volkov S., Afanasiev A. A web-based platform for publication and distributed execution of computing applications // Proc. 14th International Symposium on Parallel and Distributed Computing (ISPDC), June 29 – July 2, 2015, Limassol, Cyprus. 175–184. <https://doi.org/10.1109/ISPDC.2015.27>
2. Prove your design: structural simulation and analysis in the cloud. URL: <https://prove.design>. (Дата обращения: 23.10.2023).
3. pSeven Enterprise. URL: <https://www.pseven.io/product/pseven-enterprise/> (Дата обращения: 23.10.2023).
4. Sukhoroslov O., Volkov S., Afanasiev A. A web-based platform for publication and distributed execution of computing applications // Proc. 14th International Symposium on Parallel and Distributed Computing (ISPDC), June 29 – July 2, 2015, Limassol, Cyprus. 175–184. <https://doi.org/10.1109/ISPDC.2015.27>
5. Карамзин Ю.Н., Кудряшова Т.А., Подрыга В.О., Поляков С.В. Многомасштабное моделирование нелинейных процессов в технических микросистемах // Матем. моделирование. – Т. 27. – № 7. – С. 65-74.
6. Тарасов Н.И. Архитектура и реализация цифровой платформы для проведения вычислительных экспериментов на суперкомпьютерах // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2022. – № 50 – 30 с. – <https://doi.org/10.20948/prepr-2022-50>
7. Tarasov N., Polyakov S., Podryga V. Development of Web Environment for Modeling the Processes of Macroscopic and Microscopic Levels for Solving Conjugate Problems of Heat and Mass Transfer. // Lecture Notes in Computer Science. – 2022. – V. 13708. – Pp. 77-91. / In: Voevodin, V., Sobolev, S., Yakobovskiy, M., Shagaliev, R. (eds). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22941-1_6
8. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2 т.: Т. 2: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
9. Srinivasan S., Tannehill J. C. Simplified curve fits for the transport properties of equilibrium air. – 1987. – №. NASA 1.26: 178411.
10. Eymard R. The finite volume method / R. Eymard, T. R. Gallouet, R. Herbin // Handbook of Numerical Analysis, Elsevier. – 2000 – Vol. 7 – Pp. 713-1020.
11. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. – М.: Наука – 1989. – 432 с.
12. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука. — 1976.

13. Chi-Wang Shu. Essentially Non-Oscillatory and Weighted Essentially Non-Oscillatory Schemes for Hyperbolic Conservation Laws // NASA/CR-97-206253, ICASE Report – 1997. – №. 97-65
14. NestJS – A progressive Node.js framework. URL: <https://nestjs.com/>. (Дата обращения: 23.10.2023).
15. Node.js. URL: <https://nodejs.org/>. (Дата обращения: 23.10.2023).
16. Vue.js – The Progressive JavaScript Framework | Vue.js. URL: <https://vuejs.org/>. (Дата обращения: 23.10.2023).
17. RFC 6455 – The WebSocket Protocol. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6455>. (Дата обращения: 23.10.2023).
18. Git. URL: <https://git-scm.com/>. (Дата обращения: 23.10.2023).
19. The Official YAML Web Site. URL: <https://yaml.org/>. (Дата обращения: 23.10.2023).
20. ParaViewWeb. URL: <https://kitware.github.io/paraviewweb/>. (Дата обращения: 23.10.2023).
21. Суржиков С.Т. Расчетное исследование аэротермодинамики гиперзвукового обтекания затупленных тел на примере анализа экспериментальных данных. – М.: ИПМех РАН, 2011. – 192 с. – ISBN 978-5-91741-033-3