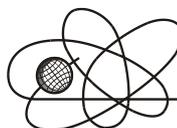




*Российская Академия Наук*

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



**ИБРАЭ**

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY  
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2018-14

Preprint IBRAE-2018-14

**А. Е. АКСЕНОВА, А. А. КОРОТКОВ, В. А. ПЕРВИЧКО,  
В. В. ЧУДАНОВ**

**ГРАФИЧЕСКИЙ ПОСТПРОЦЕССОР  
VISUALIZATOR  
ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ CONV-3D/V2**

Москва  
2018

Moscow  
2018

УДК 519.6

Аксенова А.Е., Коротков А.А., Первичко В.А., Чуданов В.В. ГРАФИЧЕСКИЙ ПОСТПРОЦЕССОР VISUALIZATOR ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ CONV-3D/V2. Препринт № ИБРАЭ-2018-14. Москва: ИБРАЭ РАН, 2018. — 46 с. — Библиогр.: 9 назв. — 100 экз.

#### Аннотация

В работе представлено программное обеспечение Visualizator, которое позволяет быстро выполнять постпроцессинг после решения задач расчетным модулем CONV-3D/V2. В документе представлено описание графического пользовательского интерфейса (GUI) редактора и особенности функциональности, связанные с численным и визуальным контролем результатов расчётов. Visualizator является одной из составляющих системы подготовки, выполнения расчетов и контроля результатов численных экспериментов, выполненных CFD-модулем CONV-3D/V2, предназначенного для анализа и обоснования безопасности АЭС.

©ИБРАЭ РАН, 2018

#### Abstract

Aksenova A.E., Korotkov A.A., Pervichko V.A., Chudanov V.V. Graphic post-processing software Visualizator for CFD computing module CONV-3D. Preprint № ИБРАЭ-2018-14. Moscow: Nuclear Safety Institute, 2018. – 46 p. - Bibliography: 9 references. - 100 copies.

The paper presents the Visualizator software that allows you to perform checking of the results of the calculations of CFD module CONV-3D. The document presents a graphical user interface (GUI) and computing features of the program, including visualization of computing experiments results. Visualizator is a component of the package that includes CFD module CONV-3D/V2 built for purposes of analysis of NPP safety.

©Nuclear Safety Institute, 2018

# Графический постпроцессор Visualizator для вычислительного модуля CONV-3D/V2

А.Е. Аксенова, А. А. Коротков, В. А. Первичко, В. В. Чуданов

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52

тел.: (495) 955-22-34, факс: (495) 958-11-51, эл. почта: chud@ibrae.ac.ru

## Оглавление

Определения и сокращения.....	5
Введение .....	6
Общие сведения о программе Visualizator.....	6
<i>Основные функции Visualizator.....</i>	<i>6</i>
<i>Быстрый старт.....</i>	<i>6</i>
<i>Условия, необходимые для работы с программой.....</i>	<i>7</i>
<i>Требования к техническим средствам.....</i>	<i>7</i>
<i>Дополнительное ПО, необходимое для функционирования программы Visualizator.....</i>	<i>8</i>
<i>Комплект поставки.....</i>	<i>8</i>
Особенности интерфейса пользователя программы Visualizator.....	8
<i>Основное окно.....</i>	<i>8</i>
<i>Работа с объектами .....</i>	<i>12</i>
Окно “Список STL-объектов”.....	14
Окно “Свойства STL-объекта”.....	15
Групповые операции с объектами .....	16
<i>Просмотр сетки .....</i>	<i>17</i>
<i>Управление цветовой палитрой значений функций.....</i>	<i>19</i>
Выполнение расчетов с использованием поверхностей и декартовой сетки .....	20
<i>Математический аппарат.....</i>	<i>21</i>
Формула вычисления значения теплового потока .....	21
Формула вычисления значения трения.....	21
<i>Выполнение расчетов на поверхностях.....</i>	<i>21</i>
Пример использования Visualizator: проточное течение свинцового теплоносителя в режиме охлаждения на выходе из трубы.....	23
<i>Загрузка данных .....</i>	<i>23</i>
<i>Расчет на поверхности модели.....</i>	<i>25</i>
<i>Контроль результатов численного эксперимента.....</i>	<i>27</i>
Контроль на сетке .....	27
Контроль на поверхностях .....	28
Контроль в сторонних пакетах программ.....	29
<i>Другие примеры расчетов.....</i>	<i>29</i>
Эксперимент «Гидравлический пролив дросселя».....	30
Эксперимент «Течение натрия в круглой трубе с охлаждением».....	30
Эксперимент «Течение в кольцевом канале с преградой на установке Сибирь».....	35
Эксперимент «Теплообмен в круглой гидравлически гладкой трубе».....	39

Заключение .....	43
Список использованных источников .....	44
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Форматы файлов Visualizator .....	45
<i>Формат STL трёхмерных объектов</i> .....	45
ASCII STL .....	45
Двоичный формат STL .....	45
Approx-STL .....	45
STL+ \- .....	46
<i>Формат DAT трёхмерных объектов</i> .....	46
<i>Формат CNV для хранения сетки с данными</i> .....	46

## Определения и сокращения

РУ	Реакторная установка.
TBC	Тепловыделяющая сборка.
ЭВМ	Электронно-вычислительная машина.
CFD	Вычислительная динамика жидкости.
CONV-3D/V2	CFD модуль, предназначенный для анализа и обоснования безопасности АЭС с РУ разными типами теплоносителя и ориентированного на петафлопсные ЭВМ.
DAT	Формат выходного файла для CONV3D/V2 и входного файла для Tecplot.
ParaView	Открытый графический кросс-платформенный пакет для интерактивной визуализации в исследовательских целях, разрабатываемый Национальной Лабораторией Сандиа, компанией Kitware и Национальной Лабораторией Лос-Аламоса.
STL-объект	3D модель твердотельного объекта.
STL	(от англ. stereolithography) — формат файла, широко используемый для хранения трехмерной модели объекта, информация о котором хранится как список треугольных граней, которые описывают его поверхность, и их нормалей. Может быть текстовым (ASCII) или двоичным.
Tecplot	Коммерческий программный пакет Techplot Inc., обеспечивающий пользователю возможность инженерного построения графиков, обладающий функциональным оснащением для работы в форматах 2D, 3D и XY.

## Введение

Графический постпроцессор – это программное средство, связанное с графикой, рисованными изображениями, созданными средствами графики, предназначенное для управления наборами данных и для реализации других специальных функций постобработки, разрабатываемое, как правило, специально для тех или иных вычислительных программ. В нашем случае графический препроцессор разрабатывается специально для программного средства CONV-3D/V2, которое представляет собой прецизионный масштабируемый вихреразрешающий CFD модуль на базе DNS приближения, ориентированный на петафлопсные ( $10^{15}$ ) вычислительные ЭВМ. ПС CONV-3D/V2 предназначено для расчета теплообмена и трения в твэлах, ТВС реакторных установок (РУ) с различными типами теплоносителя: водяного, свинцового, натриевого, свинцово-висмутового.

Одним из возможных способов оптимизации управленческих решений, применяемых при анализе действующих и проектируемых РУ, является численное моделирование с использованием современных компьютерных технологий. При этом актуальным является не только выполнения численных расчетов, но также постобработка и визуализация результатов численных экспериментов.

Постобработка и визуализация результатов численных экспериментов в современных средствах постпроцессинга таких как пакеты ParaView [1], Tecplot [2] не всегда обеспечивает оперативное решение прикладных задач.

Примером может служить необходимость контролировать не только непосредственно рассчитываемые функции (температуру, скорости, давление и т.п.), а также производные от этих функции, такие как тепловые потоки, трение и т.п.

Кроме этого, при моделировании важных прикладных тепло и гидродинамических задач для оценки эксплуатационных рисков часто требуется контроль результатов расчетов как на всей модели целиком, так и на отдельных её областях.

Поэтому для обработки результатов вычислений становится актуальным вопрос о разработке программного обеспечения, позволяющем выполнять такой контроль как визуально, так и численно и обладающем функционалом расчета производных функций.

Данный документ предназначен для ознакомления пользователей, с функциональностью разрабатываемого в ИБРАЭ графического постпроцессора Visualizator для вычислительного модуля CONV-3D/V2, необходимой для постобработки результатов вычислительных экспериментов, проводимых с помощью CONV-3D/V2.

## Общие сведения о программе Visualizator

ПС Visualizator представляет собой интерактивную систему визуализации результатов вычислений для CFD модуля CONV-3D/V2, предназначенного для моделирования задач гидродинамики в замкнутых областях и моделирования проточных течений [3-6].

ПС позволяет визуализировать: трехмерные геометрические модели, сетки, значения функций на них и расчет производных функций (например, величины трения вблизи поверхности модели).

Исходные тексты ПС написаны на языке C# в среде Microsoft Visual Studio 2012.

Visualizator зачитывает файлы в формате вычислительного модуля CONV-3D/V2 (3d.cnv, 3p.cnv, 3a.cnv, \_rpor.inp), форматы которых описаны в приложении А, и позволяет экспортировать значения функций, рассчитанные на поверхностях, в текстовый DAT-формат программы Tecplot.

Данный документ описывает функциональность версии ПС от 16 апреля 2018 г.

## Основные функции Visualizator

Программа Visualizator предоставляет пользователю следующие возможности:

1. Визуализация трехмерной декартовой сетки и значений функций в ее узлах.
2. Визуализация триангулированных поверхностей и значений функций в их узлах.
3. Интерполяция значений в узлах поверхностей на основании значений в узлах сетки.
4. Расчет значений в узлах поверхностей на основании значений близлежащих узлов сетки (в тонком слое).
5. Экспорт результатов расчета в формат пакета Tecplot.

## Быстрый старт

Простейшая схема работы с Visualizator включает следующие шаги:

1. Запустить Visualizator (щелчком мыши по приложению Visualizator3.exe в папке Programs Files (x86)\IBRAE RAS\Visualizator) или воспользоваться ярлыком Visualizator в меню пуск.
2. Открыть окно «Операции с STL-объектами» (меню Вид \* Операции с STL-объектами), нажать кнопку «1. Загрузить данные».
3. Указать файлы сетки (3d.cnv и 3r.cnv) и файлы поверхностей модели (STL-файлы).
4. Если открылось окно указания фрагмента загружаемой сетки, нажать кнопку «Целиком». Данный этап опционный, зависит от настроек программы. Если данное окно не появилось, то сетка будет загружена полностью.
5. Кнопкой «Визуализация сетки» панели инструментов главного окна включить показ декартовой сетки. Появившееся окно «Сетка» позволяет выбрать слой сетки и сечение сетки, выводимые на экран. Выпадающий список на панели инструментов позволяет выбирать переменную, значения которой отображаются в узлах сечения сетки на экране.
6. Выбрать 3D-объект сцены мышью и нажать кнопку «3. Рассчитать значения на поверхности» (окно «Операции с STL-объектами»). В открывшемся окне «Расчет STL-объекта» в полях ввода укажите абсолютное значение, примерно равное длине диагонали ячейки сетки. В верхнее поле введите это же значение со знаком минус. Точность значения не важна. Данная величина используется для вычисления величины теплового потока и трения близи поверхности, т.к. данные функции рассчитываются в тонком слое близи поверхности. Нажмите ОК.
7. Программа произведет расчет. В процессе расчета на экране будет выводиться информация о ходе расчета и выполняемых операциях.
8. По окончании расчетов, полученные данные будут отображены на экране. Значения функций будут отображены цветом согласно палитре, выводимых в окне «Редактор палитры».
9. Для выполнения визуального контроля полученных на поверхности данных воспользуйтесь:
  - a. выпадающим списком выбора функции. Список расположен на панели инструментов (список слева от выбора значения функции сетки). Обратите внимание, что в списке переменных присутствуют все переменные, заданные на исходной сетке, а также переменные «flux» (тепловой поток) и «friction» (трение), рассчитанные на основании исходных функций;
  - b. окном «Редактор палитры», которое позволяет задать диапазон и значения линий уровней и их цвета.
10. Для выполнения численного контроля полученных на поверхности данных воспользуйтесь кнопкой «Значения переменных» панели инструментов, которая позволяет получить точное значение функций в точке поверхности. Кликните мышью по поверхности и в окне будут выведены интерполированные значения всех функций в данной точке.
11. Выберите одну или несколько поверхностей и воспользуйтесь кнопкой «Экспортировать посчитанный объект в Tecplot» окна «Операции с STL-объектами». При необходимости, откройте полученные файлы в Tecplot или другом стороннем пакете.

## **Условия, необходимые для работы с программой**

Для корректной работы с компьютер должен иметь предустановленную операционную систему Windows и пакет Microsoft Framework.NET 4.5.

Все операции, связанные с копированием файлов программы Visualizator на компьютер пользователя, выполняются установщиком – программой Visualizator\_Setup.exe.

## **Требования к техническим средствам**

Для эффективного функционирования Visualizator рекомендуется его использование на персональном компьютере со следующими характеристиками:

- процессор не ниже Intel Core i5 2 ГГц;
- объем оперативной памяти – не менее 2 Гб (рекомендуемый – 6 Гб);
- объем свободного дискового пространства не ниже 2 Гб (рекомендуемый – 40 Гб);
- монитор, поддерживающий разрешение не ниже 1920 x 1080;
- видеокарта, обеспечивающая аппаратное ускорение 3D-графики. Драйверы видеокарты должны быть обновлены до последней версии и поддерживать программный интерфейс OpenGL.

Специальных требований к клавиатуре и мыши не предъявляется.

## **Дополнительное ПО, необходимое для функционирования программы Visualizator**

Для корректной работы программы необходим компьютер под управлением ОС Windows XP SP3 / Windows 7 / Windows 8 / Windows 8.1 / Windows 10, оснащенный видеокартой с поддержкой OpenGL. Необходимо наличие Microsoft Framework.Net 4.5 и выше.

### **Комплект поставки**

Комплект поставки состоит из одного файла «Visualizator\_Setup.exe».

Установка Visualizator производится программой «Visualizator\_Setup.exe» и не требует ввода специфических параметров. Программа устанавливает Visualizator по умолчанию в папку Programs Files (x86)\IBRAE RAS\Visualizator\ вместе с help-ом (вызывается нажатием F1 в Visualizator).

## **Особенности интерфейса пользователя программы Visualizator**

Как уже отмечалось выше, программа Visualizator предназначена для визуализации трехмерных геометрических моделей и сеток, значений функций на них и расчета производных функций в составе специализированного программного комплекса моделирования задач гидродинамики в замкнутых областях и моделирования проточных течений CONV-3D/V2.

Основные элементы интерфейса программы Visualizator включают:

1. Главное окно, которое содержит изображение сцены, позволяет манипулировать изображением, предоставляет пользователю доступ к основному функционалу.
2. Вспомогательные окна, которые предоставляют доступ сопутствующему функционалу. Например, просмотру атрибутов выводимых объектов или редактированию уровней цветовой палитры, соответствующих значениям функций.

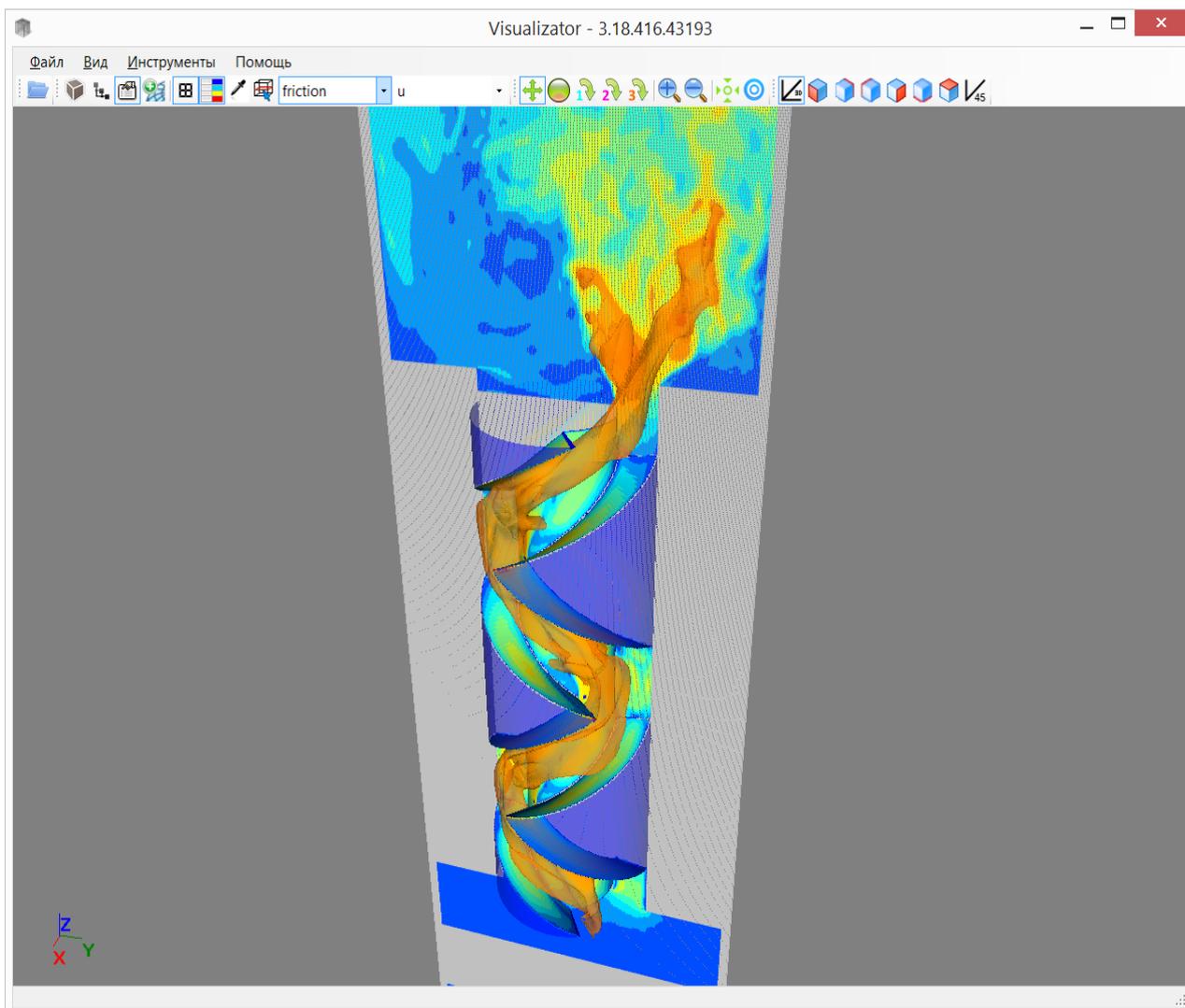
Рассмотрим подробнее отдельные элементы интерфейса ПС Visualizator.

### **Основное окно**

Основное окно ПС Visualizator состоит из главного вида, меню, панели инструментов и статусной строки показано на рисунке 1.

Область главного вида содержит изображение трехмерной расчетной области, позволяет управлять изображением целиком (изменять угол поворота, масштаб) и изображенными объектами (выбирать, перемещать и т.п.).

Главный вид отображает редактируемую модель. Доступные режимы: режим трехмерного отображения и режим ортогональных проекций.



**Рисунок 1. Главный вид основного окна Visualizator**

Элементы главного меню описаны в таблице 1.

**Таблица 1. Управляющие элементы главного меню**

Пункт меню	Подпункт меню [горячие клавиши]	Расшифровка действия при выборе подпункта меню
Файл		
	Создать сетку [Ctrl+N]	Генерация декартовой сетки.
	Открыть [Ctrl+O]	Загрузка данных в программу (сетки и трехмерные STL-поверхности).
	Загрузить состояние	Загрузить в программу, сохранённую ранее информацию о наборе открытых окон, их положении и размере и STL-файлах.
	Сохранить состояние	Сохранить информацию об открытых окон, их положении и размере и STL-файлах.
	Сохранить снимок экрана	Записать текущее изображение сцены в PNG-файл.
	Выход [Alt+X]	Выход из Visualizator.

**Таблица 1. Продолжение**

Пункт меню	Подпункт меню [горячие клавиши]	Расшифровка действия при выборе подпункта меню
Вид		
	Операции с STL-объектами	Открывает окно инструментов расчета на поверхностях модели.
	Список STL-объектов	Открывает окно списка загруженных поверхностей, позволяющее оперировать ими (выбирать, скрывать).
	Свойства STL-объекта	Открывает окно, отображающее значения параметров выбранных объектов (габариты, цвет, способ вывода на экран и т.п.).
Инструменты		
	Построить изоповерхность	Построить изоповерхность, соответствующую заданному значению функции, заданной на декартовой сетке. Аналогично кнопке  панели инструментов.
	Получить значения на поверхности	Включает/выключает режим определения значений функций в выбранной пользователем точке поверхности. Аналогично кнопке  панели инструментов.
	Выбор сечения сетки мышью	Включает / выключает режим задания положения текущего сечения карты с помощью клика левой кнопкой мыши. Аналогично кнопке  панели инструментов.
	Параметры загрузки / Показывать параметры загрузки сетки	Переключатель. Если включен, то при открытии файлов с сеткой программа покажет окно выбора фрагмента сетки.
	Параметры загрузки / Показывать параметры загрузки сетки	Переключатель. Если включен, то при открытии файлов поверхностей программа обрежет их по габаритам сетки (поверхности не будут выходить за габариты загруженной сетки)
Помощь		
	Справка [F1]	Открытие документации пользователя
	О программе	Открыть окно с номером версии программы

Управляющие элементы панель инструментов главного окна описаны в таблице 2.

**Таблица 2. Управляющие элементы (кнопки) панели инструментов главного окна**

Вид кнопки	Название элемента управления [горячие клавиши]	Расшифровка действия при выборе управляющего элемента
	Открыть проект [Ctrl+O]	Загрузка данных в программу (сетка и трехмерные поверхности (STL)). Все ранее созданные или загруженные в программе данные из памяти удаляются.
	Операции STL-объектами	Открывает окно инструментов расчета на поверхностях модели
	Список объектов	Отображение и скрытие окна "Список объектов"
	Свойства объекта	Отображение и скрытие окна "Свойства объектов"

**Таблица 2. Продолжение**

Вид кнопки	Название элемента управления [горячие клавиши]	Расшифровка действия при выборе управляющего элемента
	Открыть проект [Ctrl+O]	Загрузка данных в программу (сетка и трехмерные поверхности (STL)). Все ранее созданные или загруженные в программе данные из памяти удаляются.
	Операции STL-объектами	Открывает окно инструментов расчета на поверхностях модели

	Список объектов	Отображение и скрытие окна "Список объектов"
	Свойства объекта	Отображение и скрытие окна "Свойства объектов"
	Построение изоповерхности	Построение триангулированной поверхности, соответствующей константному значению выбранной пользователем переменной
	Визуализация сетки	Отображение и скрытие окна "Сетка" и вывод/сокрытие декартовой сетки на экране
	Палитра	Отображение и скрытие окна "Редактор палитры"
	Значения переменных	Включает/выключает режим определения значений функций в выбранной пользователем точке поверхности
	Режим выбора сечения сетки	Включает/выключает режим задания положения текущего сечения карты с помощью клика левой кнопкой мыши
friction (выбор из списка)	Выбор функции из списка для отображения значений на поверхностях модели	Задаёт функцию, значения которой следует выводить цветом на поверхностях STL-объектов модели
t (выбор из списка)	Сечения сетки	Задаёт функцию, значения которой следует выводить цветом на сечениях сетки
	Перемещение камеры (смещение сцены) [клавиша 1]	Переключение курсора мыши в режим перемещения камеры
	Свободный обзор (вращение сцены) [клавиша 2]	Переключение курсора мыши в режим свободного обзора
	Вращение вокруг оси X [клавиша 3]	Переключение курсора мыши в режим вращения объектов сцены вокруг оси X
	Вращение вокруг оси Y [клавиша 4]	Выполняет переключение курсора мыши в режим вращения объектов сцены вокруг оси Y
	Вращение вокруг оси Z [клавиша 5]	Выполняет переключение курсора мыши в режим вращения объектов сцены вокруг оси Z
	Приблизить камеру [клавиша 6]	Выполняет перемещение камеры по направлению к объекту (увеличить объект)
	Отдалить камеру [клавиша 7]	Выполняет перемещение камеры по направлению от объекта
	Сброс камеры (reset)	Выполняет перемещение камеры таким образом, что все объекты видны на экране

**Таблица 2. Продолжение**

Вид кнопки	Название элемента управления [горячие клавиши]	Расшифровка действия при выборе управляющего элемента
	Поместить камеру перед объектом	Выполняет перемещение камеры таким образом, что объект оказывается в центре экрана
	Перспектива	Выполняет переключение отображения модели в режиме перспективы (доступно вращение и перемещение камеры относительно всех осей)
	Зафиксировать камеру на оси X	Выполняет переключение отображения модели в режим X-проекции (вращение камеры заблокировано, доступно перемещение камеры в плоскости OYZ). Включает "вид слева" / "вид справа"
	Зафиксировать камеру на оси Y	Выполняет переключение отображения модели в режим Y-проекции (вращение камеры заблокировано, доступно перемещение камеры в плоскости OXZ). Включает "вид сзади" / "вид спереди"

	Зафиксировать камеру на оси Z	Выполняет переключение отображения модели в режим Z-проекции (вращение камеры заблокировано, доступно перемещение камеры в плоскости OXY). Включает “вид снизу” / “вид сверху”
	Проекция 45 градусов	Выполняет переключение отображения модели в режим проекции 45 градусов (вращение камеры заблокировано, доступно перемещение камеры в плоскости, расположенной под углом 45 градусов к плоскости OXY)

## Работа с объектами

Работа с объектами осуществляется в главном окне редактора. Для совершения операции над объектом его необходимо выбрать. Объект можно выбрать один из следующих способов:

- Щелкнуть левой кнопкой мышь на изображении объекта. Допускается выбор нескольких объектов одновременно, для этого следует нажать клавишу <Ctrl> и, не отпуская её, кликнуть на выбираемых объектах. Результат такого выбора показан, например, на рисунке 2.
- Выбрать несколько строк в окне “Список STL-объектов”.
- Выбрать объект из списка в окне “Свойства STL-объекта”.

Снять выделение со всех выбранных объектов (отказаться от выбора объектов) можно щелкнув правой кнопкой мыши в любой точке Главного вида.

Масштаб изображения объектов автоматически устанавливается программой и может быть выбран вручную колесом мыши. Автоматически масштаб размеров сцены устанавливается по габаритам объектов (для каждой из трех проекций выбираются точки, принадлежащие объектам, с минимальным и максимальным значением).

Помимо вывода поверхностей объектов как таковых, Visualizator выводит на экран значения функций в виде цветовой заливки на поверхности объектов.

Выбор функции, значения которой отображаются цветом, осуществляется с помощью одного из двух выпадающих списков на панели инструментов. Списки, о которых здесь идет речь, выделены на рисунке 3 красной рамкой.

Первый список (на рисунке 3 он в панели инструментов слева и содержит актуальное значение friction) предназначен для выбора функции из набора, выводимой на поверхностях STL-объектов.

Второй список (на рисунке 3 он в панели инструментов справа и содержит актуальное значение u3) предназначен для выбора функции, выводимой на сечениях декартовой сетки.

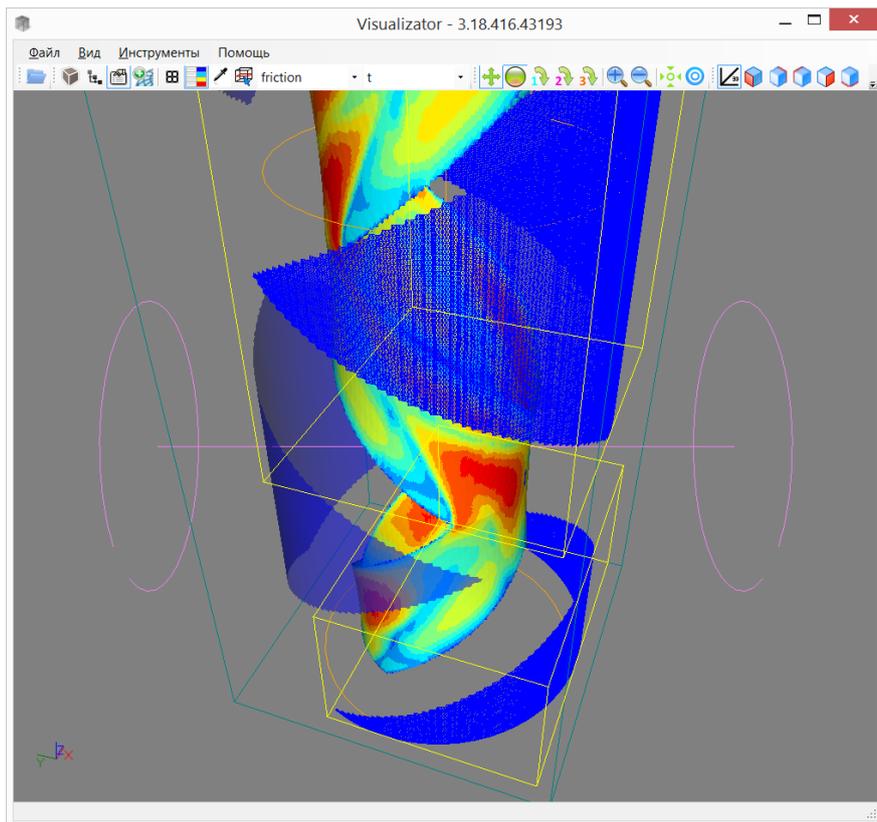


Рисунок 2. Пример выбора нескольких объектов

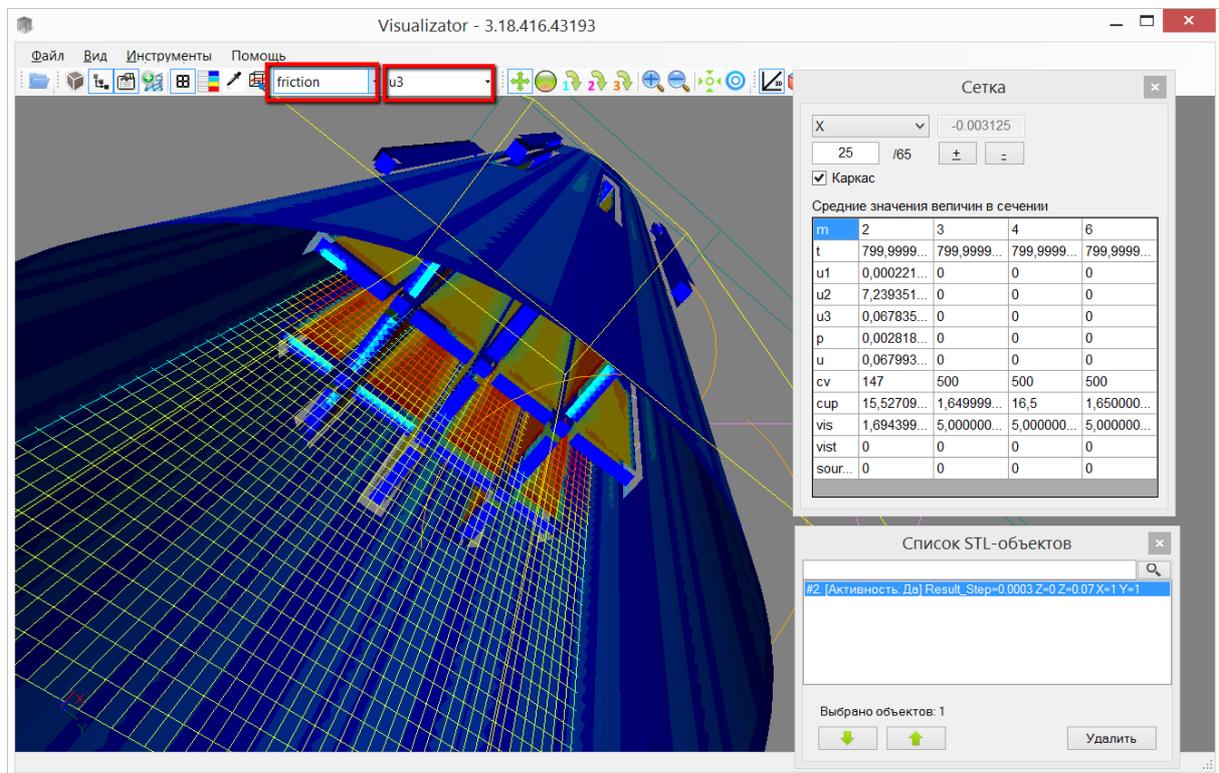


Рисунок 3. Выбор функций “friction” для отображения на поверхности объектов и сетки “u3”

Набор функций и их значения загружаются вместе с данными сетки и значениями на поверхностях STL-объектов из DAT-файлов, получаемых в результате работы ПК CONV-3D/V2. Обычно, в файлах, получаемых в результате работы CONV-3D/V2, записаны следующие функции:

- t – температура;
- u1, u2, u3 – компоненты вектора скорости;
- p – давление;
- u – модуль скорости;
- m – номер материала значение карты;
- flux – тепловой поток;
- friction – трение вблизи поверхности.

### Окно “Список STL-объектов”

Окно “Список STL-объектов” (см. рис. 4) предназначено для отображения и редактирования основных свойств STL-объектов: выделения и удаления.

Данное окно позволяет управлять видимостью (атрибут “Активность”) объекта, расположением объектов в списке, т.е. изменением порядковых номеров объектов. Также через окно “Список STL-объектов” возможно удалить объект из памяти программы и экспортировать выбранные объекты в формат программы Tecplot.

Пример окна с несколькими объектами показан на рисунке 4. Открыть окно в Visualizator можно воспользовавшись пунктом меню “Вид” > “Список объектов” или кнопкой  на панели инструментов. В каждой строке списка содержится информация о порядковом номере и активности объекта.

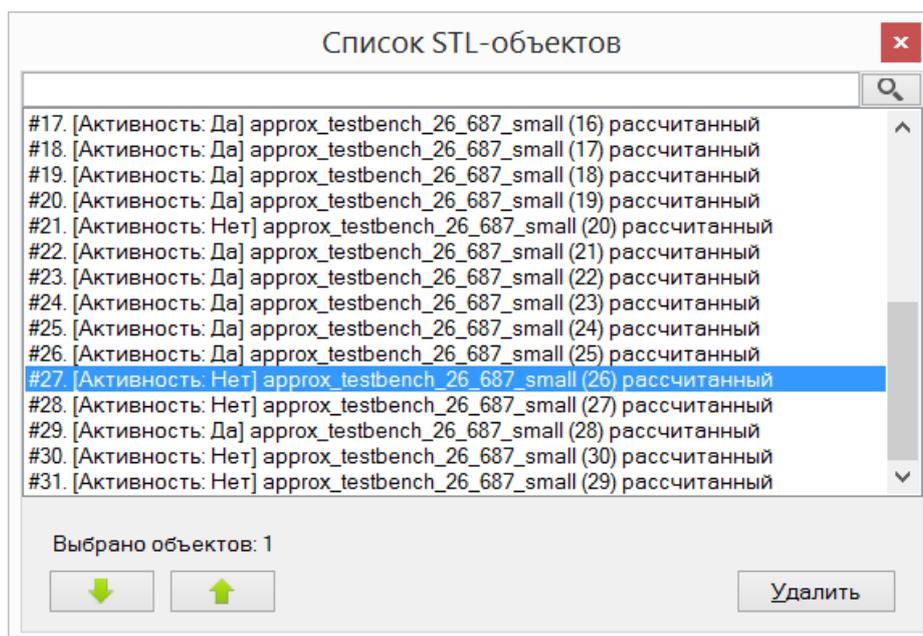
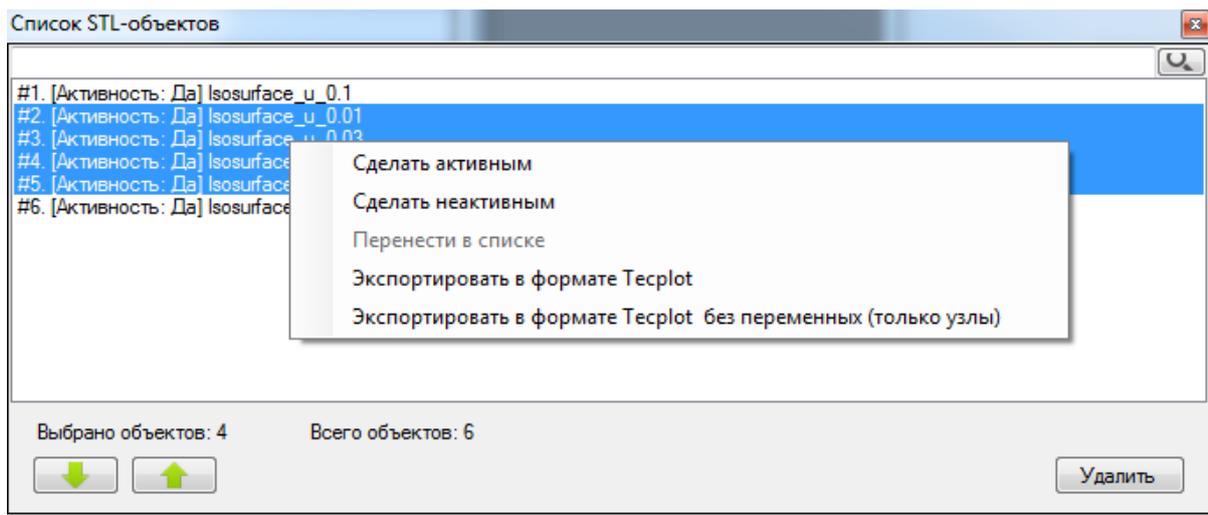


Рисунок 4. Окно “Список STL-объектов”

Атрибут “Активность” отвечает за видимость объекта на экране и может быть изменен как у единичного объекта, так и сразу у нескольких объектов из списка.

Для изменения атрибута “Активность” у одного объекта следует щёлкнуть мышкой по строке с именем выбранного объекта списка дважды.

Для изменения атрибута “Активность” сразу у нескольких объектов (например, необходимо скрыть несколько объектов не удаляя их из памяти программы) следует выделить несколько объектов, удерживая клавишу <Ctrl> и щелкнув мышкой на объектах, а затем воспользоваться правой кнопкой мыши для вызова контекстного меню, позволяющего включить/выключить выбранные объекты. Вид окна при групповом выделении объектов показан на рисунке 5.



**Рисунок 5. Контекстное меню окна “Список объектов”**

Как уже говорилось выше, через окно “Список STL-объектов” возможно удалить объект из памяти программы. Для удаления объекта из списка и памяти программы необходимо выбрать объект из списка, а затем нажать клавишу “Удалить”.

Кнопки  и  в окне “Список STL-объектов” предназначены для перемещения выбранных объектов в списке. Перемещение объекта в списке приводит к изменению порядкового номера объекта.

Выбрав объекты, имеется возможность экспортировать их в общепринятый формат «DAT» программы Tescplot (см. рисунок 5).

### Окно “Свойства STL-объекта”

Окно “Свойства STL-объекта” предназначено для отображения всех доступных свойств объектов, которые были загружены пользователем в главном окне, и редактирования некоторых из них.

Для открытия окна “Свойства STL-объекта” следует воспользоваться пунктом меню “Вид” > “Свойства объекта” или кнопкой  на панели инструментов.

Окно “Свойства STL-объекта” приведено на рисунке 6 и включает в себя следующие элементы управления, перечисленные в таблице 3.

**Таблица 3. Управляющие элементы окна “Свойства STL-объекта”**

Название управляющего элемента окна	Расшифровка назначения управляющего элемента окна
Список объектов	Содержит список всех объектов сцены, позволяет выбрать объект для редактирования.
Таблица свойств	Список доступных свойств объектов; общие свойства для всех объектов: имя, координаты (x,y,z), поворот вокруг осей (x,y,z), видимость, прозрачность, цвет, материал (см. таблицу 4).
Кнопка <Удалить>	Удалить объект(ы), свойства которого (которых) отображаются в данный момент.

В таблице свойств STL-объекта можно выделить общие свойства для всех объектов, которые суммированы в таблице 4.

**Таблица 4. Общие свойства геометрических объектов**

Название управляющего элемента окна	Расшифровка назначения управляющего элемента окна	Редактируемое или не редактируемое пользователем
Имя	Имя объекта, используется для его идентификации.	Редактируемое
Активность	Отображение объекта на сцене,	Редактируемое

	включение\отключение объекта при построении карты.	
Отрисовка	Степень прозрачности объекта при отображении на сцене. Допускает изменение значения пользователем. Предусмотрены 4 возможности: заливка объекта выбранным цветом, прозрачность, каркас (видны только образующие объект треугольники), не рисовать (объект невидим на сцене).	Редактируемое
Цвет	Цвет, которым объект будет отображаться на сцене.	Редактируемое
Габариты X/Y/Z	Размеры описанного вокруг объекта параллелепипеда.	Не редактируемое
Треугольников	Количества треугольников, из которых состоит объект.	Не редактируемое
Только постпроцессинг?	«Нет» – для обычных объектов. «Да» - только для объектов, созданных в сценариях GeometryEditor и специально предназначенных для расчёта значений функций в Visualizator (тепловой поток, трение).	Не редактируемое

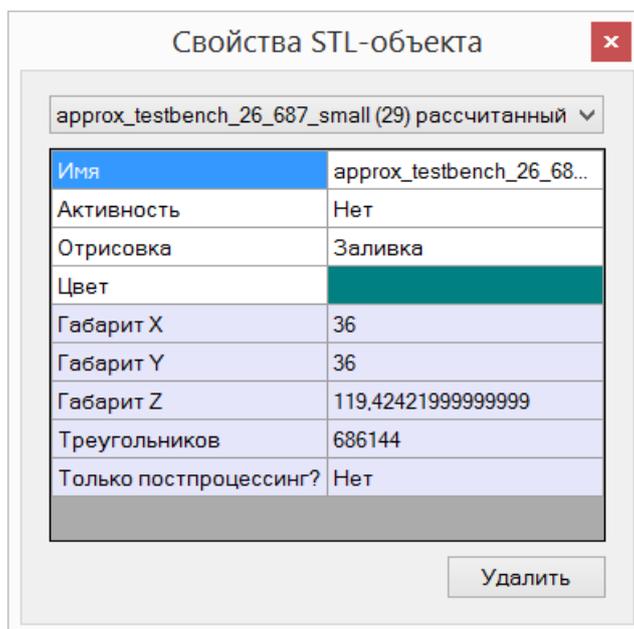
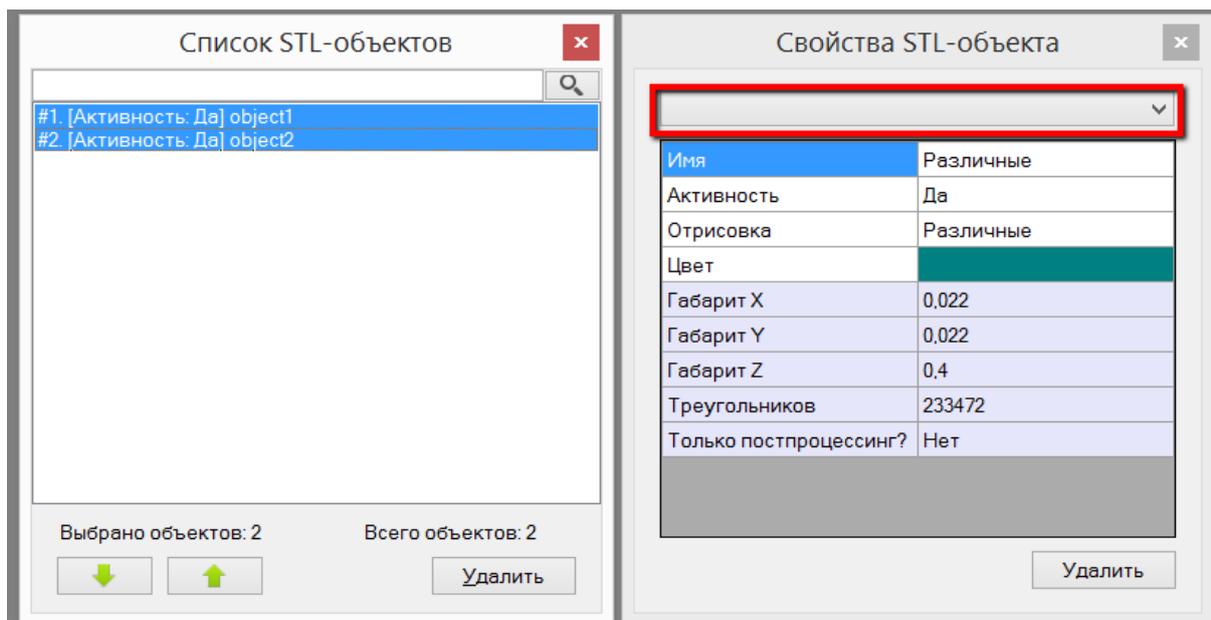


Рисунок 6. Окно “Свойства STL-объекта”

### Групповые операции с объектами

Программа позволяет совершать одновременное изменение свойств группы выделенных объектов. Свойства, значения которых допускается изменять, указаны выше в разделе «Окно “Свойства STL-объекта”»: Активность, Отрисовка, Цвет.

Выделение группы объектов можно произвести как из Главного вида Главного окна (удерживая кнопку Ctrl, выделить объекты с помощью левой кнопки мыши), так и аналогичным образом из окна “Список STL-объектов”. При этом, в списке объектов в окне “Свойства STL-объекта” выделенный пункт выпадающего списка объектов очистится (см. рисунок 7). Характеристики свойств, различных между объектами, обозначаются термином «Различные».



**Рисунок 1. Окно “Свойства STL-объекта” в режиме нескольких выбранных объектов**

В полях таблицы свойств (см. таблицу 4), соответствующих свойствам с равными для всей группы значениями, будут выведены эти значения. Поля, соответствующих свойствам с разными значениями, отобразятся значением "Различные".

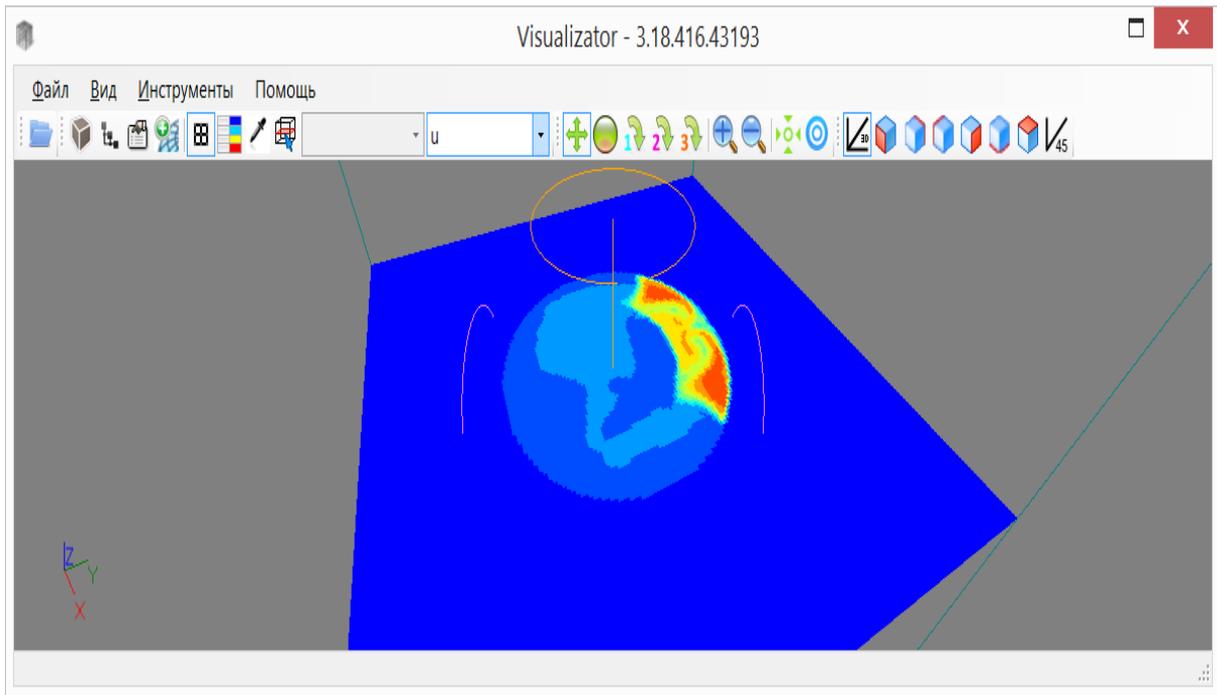
При задании (редактировании) значения свойства произойдет изменение данного свойства для всех выделенных объектов.

## Просмотр сетки

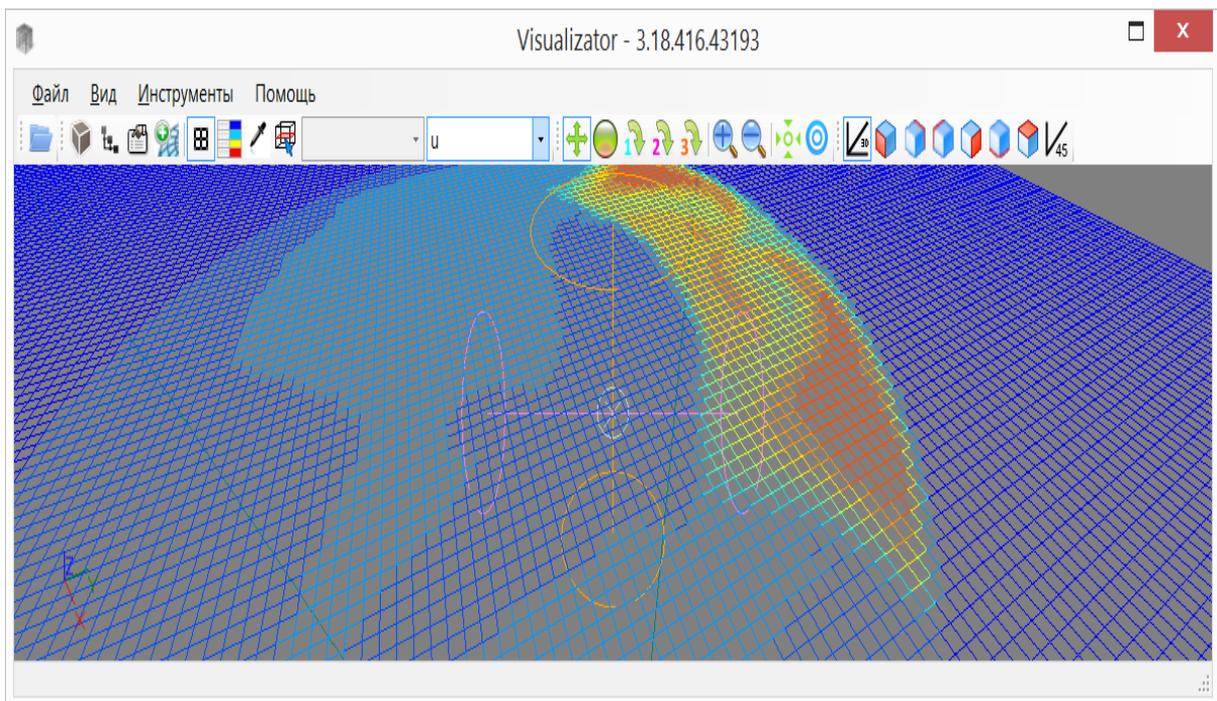
Одним из основных объектов трехмерной сцены является декартова сетка, результаты расчета на которой являются входными данными для программы Visualizator. Для включения/отключения вывода сетки на экран пользователю следует воспользоваться кнопкой «Визуализация сетки» панели инструментов (  ). Окно “Сетка” автоматически отображается при включении отображения сетки.

Сетка может выводиться в режиме заливки и в режиме каркаса (выводятся только ребра выбранного слоя сетки). Управление режимом выполняется при помощи поля «Каркас»: если галочка поставлена, то сетка выводится без заливки; если не поставлена, то сетка выводится с заливкой. Примеры заливки приведены на рисунке 8.

Сетка выводится только послойно. Окно позволяет выбрать слой сетки, который необходимо отобразить в Главном окне. Пример окна “Сетка” показан на рисунке 9. В таблице 5 приведены управляющие элементы окна “Сетка”.



а)



б)

**Рисунок 2. Примеры способов вывода сетки на экран в разных режимах: а) режим с заливкой; б) режим с каркасом**

Окно “Сетка” автоматически отображается при включении отображения сетки.

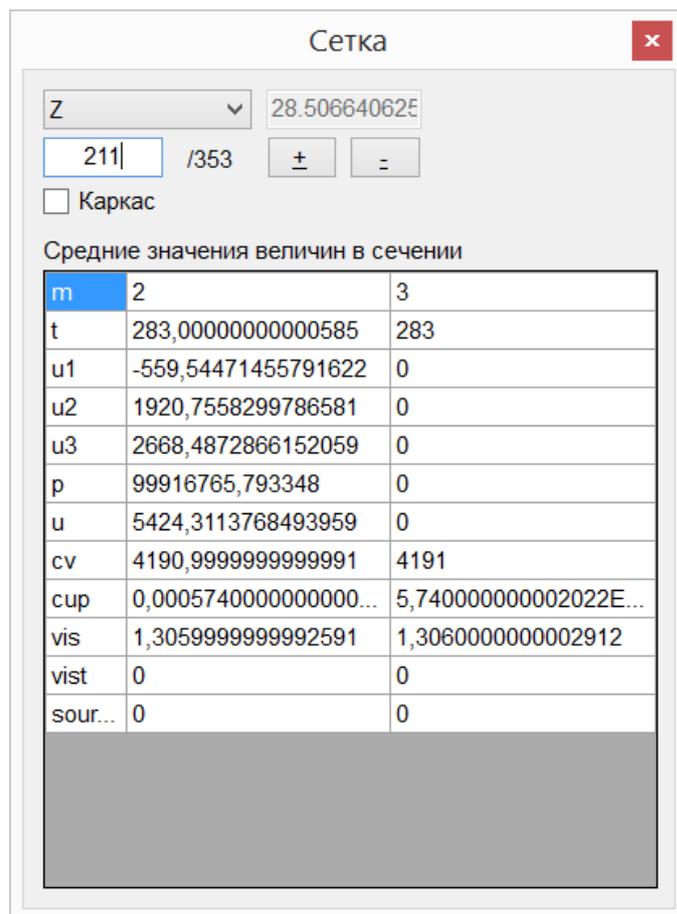


Рисунок 3. Окно “Сетка”

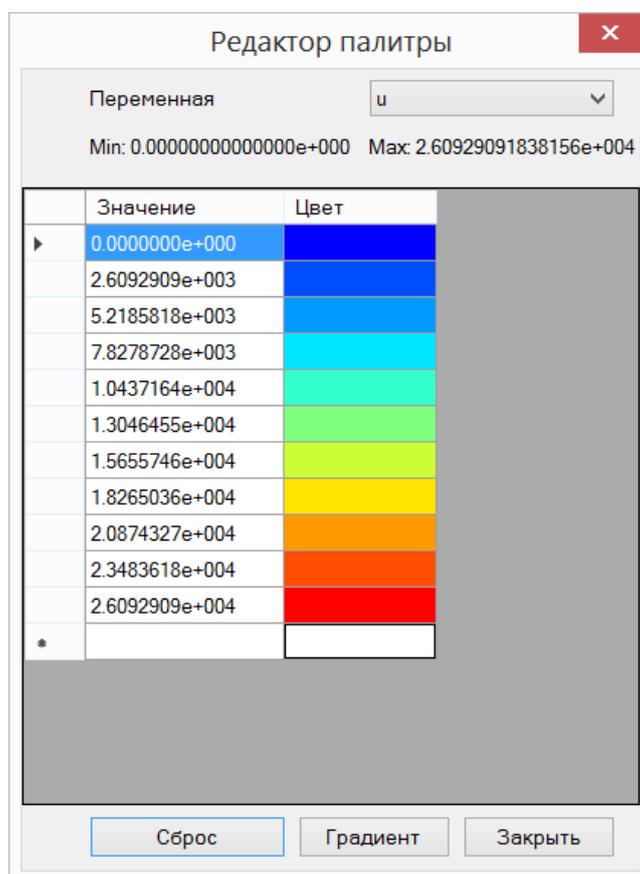
Таблица 1. Управляющие элементы окна “Сетка”

Название управляющего элемента окна	Расшифровка назначения управляющего элемента окна
Список осей	В выпадающем списке пользователь может выбрать ось координат X, Y или Z, перпендикулярно которой должно быть построено сечение.
Поле ввода сечения	В поле ввода пользователь может указать номер сечения вдоль выбранной из списка осей оси. Номер сечения – это значения индекса сетки вдоль выбранной оси сетки, соответствующее выводимому на экран сечению.
Кнопки «+» и «-»	Щелчок мыши по кнопкам «+» или «-» изменяет номер сечения сетки.
Поле “Каркас”	Включение галочки в поле “ Каркас ” выводит только ребра сетки без заливки.
Таблица “Средние значения величин в сечении”	Содержит список переменных, определённых на сетке, их средние значения для каждого из значений карты (целочисленная переменная m) в выбранном сечении сетки. Названия функций – в строках таблицы, значения карты (m) – в колонках.  Например, на рисунке 9 среднее значение функции cv в узлах карты, имеющих значение карты m=3, равно 4191.

### Управление цветовой палитрой значений функций

Загружаемая в программу сетка содержит не только координаты узлов, но и значения функций в этих углах. В узлах триангулированных поверхностей могут содержаться значения функций. Программа выводит значения функций в узлах объектов цветом.

Для вывода на экран таблицы соответствия между значениями функций и цветами следует воспользоваться кнопкой  панели инструментов главного окна, в результате на экране появится окно “Редактор палитры”, пример которого показан на рисунке 10.



**Рисунок 4. Окно “Редактор палитры”**

Кнопка «Сброс» приводит окно к первоначальному состоянию (11 уровней палитры, равномерное распределение от минимума до максимума значений выбранной функции).

Кнопка «Градиент» позволяет пользователю задать параметры соответствия цвета значению той или иной функции.

Кнопка «Закреть» скрывает окно палитры. Не приводит к изменению изображения главного вида главного окна.

## **Выполнение расчетов с использованием поверхностей и декартовой сетки**

Помимо визуализации загруженных данных, программа предоставляет следующую функциональность для расчетов:

1. Снос значений функций с сетки на поверхности объектов (интерполяция).
2. Вычисление функций, производных от значений выходных функций  $t$  (температура),  $u_3$  (проекция скорости на ось  $Z$ ) и так далее:
  - a. расчет величины теплового потока вблизи поверхности объектов модели;
  - b. расчет величины трения жидкости вблизи поверхности объектов модели.

## Математический аппарат

Расчет значений обеих функций – теплового потока и трения – производится по следующему алгоритму.

Во-первых, аппроксимируются входные STL-объекты декартовой сеткой, т.е. строятся поверхности, максимально приближенные к исходным поверхностям, узлы которых располагаются на ребрах сетки. Это необходимо для получения максимально точных значений функций на поверхностях при интерполяции их из узлов сетки. Полученный объект при дальнейшем рассмотрении будем называть approx. STL.

Во-вторых, для каждого approx. STL, полученного на предыдущем шаге, получаем значение функции  $t$  или функции  $u_3$  (для получения вычисления теплового потока и трения соответственно) на заданном расстоянии от поверхности. В программе реализованы несколько алгоритмов:

- быстрый: отложить заданное расстояние вдоль нормали к поверхности, интерполировать значения функций в точку с полученными координатами;
- средний: построить поверхность, каждый узел которой получен сдвигом узла аппроксимированного объекта на заданное расстояние. Сдвиг выполняется вдоль нормали к поверхности в каждой точке. Полученные таким образом поверхности назовем STL+ (сдвиг вне исходного approx. STL) и STL- (сдвиг внутрь исходного approx. STL). Аппроксимировать полученные поверхности сетки – получить approx. STL+ и approx. STL-. Интерполировать значения функций, заданных на сетке, в узлы approx. STL+. Снести значения с approx. STL+/- на STL+/- соответственно. Таким образом, получены значения в точках STL+/-, т.е. на заданном расстоянии от исходного approx. STL;
- медленный: практически повторяет предыдущий алгоритм с тем отличием, что значение на поверхностях берется не с STL+/-, а на approx. STL+/- . Получив approx. STL+/- и значения функций на них, выпускаем из каждой точки approx. STL луч вдоль нормали к поверхности в этой точке, находим пересечение с approx. STL+/- и интерполируем значения функций, заданных на approx. STL+/-, в эту точку. В отличие от предыдущих алгоритмов, данный не гарантирует точное соблюдение толщины тонкого слоя, в котором считаются тепловой поток и трение;

Таким образом, тепловой поток и трение – функции, вычисляемые при помощи получения разности значений с обеих сторон от исходной поверхности.

### Формула вычисления значения теплового потока

$$\text{Flux} = \text{cap} * (\text{tplus} - \text{tminus}) / h ,$$

где:

- cap – значение каппа в рассматриваемом узле approx. STL;
- tplus – значение температуры в точке, находящейся на заданном расстоянии от узла approx. STL снаружи объекта;
- tminus – значение температуры в точке, находящейся на заданном расстоянии от узла approx. STL снаружи объекта;
- h – фактическое расстояние между узлами точками tplus и tminus.

### Формула вычисления значения трения

$$\text{Friction} = (u_3\text{plus} - u_3\text{minus}) / h ,$$

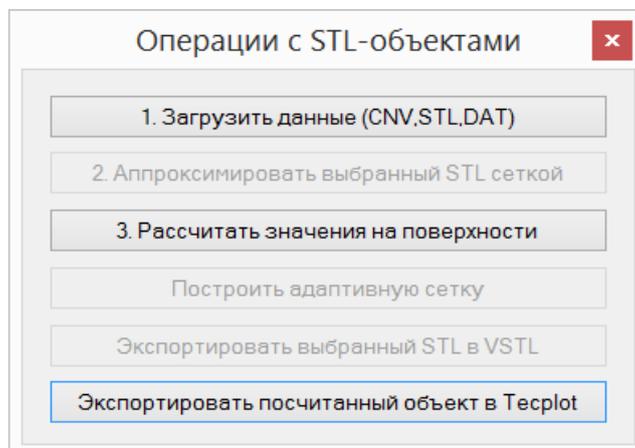
где:

- $u_3\text{plus}$  – значение скорости по Z в точке, находящейся на заданном расстоянии от узла approx. STL снаружи объекта;
- $u_3\text{minus}$  – значение скорости по Z в точке, находящейся на заданном расстоянии от узла approx. STL снаружи объекта;
- h – фактическое расстояние между узлами точками  $u_3\text{plus}$  и  $u_3\text{minus}$ .

## Выполнение расчетов на поверхностях

Для снесения значений функций из узлов сетки на поверхности объектов модели и для расчетов на них производных функций предназначено окно «Операции с STL-объектами». Вид окна показан на

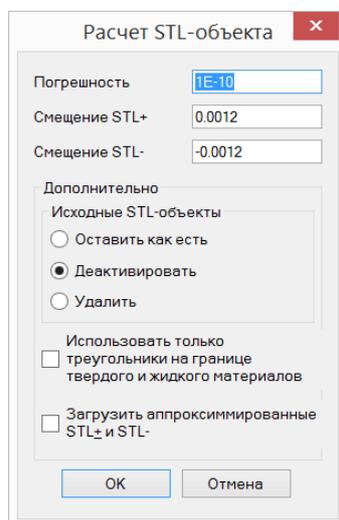
рисунке 11. Для доступа к данному окну в панели инструментов главного окна программы предназначена кнопка «».



**Рисунок 11. Окно «Операции с STL-объектами»**

Для расчета значений на поверхности объекта модели необходимо:

1. Загрузить файлы сетки, значений функций на ней и STL-объекты (пример выполнения данной операции показан ниже в разделе «Пример использования Visualizator: проточное течение свинцового теплоносителя в режиме охлаждения на выходе из трубы»);
2. Выбрать объект(ы) в списке объектов или мышью на изображении модели.
3. Нажать кнопку «3. Рассчитать значения на поверхности».
4. В открывшемся окне «Расчет STL-объекта» (показано на рисунке 12) указать «Смещение STL+» и «Смещение STL-» - величину толщины тонкого слоя, в котором выполняются вычисления. Рекомендуется задавать абсолютные значения в диапазоне от 1,0 до 1,5 длины ребра ячейки сетки. Остальные параметры можно оставить по умолчанию.



**Рисунок 5. Окно «Расчет STL-объекта»**

5. Программа произведет расчет, загрузит полученные результаты и отобразит на экране. Результаты применения данной операции расчета значений на поверхности объекта будут представлены ниже на пример конкретных задач.

## Пример использования Visualizator: проточное течение свинцового теплоносителя в режиме охлаждения на выходе из трубы

Покажем пример использования функциональности программы Visualizator на примере численного расчета проточного течения свинцового теплоносителя в режиме охлаждения (при постоянной температуре). Пример изображения главного окна с загруженной задачей показан на рисунке 13. Цель расчета — определение средней температуры на выходе из трубы при охлаждении постоянной температуры на выходном участке трубы. На входе в трубу задается хонейкомб, затем идет адиабатический участок. Среднюю температуру на выходе можно сравнить с аналитическим тестом.

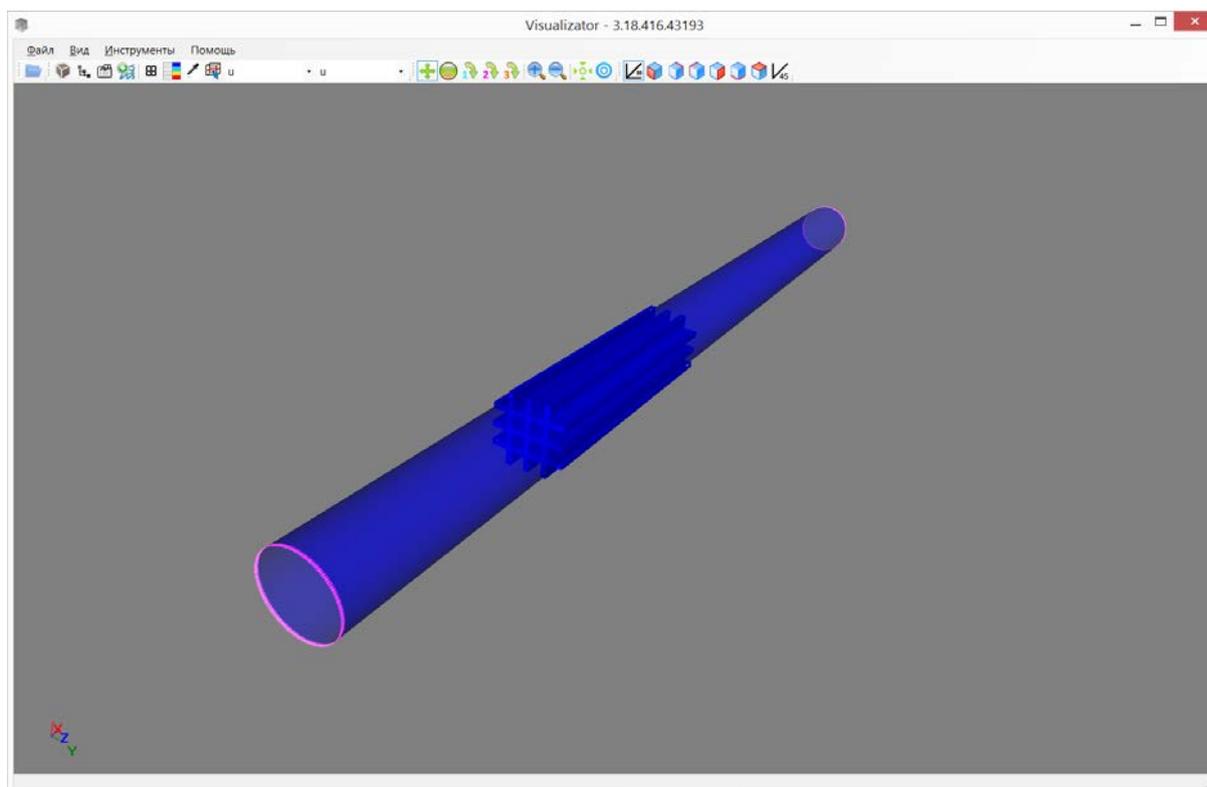


Рисунок 13. Окно программы с загруженной задачей

Исходные данные:

1. Файлы сетки, полученные в результате расчётов в модуле CONV-3D/V2: `_prop.inp`, `3a.cnv`;
2. Файл поверхности расчётной модели: `stlinp.stl`;

### Загрузка данных

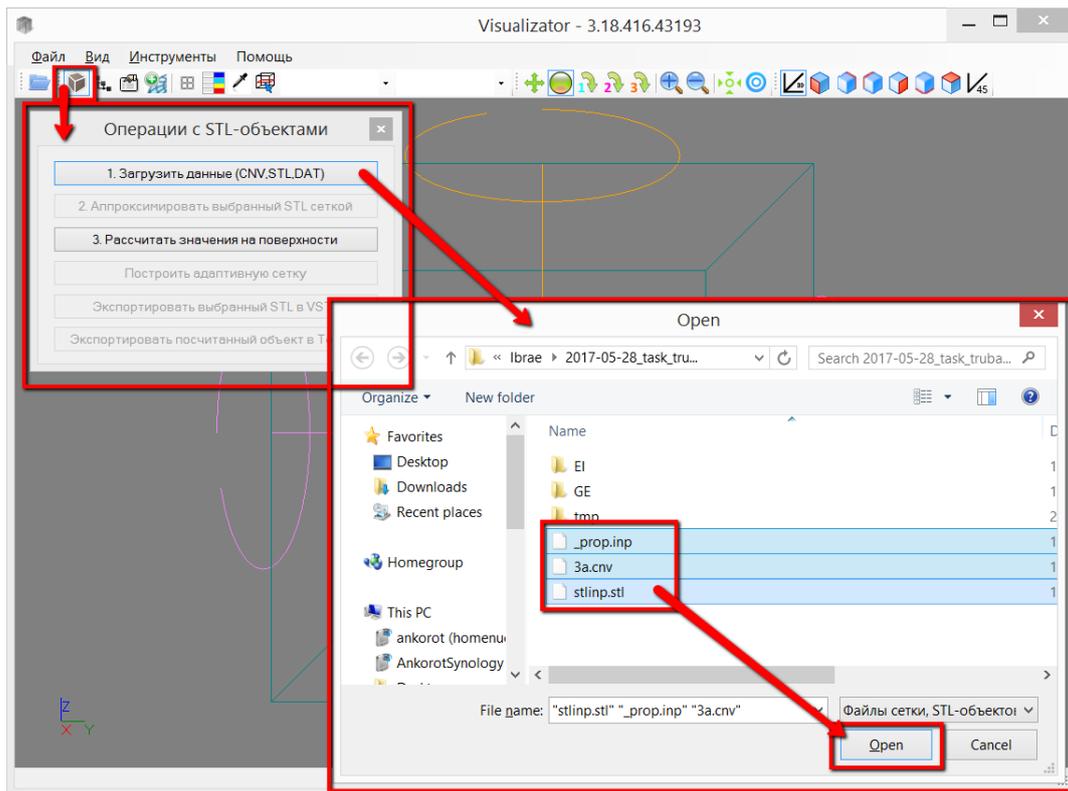
Откроем программу Visualizator. Поставим галочку в меню Параметры \* Загрузка \* Показывать параметры загрузки сетки.

Откроем окно «Операции с STL-объектами» и загрузим данные, воспользовавшись кнопкой «1. Загрузить данные (CNV, STL, DAT)».

В открывшемся окне выберем файлы:

1. `_rprop.inp` – содержит значения некоторых функций, заданных на сетке зависящих только от материала, к которому принадлежит тот или иной узел сетки;
2. `3a.cnv` - содержит значения координат узлов сетки и значения функций, значения которых индивидуальны и не зависят от материала, внутри которого оказался узел;
3. `Stlinp.inp` – координаты узлов поверхности расчётной модели.

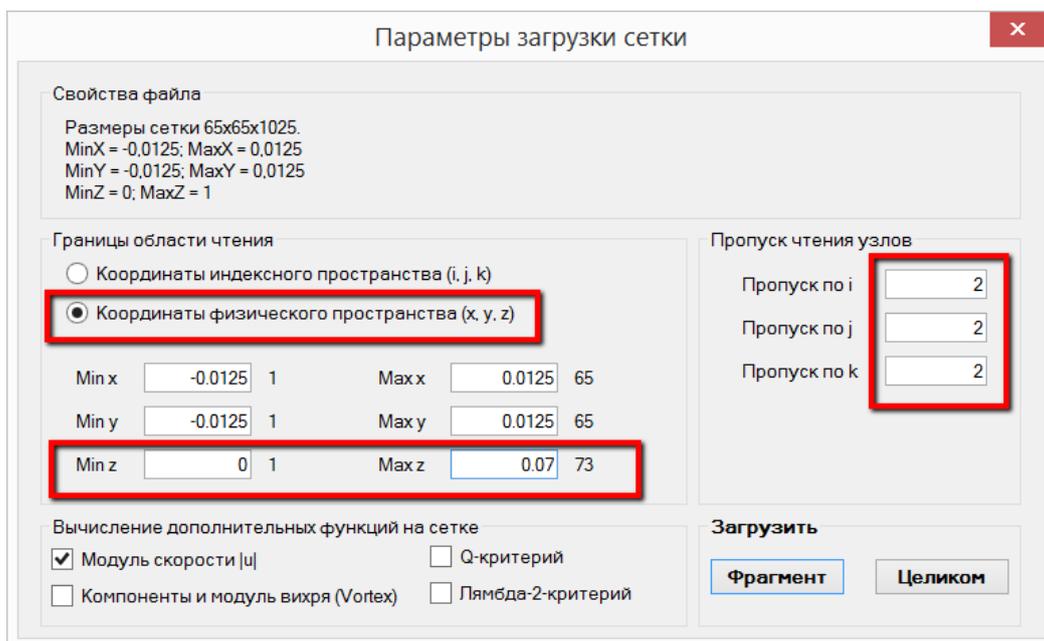
Данный процесс показан на рисунке 14.



**Рисунок 6. Пример загрузки данных в программу**

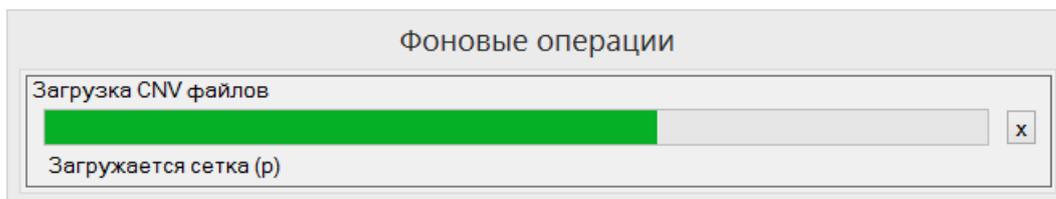
После выбора файлов откроется окно выбора фрагмента сетки (показано на рисунке 15).

В данной задаче нас интересует небольшой фрагмент цилиндра, внутри которого расположена сетка турбулизатора, поэтому укажем фрагмент в диапазоне от  $Z=0$  до  $Z=0.07$  в координатах физического пространства. Также воспользуемся функциональностью прореживания сетки при загрузке, что позволит сэкономить время при расчетах – укажем “2” в полях ввода пропуска по I, J, K. Остальные значения оставим без изменения. Нажмем кнопку «Фрагмент».



**Рисунок 7. Параметры загрузки сетки**

Программа произведёт загрузку сетки и указанного файла с поверхностями модели. В процессе загрузки будет выведен индикатор прогресса (показан на рисунке 16).



**Рисунок 8. Индикатор прогресса загрузки данных**

В результате загрузки в окне программы Visualizator будет выведен цилиндр. Цилиндр загружен целиком по всей длине модели. Сетка загружена только в той части, которую мы указали, в чем можно убедиться, включив режим вывода сетки и окно «Сетка», воспользовавшись кнопкой «» панели инструментов главного окна.

### Расчет на поверхности модели

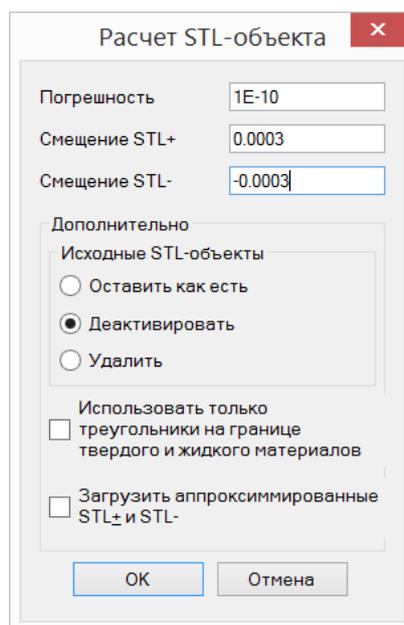
Выберем единственный загруженный в программу объект модели («stlinp») на изображении или в окне «Список STL-объектов». Вокруг объекта на экране появился желтая рамка.

Нажмем кнопку «3. Рассчитать значения на поверхности» окна «Операции с STL-объектами» (см. описание выше в разделе «Выполнение расчетов на поверхностях»). Данная операция позволит нам:

1. Получить значения стандартных переменных (температура, скорость и т.п.) на поверхностях выбранного объекта и нарисовать их;
2. Вычислить значения функций теплового потока и трения на поверхностях выбранного объекта и нарисовать их.

Откроется окно задания параметров расчетов (показано на рисунке 17). Укажем в нем:

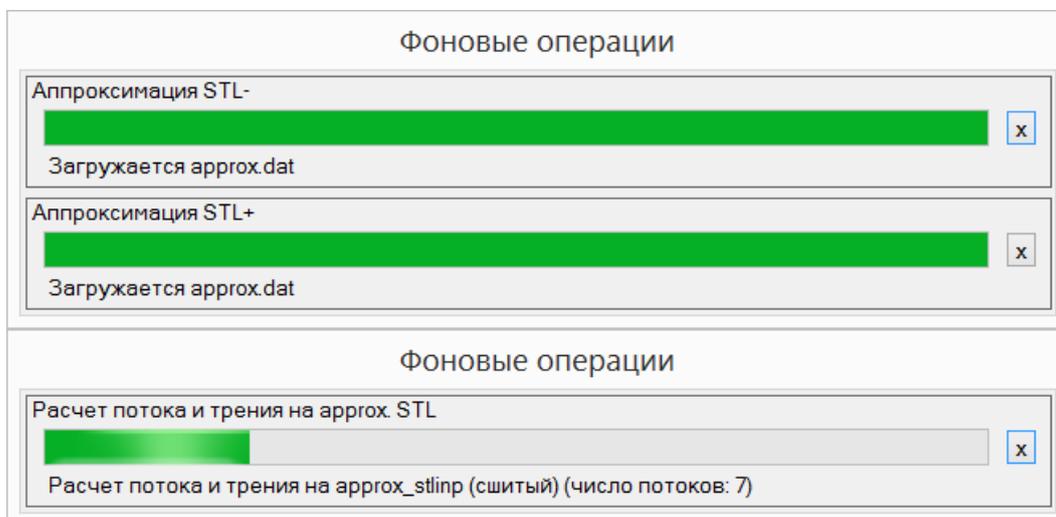
1. Смещение STL+ и Смещение STL- равные «0.0003» и «-0.0003»;
2. Остальные значения - по умолчанию;
3. Нажать ОК.



**Рисунок 9. Окно задания параметров расчетов**

Программа произведет аппроксимацию исходной поверхности загруженной сеткой, произведет снесение (интерполяцию) значений функций, заданных на сетке, в узлы полученной поверхности, а также выполнит расчёт функций теплового потока и трения на поверхности.

В процессе расчетов программа выведет информацию о прогрессе выполняемых операций, данное окно показано на рисунке 18.

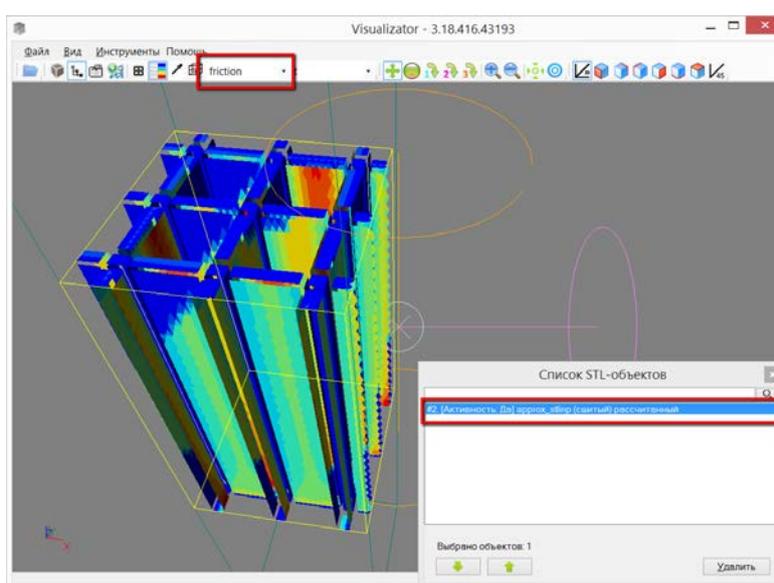


**Рисунок 10. Индикатор прогресса вычислений**

После окончания расчетов в памяти программы и в окне «Список STL-объектов» окажутся 3 объекта:

1. Исходный stlinp
2. Сшитый stlinp (промежуточный без значений в узлах)
3. Объект «approx\_stlinp (сшитый) рассчитанный» - исходная STL-поверхность, аппроксимированная сеткой и со значениями в узлах, полученными на основании значений в узлах сетки.

Удалим первые 2 из перечисленных объектов – они не содержат значений в узлах и в дальнейшем нам не потребуются. В памяти программы и не экране останется один объект. Выберем функцию friction для вывода на поверхности. Программа выведет распределение значений функции трения жидкости на поверхности твердого тела хонейкомба (см. рис. 19).



**Рисунок 11. Распределение значений функции трения жидкости на поверхности твердого тела**

## Контроль результатов численного эксперимента

Для контроля полученных результатов программа предоставляет следующие возможности: контроль на сетке и контроль на поверхностях STL-объектов.

Контроль на сетке подразумевает просмотр сетки по слоям, т.е. визуальный и численный контроль распределения значений функций на сетке.

Контроль на поверхностях подразумевает просмотр поверхностей объектов, т.е. визуальный контроль распределения значений на поверхности и численный контроль значений в точке поверхности.

Кроме того, в Visualizator существует возможность контроля полученных результатов с помощью сторонних пакетов визуализации, путем экспорта данных в формат наиболее распространённый среди других ПК визуализации результатов вычислений. Остановимся подробнее на описании каждой упомянутой выше возможности.

### Контроль на сетке

Отключим (скроем) объект модели «approx\_stlinp (сшитый) рассчитанный» при помощи двойного клика на нем в окне «Список STL-объектов».

Включим вывод сетки на экран при помощи кнопки «» панели инструментов. Откроется окно «Сетка». Выберем индекс X. Выберем переменную «u» (скорость) для вывода на сетке, т.к. эта переменная является основой для вычисления трения, которое нас будет в дальнейшем интересовать для контроля на поверхности модели.

Откроем окно «Редактор палитры» при помощи кнопки «» панели инструментов, выберем в нем «u» и нажмем кнопку «Сброс». Это приведет к пересчету диапазона цветов заливки сетки таким образом, чтобы самый «холодный» цвет соответствовал минимальному значению переменной «u» на сетке, а самый «горячий» цвет соответствовал максимальному.

Описанные выше действия и результат их выполнения показаны на рисунке 20.

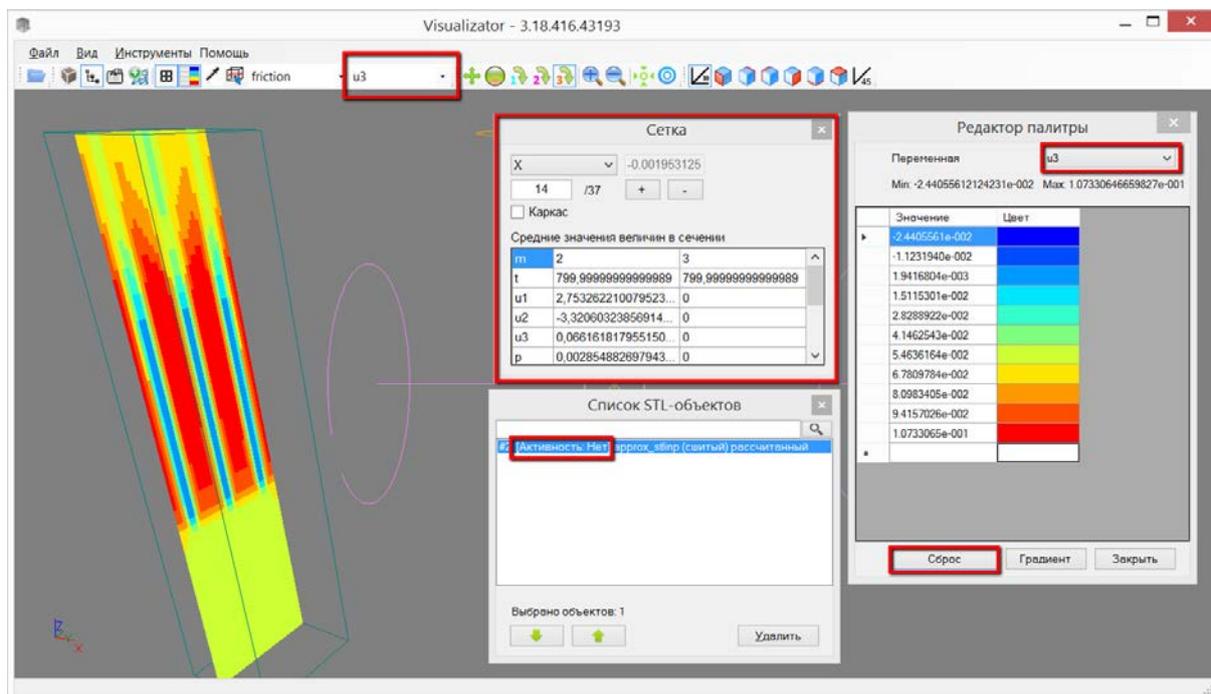


Рисунок 12. Распределение значений функции скорости на сечении сетки

Изменяя значения номера сечения и ось координат, которой перпендикулярно выбранное сечение (X, Y или Z), мы видим:

1. Распределение значений выбранной функции на поверхности сечения. Окно «Редактор палитры» показывает соответствие цветов значениям функции, заданной на сетке или поверхности STL-объекта и выбранной в выпадающем списке в окне редактора палитры;
2. Средние значения функций на выбранном сечении в каждом материале по отдельности (см. таблицу в окне «Сетка»).

## Контроль на поверхностях

Закроем окно «Сетка». Включим вывод на экран объекта «approx\_stlinp (сшитый) рассчитанный» (см. окно «Список STL-объектов»).

Выберем переменную «friction» для вывода на поверхности (выпадающий список на панели инструментов, расположен слева). В окне «Редактор палитры» выберем функцию «friction» и нажмем «Сброс». Программа покажет поверхность объекта и распределение значений функции трения на ней (показано на рисунке 21).

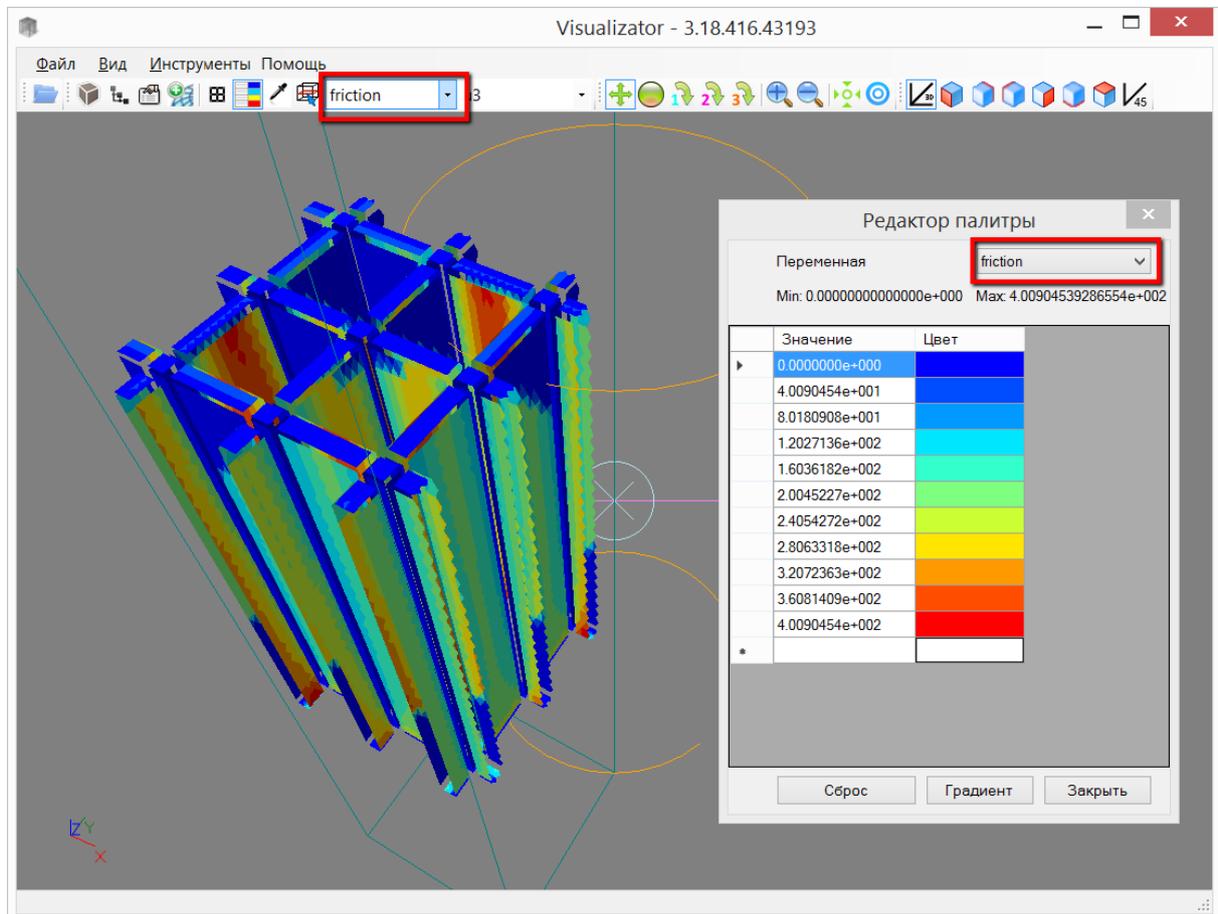
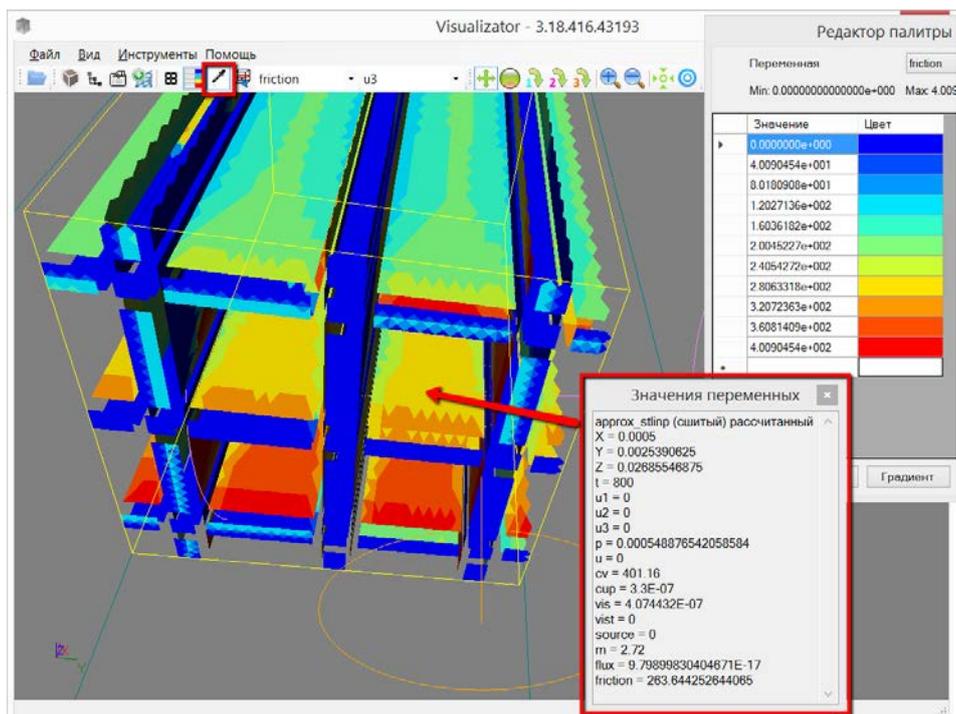


Рисунок 13. Распределение значений функции трения на поверхности объекта

Окно «Редактор палитры» показывает соответствие цветов на поверхности значениям функции.

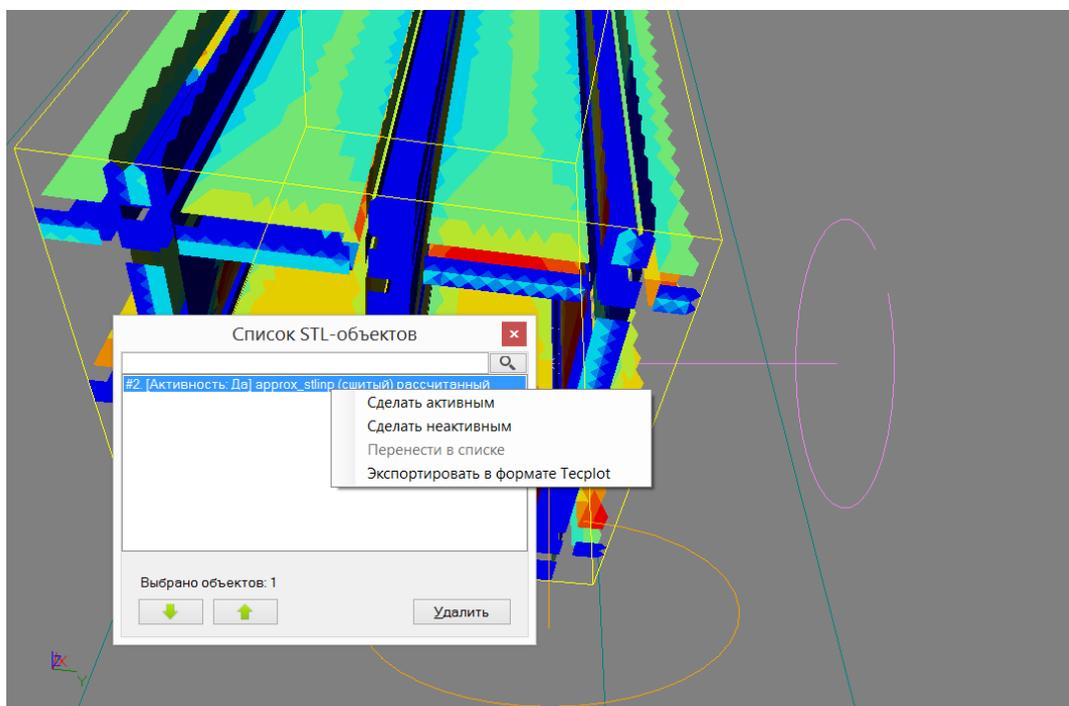
Для снятия (получения) точного значения в точке на поверхности STL-объекта воспользуемся кнопкой . После щелчка по поверхности объекта откроется окно «Значения переменных», в котором будут выведены значения переменных, интерполированные в данных точку поверхности (показано на рисунке 22). Для интерполяции используются значения функций, заданные на этой поверхности STL-объекта (не сетки).



**Рисунок 14. Распределение значений функции трения на поверхности объекта**

### Контроль в сторонних пакетах программ

Программа Visualizator позволяет экспортировать поверхности и значения функций на них в текстовый формат DAT программы Tecplot для контроля результатов вычислений на поверхности модели (см. рис.23).



**Рисунок 15. Экспорт рассчитанной поверхности в формат DAT**

### Другие примеры расчетов

Данный раздел содержит примеры выполнения постпроцессинга нескольких численных экспериментов.

### Эксперимент «Гидравлический пролив дросселя»

Моделирование дросселей актуально для многих типов реакторных установок, так как они установлены на входе в часть изделий активной зоны этого реактора.

Дроссель был выбран для моделирования на этапе опытной эксплуатации кода CONV-3D/V2 ввиду наличия экспериментальных данных по гидравлическому проливу [7]. Задача была предложена АО «НИКИЭТ».

Ранее в АО «НИКИЭТ» была предпринята попытка решить данную задачу одним из коммерческих кодов с использованием RANS приближения с различными моделями турбулентности и с использованием сетки высокого качества. Однако погрешность расчета гидравлического сопротивления по сравнению с результатами экспериментов была высокой – до 40%. Это послужило мотивацией к выбору данной задачи как тестовой для кода CONV-3D/V2.

Моделировалось течение воды в проточной части дросселя, как с одной перегородкой, так и с четырьмя перегородками (штатная конструкция дросселя). Были рассчитаны поля средней скорости и статического давления. Определен коэффициент гидравлического сопротивления дросселя. Результаты расчета были сопоставлены с экспериментальными данными.

Условия данной задачи изотермичны. Моделировалось изменение скорости потока жидкости, поэтому целесообразно было проверить распределение значений трения на стенке внешней трубы и внутренних поверхностях, что показано на рисунке 24.

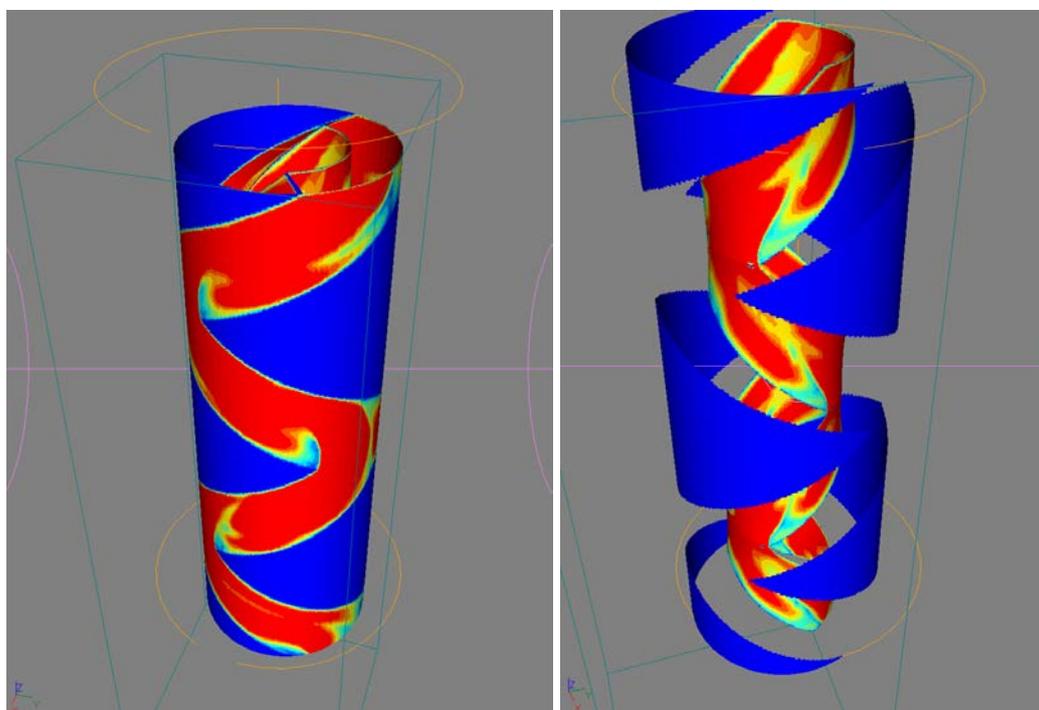


Рисунок 16. Трение жидкости на стенке внешней трубы и внутренних поверхностях

Изменением диапазона значений уровней палитры, можно добиться визуального выделения «холодных» и «горячих» участков с низким и высоким значением отображаемой функции соответственно.

### Эксперимент «Течение натрия в круглой трубе с охлаждением»

В задаче течения теплоносителя в круглой трубе с охлаждением рассматривается развитое турбулентное течение теплоносителя. Снаружи труба омывается средой с бесконечно большим расходом и бесконечно большим коэффициентом теплоотдачи. В этом случае температуру наружной стенки трубы можно принять постоянной. Геометрические характеристики трубы представлены в таблице 6.

Таблица 2. Геометрические характеристики трубы

Наименование параметра	Значение
Диаметр трубы $d_{IN}$ , м	0,05
Длина адиабатического участка трубы $l_1^*$ , м	2,0

Длина охлаждаемого участка трубы $l_2$ , м	0,5
* Принимается для формирования профиля скорости в трубе, $40 d_{IN}$	

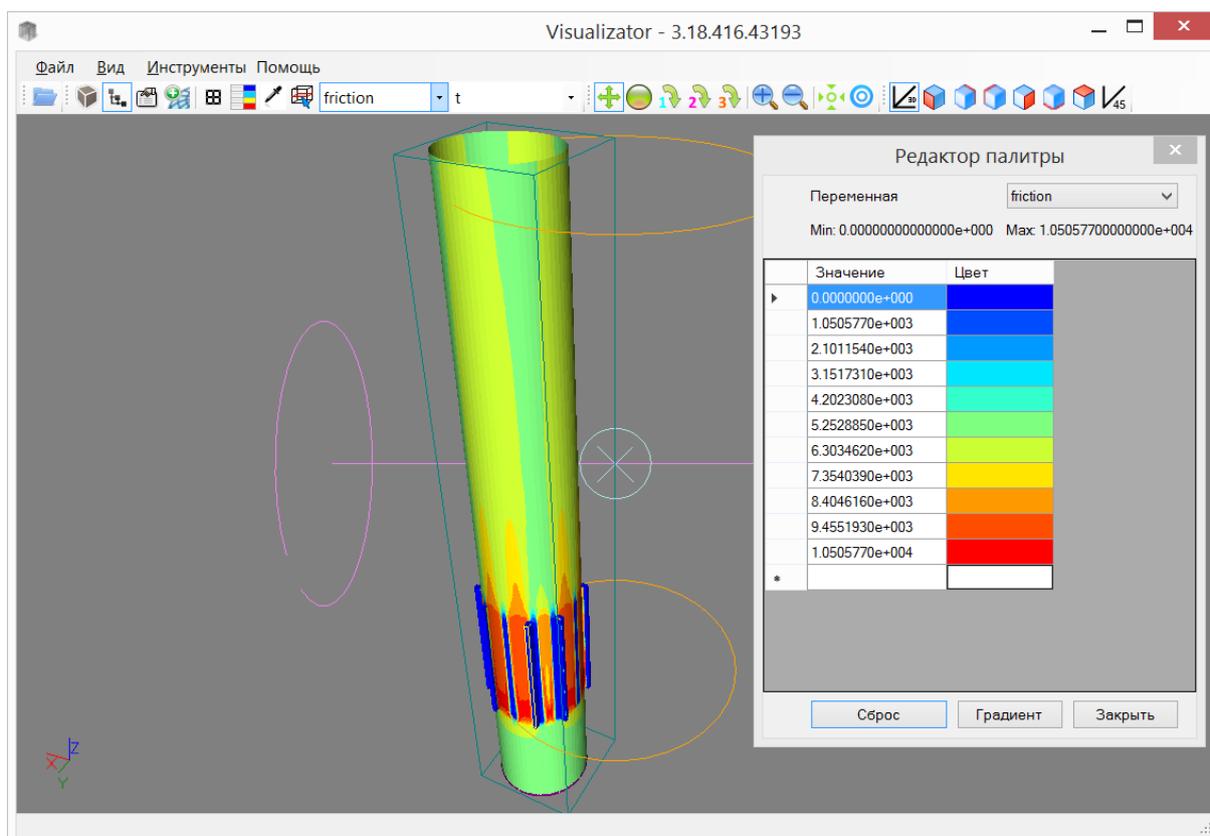
Задача решается с натриевым теплоносителем. Теплофизические характеристики теплоносителя принимаются при температуре 550 °С в соответствии с таблицей 7, в которой используются следующие обозначения:  $\rho$  – плотность, кг /м<sup>3</sup>;  $C_p$  – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°С);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с; Pr – число Прандтля.

**Таблица 3. Теплофизические характеристики теплоносителя**

Температура, °С	$\rho$	$C_p$	$\lambda$	$\mu$	Pr
550	820	1258	67,3	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$4,116 \cdot 10^{-3}$

На выходе задаётся граничное условие “свободный выход (P=0)”.

Моделируется изменение скорости потока жидкости, поэтому целесообразно было проверить распределение значений трения вблизи поверхности, как показано на рисунке 25.



**Рисунок 17. Общий вид модели**

К особенностям задачи можно отнести:

1. Распределение значений средней температуры на выходе из трубы (рисунок 26);
2. Распределение значений скорости турбулизованного потока после хонейкомба (рисунок 27).

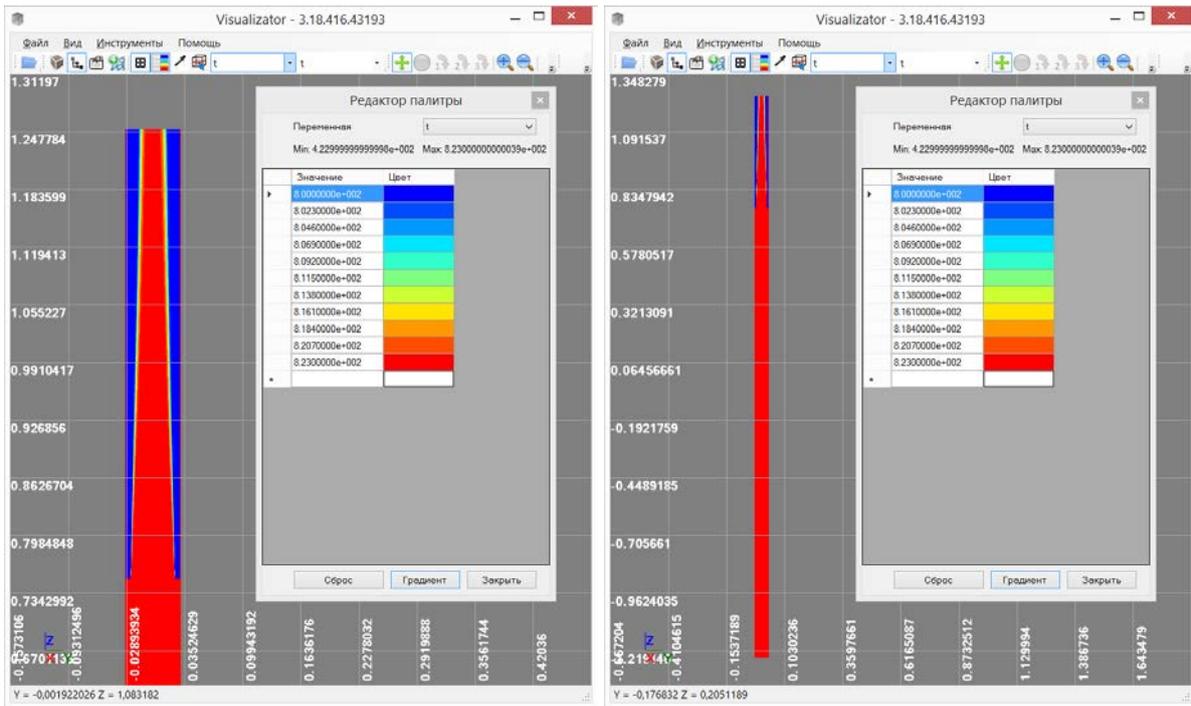


Рисунок 18. Распределение значений средней температуры на выходе из трубы

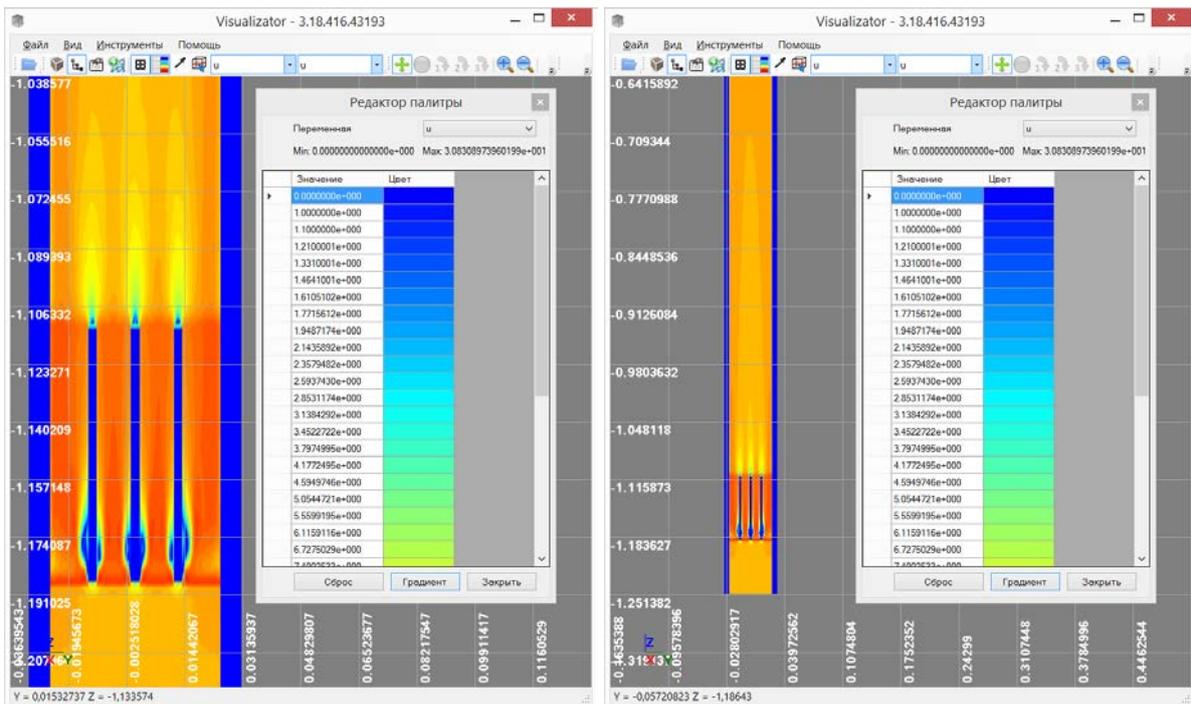


Рисунок 19. Распределение значений скорости турбулизованного потока после хонейкомба

Для детального контроля в данной задаче скроем все объекты, кроме хонейкомба (турбулизатора), и построим значения функции трения (friction) на хонейкомбе, как показано на рисунке 28. Исповерхность, демонстрирующая изменение скорости потока жидкости после турбулизатора, показана на рисунке 29.

Для снятия (получения) точного значения в точке на поверхности воспользуемся кнопкой . После щелчка по поверхности объекта откроется окно «Значения переменных», в котором будут выведены значения переменных, интерполированные в данных точку поверхности (см. рис. 30).

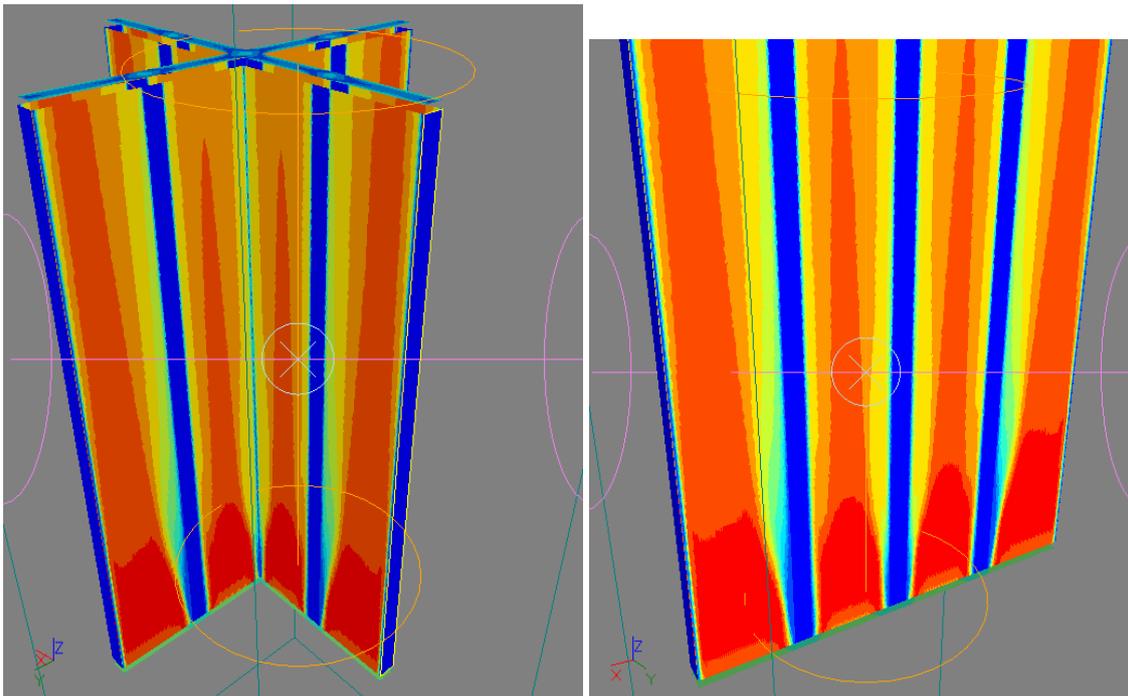
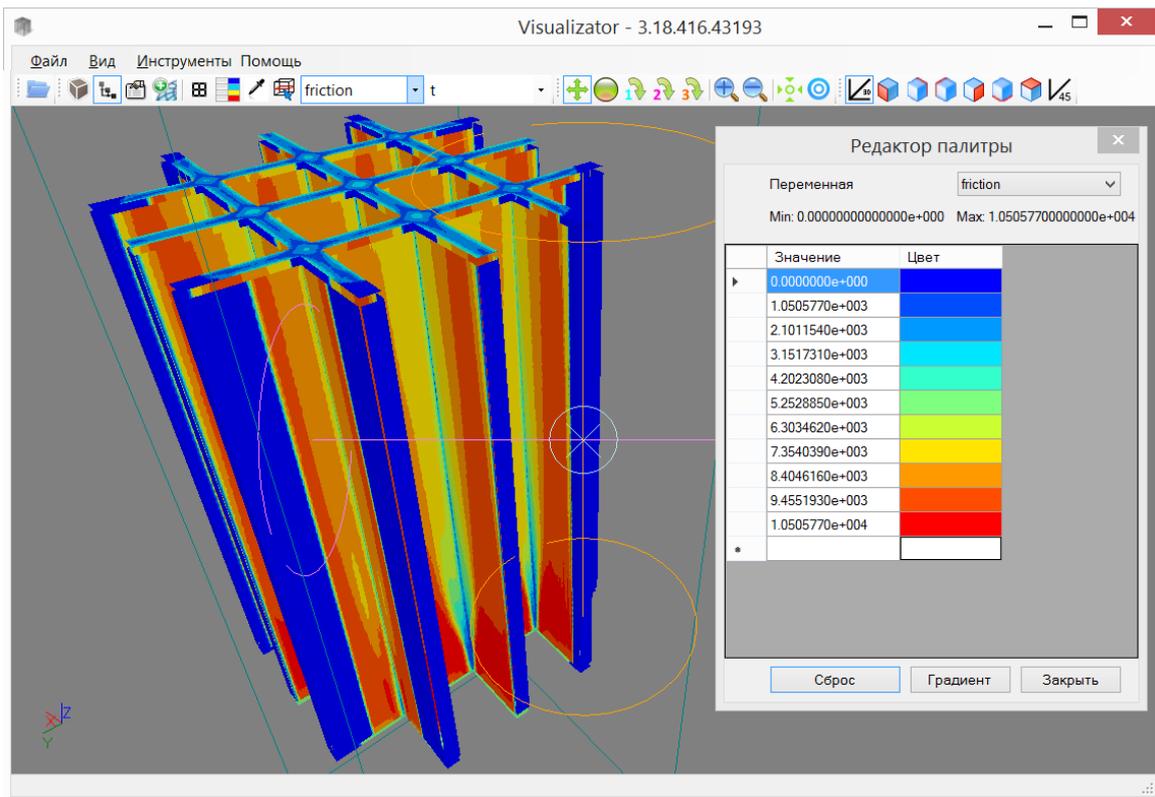


Рисунок 28. Решетка турбулизатора и трение потока жидкости вблизи поверхности

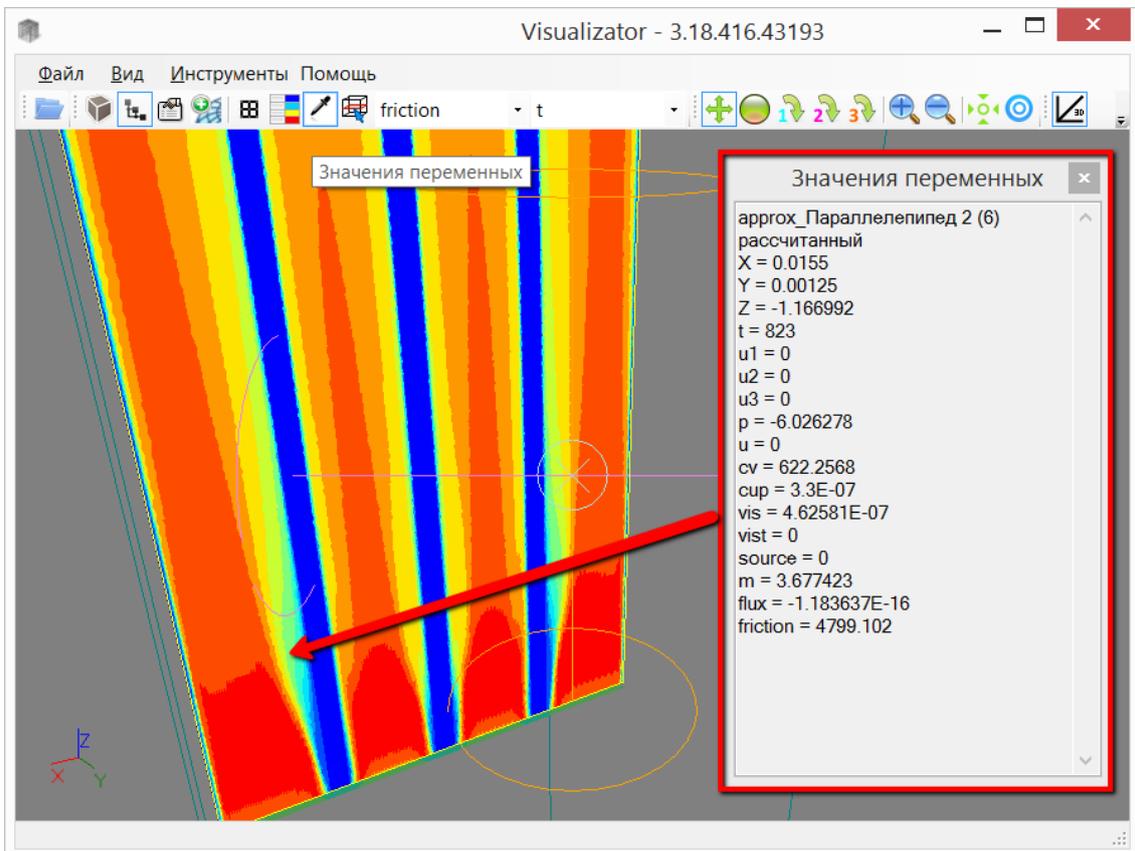
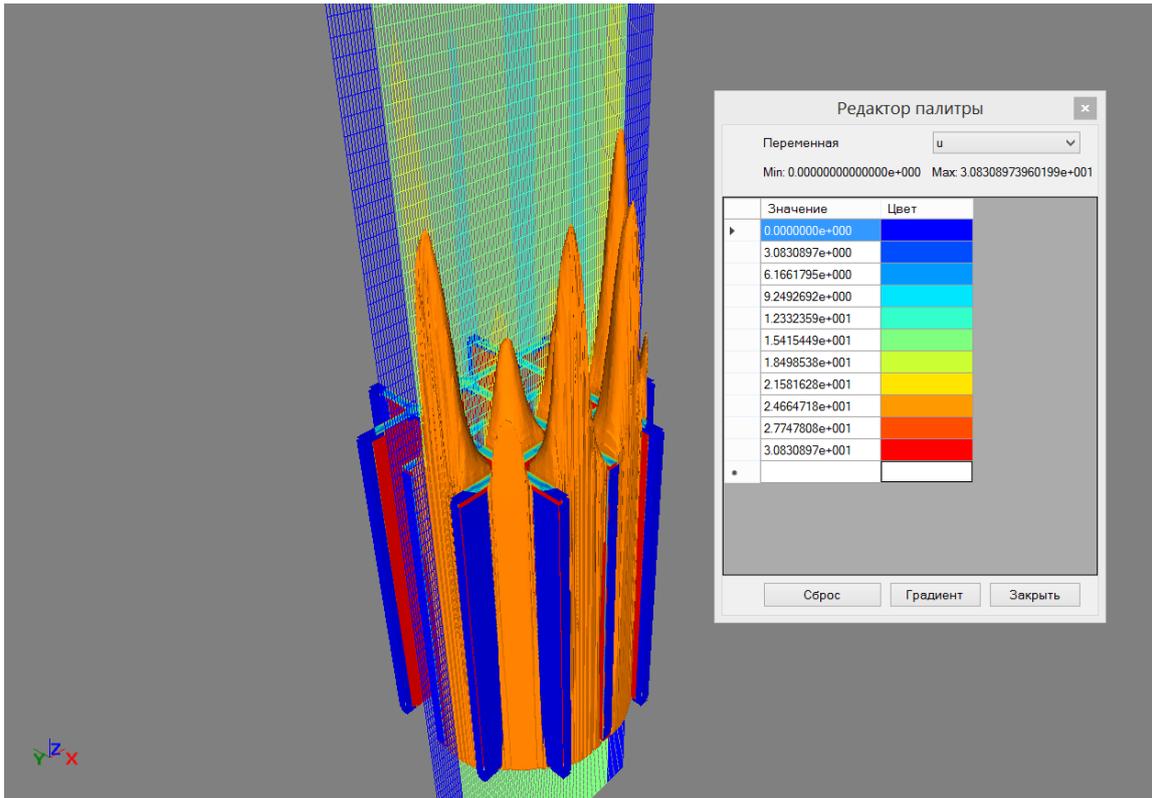


Рисунок30. Детальный просмотр и получение значение функций в точке поверхности

## Эксперимент «Течение в кольцевом канале с преградой на установке Сибирь»

Эксперименты исследованию течения в кольцевом канале с преградой были проведены на установке Сибирь [7], которая представляет собой замкнутый гидродинамический контур, снабженный системой термостабилизации рабочей жидкости, в Институте Теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН.

Рабочим участком является вертикальная труба из оргстекла внутренним диаметром  $D = 42,2$  мм и длиной 3600 мм (см. рис. 31а). На рисунке 31а показана схема рабочего участка экспериментального стенда Сибирь с использованием следующих обозначений: 1 – датчики; 2 – преграда; 3,4,5 – дистанционирующие решетки, 6 – наконечник. По вертикальной оси трубы из оргстекла установлена внутренняя металлическая труба с наружным диаметром  $d = 20$  мм. На металлической трубе установлены датчики. Эквивалентный диаметр кольцевого канала  $D - d = 22,2$  мм. Для центрирования центральной трубы в канале ниже заслонки по потоку располагались дистанционирующие решетки, схема которых приведена на рисунке 31б.

Штриховой линией показан диаметр внешней трубы, сплошными линиями показано перекрытие поперечного сечения потока решеткой. Решетки втачивались во внешнюю трубу, внутренняя труба могла проходить в центральное отверстие решетки. Высота каждой решетки составляет 5 мм. Решетки располагались на расстояниях 100, 550 и 1100 мм от заслонки.

Наконечник центральной трубы представлял собой конус с диаметром основания 20 мм (рисунок 31 31в). В рабочем участке реализуется восходящее течение жидкости.

В кольцевом канале установлена преграда – металлическая пластина, перекрывающая четверть поперечного сечения кольцевого канала (рисунок 31г), находящаяся на расстоянии 2700 мм от входа в рабочий участок. Данная преграда вносит сильное возмущение в течение, имеющее трехмерный характер.

Схема расположения преграды в канале на рисунке 31б использует следующие обозначения: 1 – внешняя труба диаметром 42,2 мм; 2 – внутренняя труба диаметром 20 мм; 3 – преграда.

Рабочей жидкостью является раствор ферри- и ферроцианида калия и гидрокарбоната натрия в дистиллированной воде. Физические свойства данного раствора такие же, как у воды. Температура рабочей жидкости  $25^\circ\text{C}$ . Вязкость жидкости соответствует таковой для дистиллированной воды при температуре  $25^\circ\text{C}$ . (10-6 м<sup>2</sup>/с). Средняя скорость жидкости (в пересчете на проходное сечение кольцевого канала) 0,55 и 1,1 м/с.

Используется электродиффузионный метод измерения касательного напряжения на стенке. Непосредственно измеряемой величиной является ток датчика трения. Напряжение трения на стенке зависит от тока датчика согласно формуле:

$$\tau = A \cdot I^C,$$

где  $\tau$  – напряжение трения на стенке,  $I$  – ток датчика,  $A$  и  $C$  – коэффициенты, определяемые из предварительной калибровки датчиков в кольцевом канале без возмущения потока. Калибровка проводится непосредственно до и после эксперимента.

В случае если обчисленные значения трения по этим двум калибровкам отличаются более чем на 5 процентов, эксперимент считается недействительным и повторяется. Согласно проведенным исследованиям, погрешность измерения напряжения трения на стенке составляет 7%, его пульсаций – 15 %.

Датчики трения расположены на внутренней трубе (диаметром 20 мм). Датчики зашлифованы заподлицо со стенкой трубы и не вносят гидродинамических возмущений в течение. Геометрия начального участка нашего кольцевого канала изменяется при вертикальном перемещении датчиков трения. При удалении датчиков от заслонки уменьшается длина начального участка канала.

Для увеличения длины начального участка канала центральная трубка была удлинена и расстояние от датчиков до конца трубки теперь составляет 1700 мм. Когда датчики находились на одном уровне с заслонкой, длина начального участка кольцевого канала равнялась 1700 мм. Расстояние между датчиками по вертикали составляло 10 мм. В процессе измерений внутренняя труба может перемещаться вдоль оси и вращаться, что позволяет изменять положение датчиков относительно преграды, как по продольной, так и по азимутальной координате.

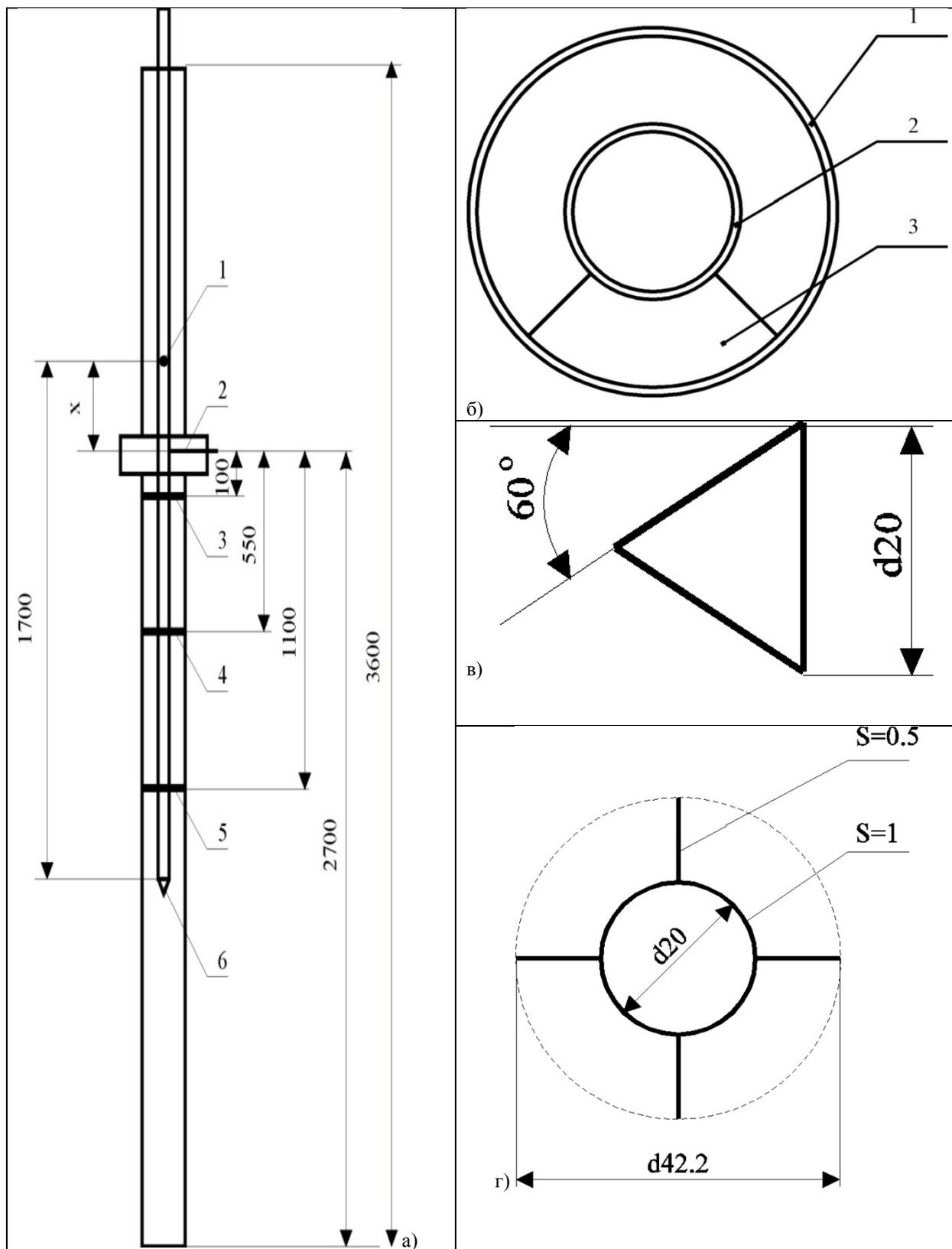


Рисунок 31. Схема рабочего участка экспериментального стенда

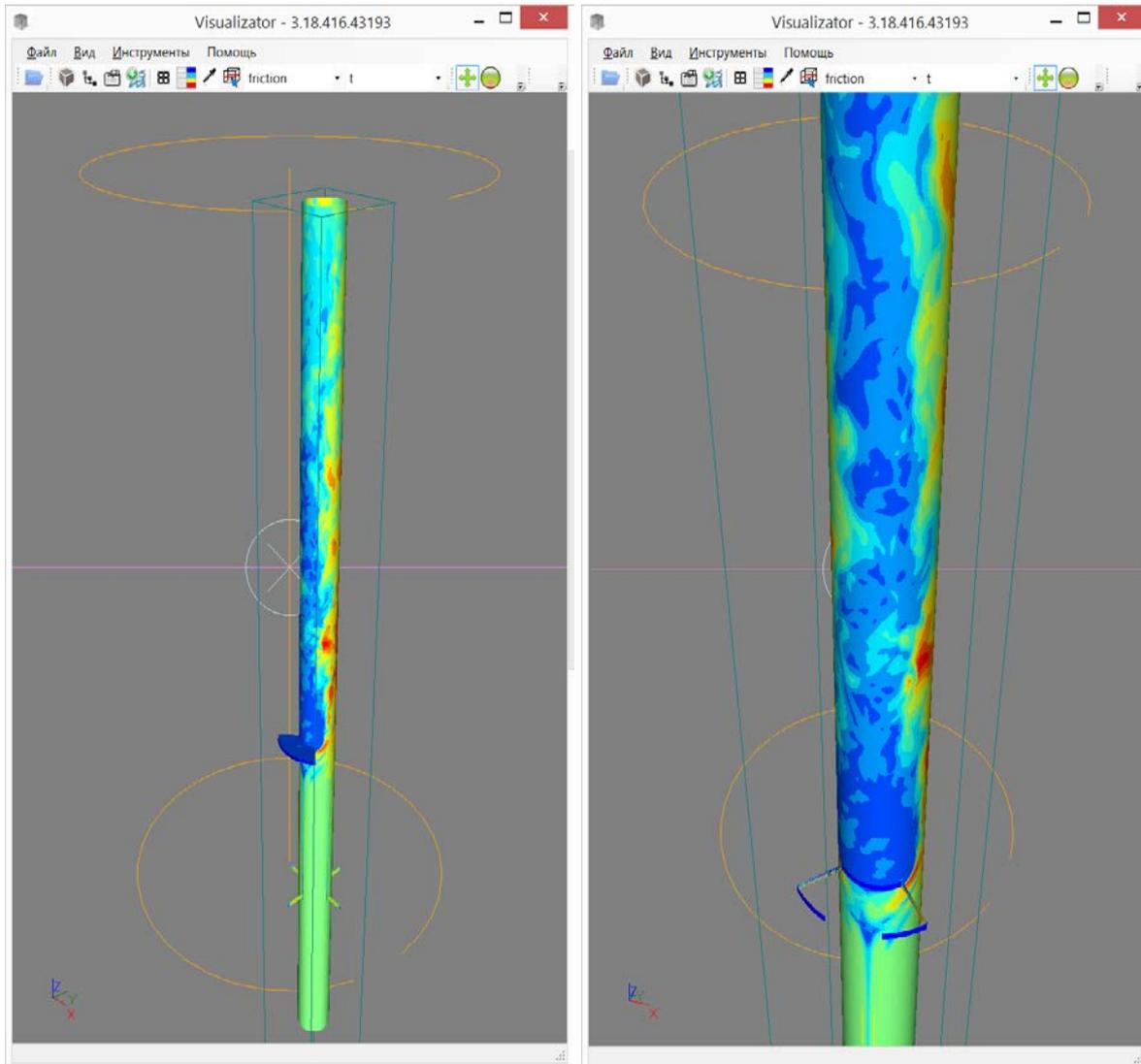
В эксперименте измеряются:

- Среднее по времени локальное касательное напряжение (составляющая напряжения трения вдоль направления канала) на стенке  $\tau_w$ .
- Интенсивность продольной компоненты пульсаций напряжения трения на стенке  $\tau'$  (Значения  $\tau'$  определяются при помощи обычного статистического аппарата).

Контрольные измерения  $\tau_w$  и  $\tau'$  при отсутствии преграды показали наличие осевой симметрии исходного течения в кольцевом канале.

Условия данной задачи изотермичны. Моделировалось изменение скорости потока жидкости, поэтому целесообразно было проверить распределение значений трения вблизи поверхности.

Общий вид модели показан на рисунке 32, экран детального просмотра вблизи преграды показан на рисунке 33.



**Рисунок 32. Общий вид модели задачи**

Для снятия (получения) точного значения в точке на поверхности воспользуемся кнопкой . После щелчка по поверхности объекта откроется окно «Значения переменных», в котором будут выведены значения переменных, интерполированные в данной точке поверхности (показано на рисунке 34).

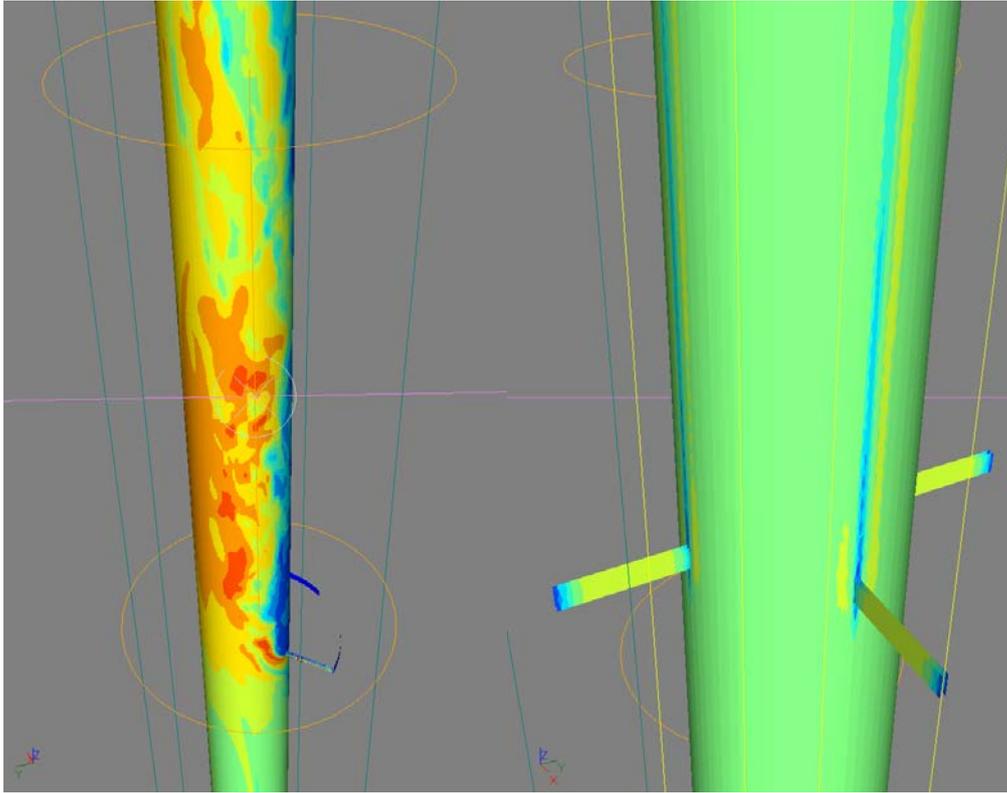


Рисунок 33. Крупный план вблизи преграды

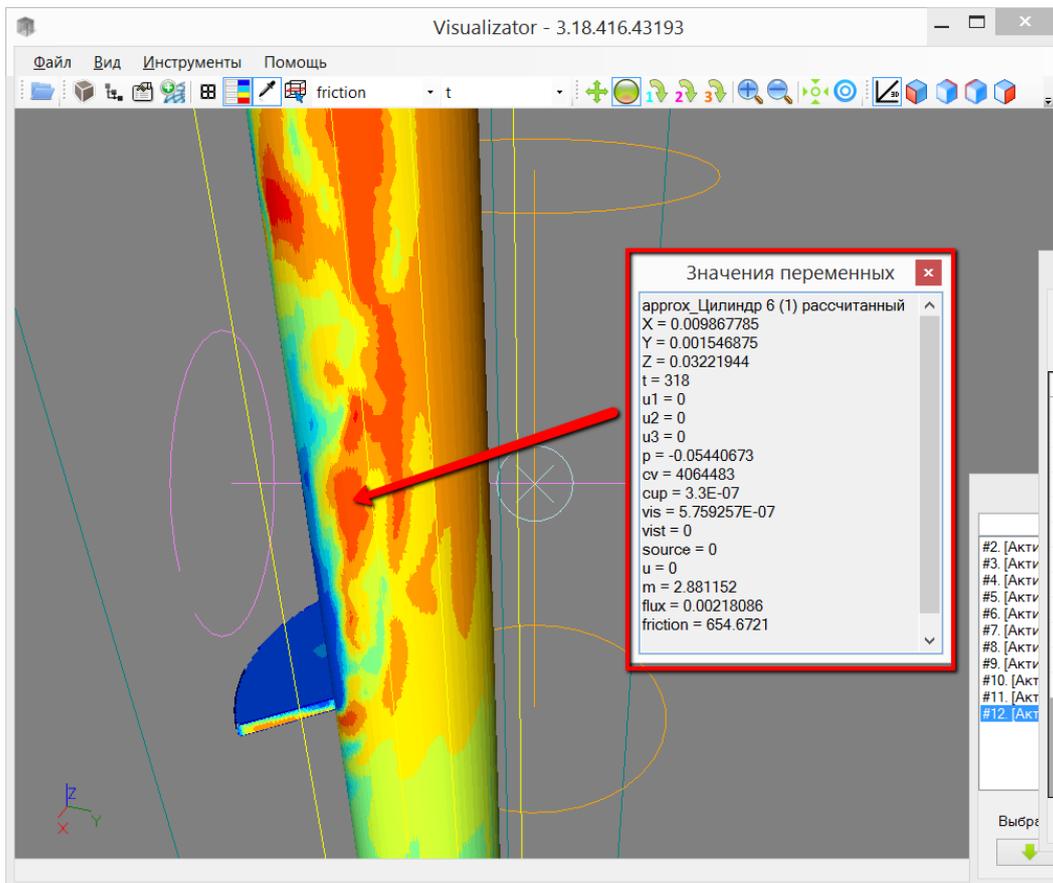


Рисунок 34. Проба значений функций на поверхности модели, численный контроль

## Эксперимент «Теплообмен в круглой гидравлически гладкой трубе»

Рассмотрим задачу о теплообмене в круглой гидравлически гладкой трубе. Постановка задачи соответствует экспериментальным исследованиям течения жидких металлов в трубах, выполненным в ГНЦ РФ-ФЭИ (Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского) [7].

Согласно экспериментальным данным, труба имеет размеры: длина  $l = 1,52$  м, внутренний диаметр  $d = 18,7$  мм. Труба имеет три участка: участок предварительный гидродинамической стабилизации длиной 390 мм ( $20d$ ), средний участок длиной 940 мм ( $50d$ ) с обогреваемой поверхностью и успокоительный участок длиной 190 мм ( $10d$ ). Первый и третий участки с адиабатическими боковыми поверхностями.

На торцах трубы предусмотрены смесительные камеры, в которых измеряли среднесмешанную температуру теплоносителя. Выходная смесительная камера отнесена от конца обогреваемого участка на расстояние приблизительно  $10d$ . Основные измерения выполнены с помощью заделанных в медную оболочку трубы двух подвижных термопар, которые можно было перемещать вдоль всего обогреваемого участка. Подвижные термопары изготавливали из медных и константановых проволочек диаметром 0,09 мм.

В опытах исследовался теплообмен при течении эвтектического сплава (22% Na + 78% K) в трубе из нержавеющей стали 1X18H9T.

В результате построения модели в программе GeometryEditor [8], постановки граничных условий в программе EditInp [9] и расчёте в программе conv3d, имеем декартову сетку с заданными в узлах функциями  $t$  (температура),  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  (проекция вектора теплоносителя на оси координат) и др.

Ниже приводятся примеры изображений окна программы, полученные на указанной сетке:

1. Распределение значений температуры на сечениях сетки вдоль оси X, вдоль Y (рисунки 35 и 36).
2. Распределение значений модуля скорости на сечениях сетки, проходящих внутри и вблизи стенки смесительной камеры (рисунки 37 и 38).
3. Распределение значений компонент скорости  $u_1$ ,  $u_2$  и  $u_3$  на среднем сечении сетки (рисунки 39, 40 и 41).
4. Результат построения изоповерхности, соответствующей значению модуля скорости  $u=0.4$  м/с (рисунок 42).
5. Распределение значений температуры на поверхностях объектов модели задачи (рисунок 43).
6. Распределение значений функции теплового потока на стенках смесительных камер (рисунок 44).

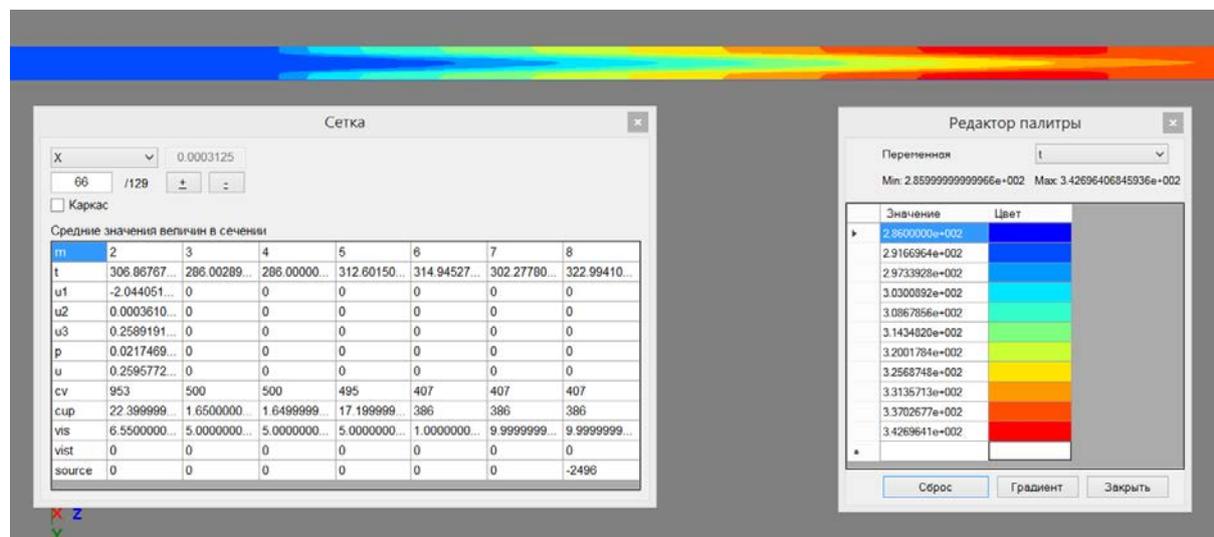


Рисунок 35. Распределение температуры  $t$  в среднем сечении сетки вдоль оси X



Рисунок 36. Распределение температуры  $t$  в среднем сечении сетки вдоль оси  $Y$

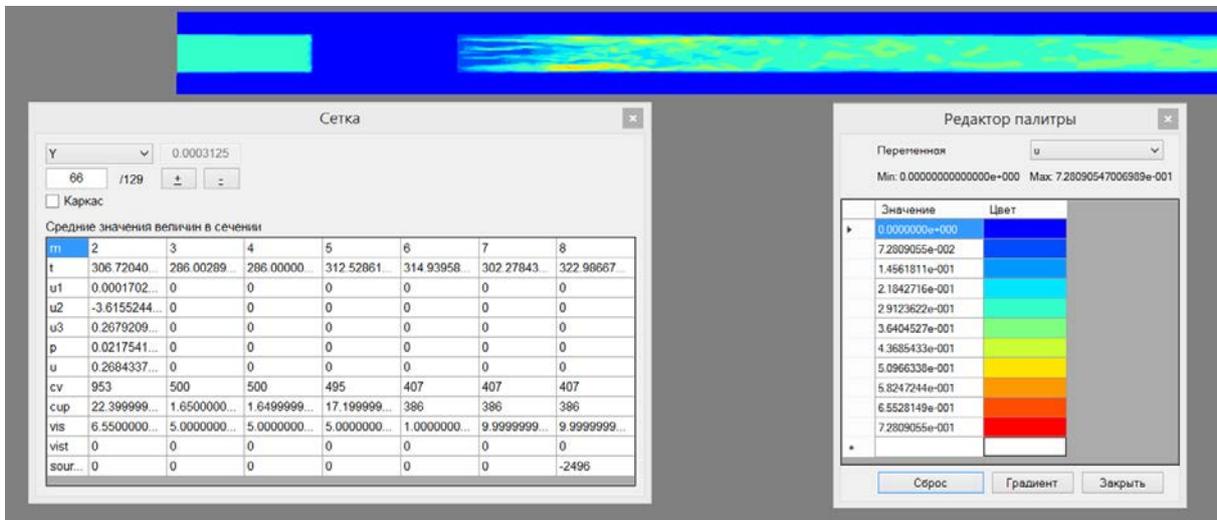


Рисунок 37. Распределение модуля скорости  $U$  в среднем сечении сетки вдоль оси  $Y$  в сечении стенки смесительной камеры

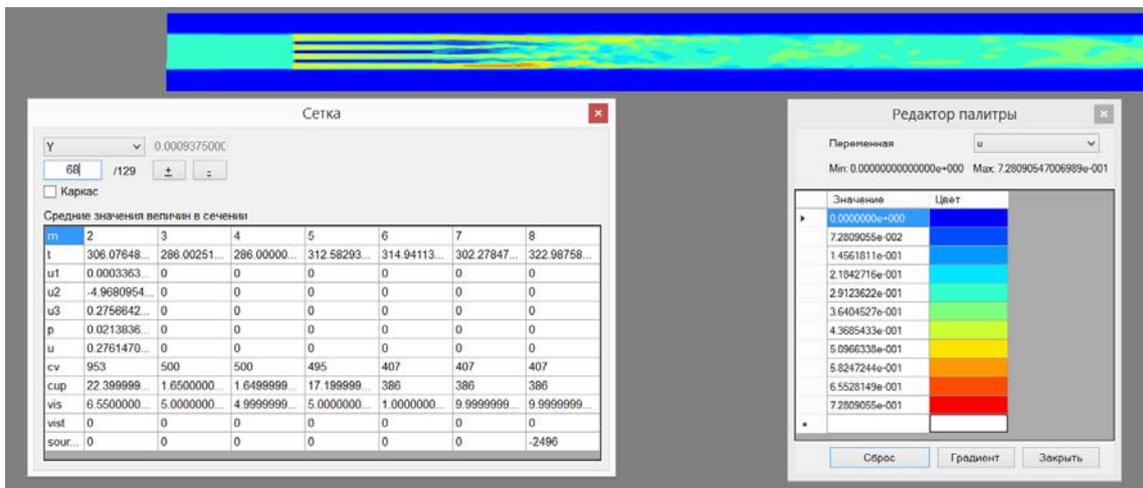


Рисунок 38. Распределение модуля скорости  $U$  в среднем сечении сетки вдоль оси  $Y$  вблизи решетки смесительных камер

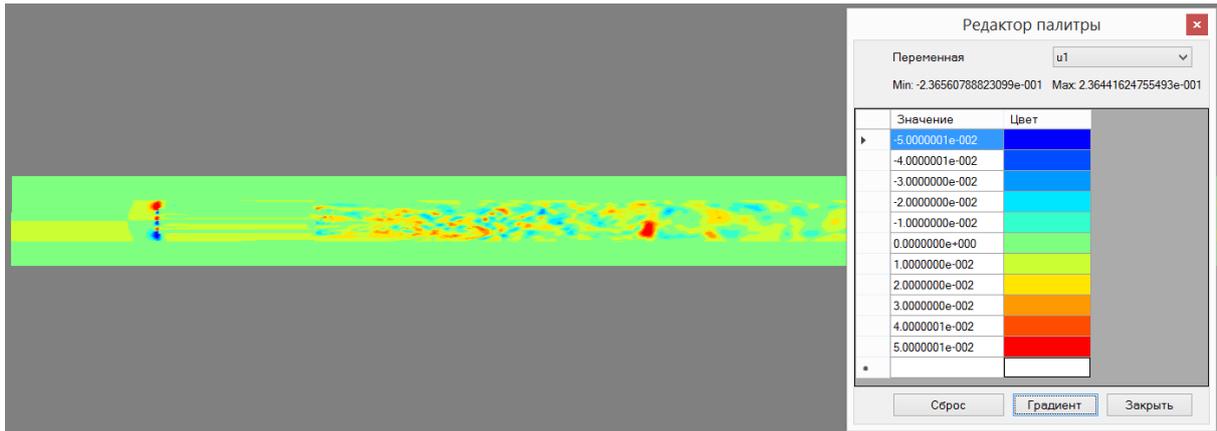


Рисунок 39. Распределение компоненты скорости  $u_1$  в среднем сечении сетки вдоль оси  $Y$  вблизи решетки смесительных камер

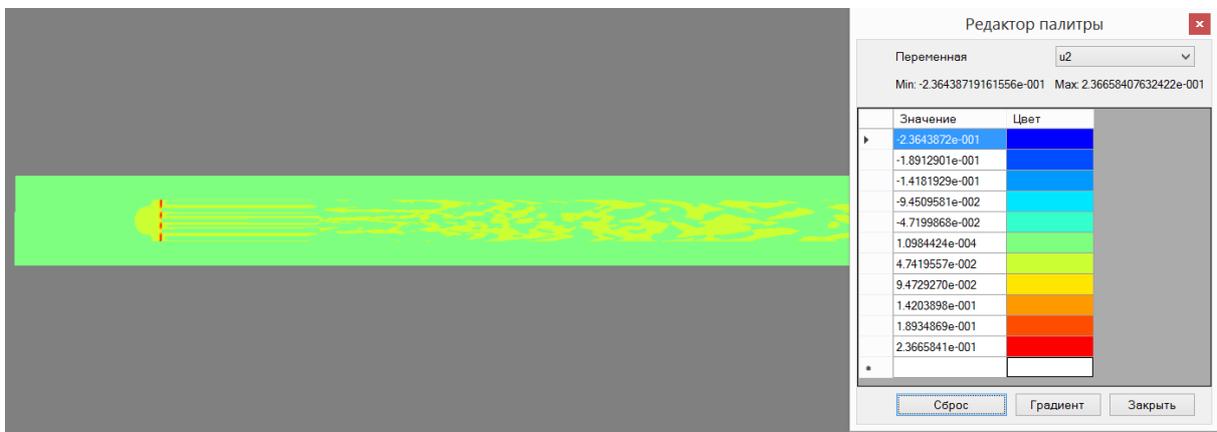


Рисунок 40. Распределение компоненты скорости  $u_2$  в среднем сечении сетки вдоль оси  $Y$  вблизи решетки смесительных камер

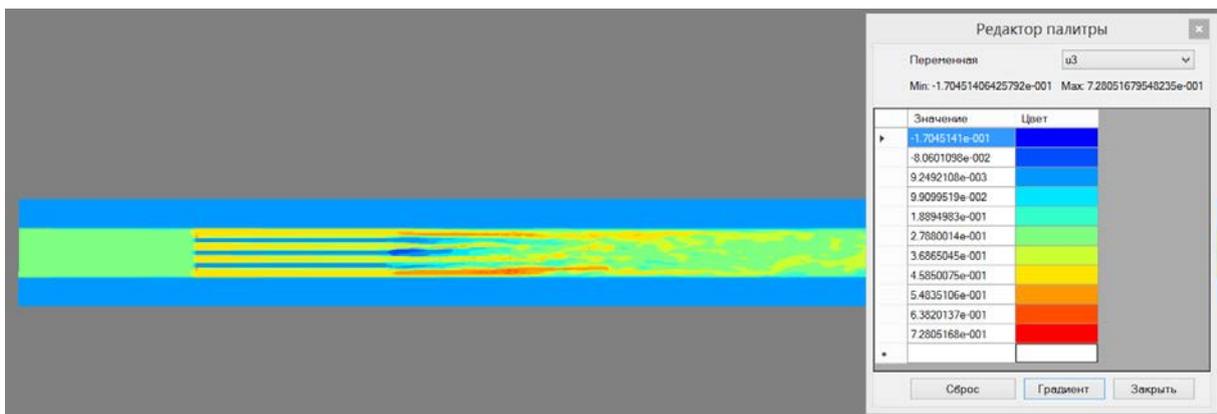


Рисунок 41. Распределение компоненты скорости  $u_3$  в среднем сечении сетки вдоль оси  $Y$  вблизи решетки смесительных камер

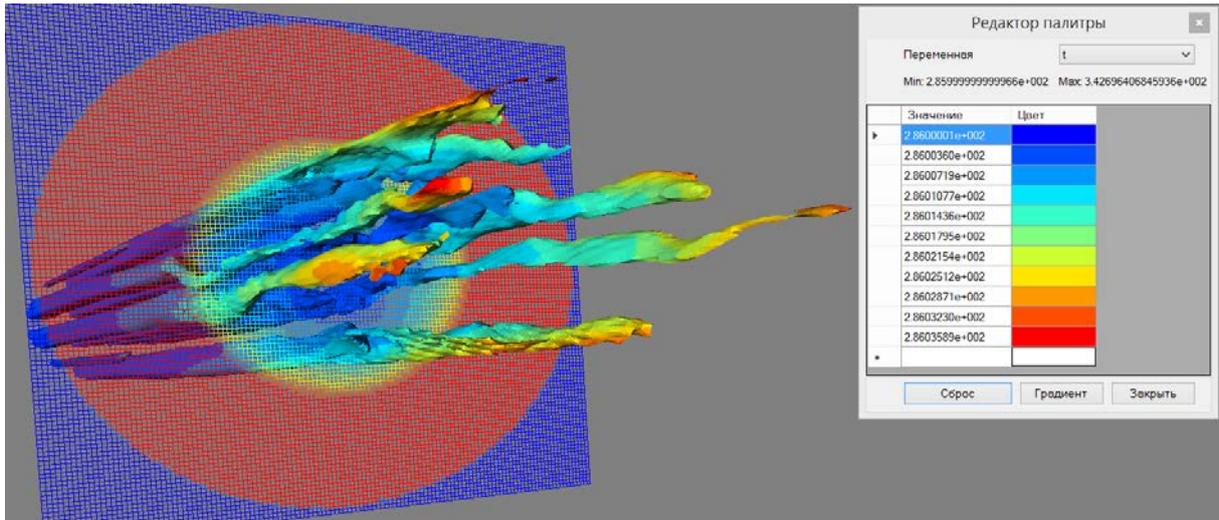


Рисунок 42 . Изоповерхность  $u=0.4$  м/с и сечение сетки. Цветом показана температура  $t$

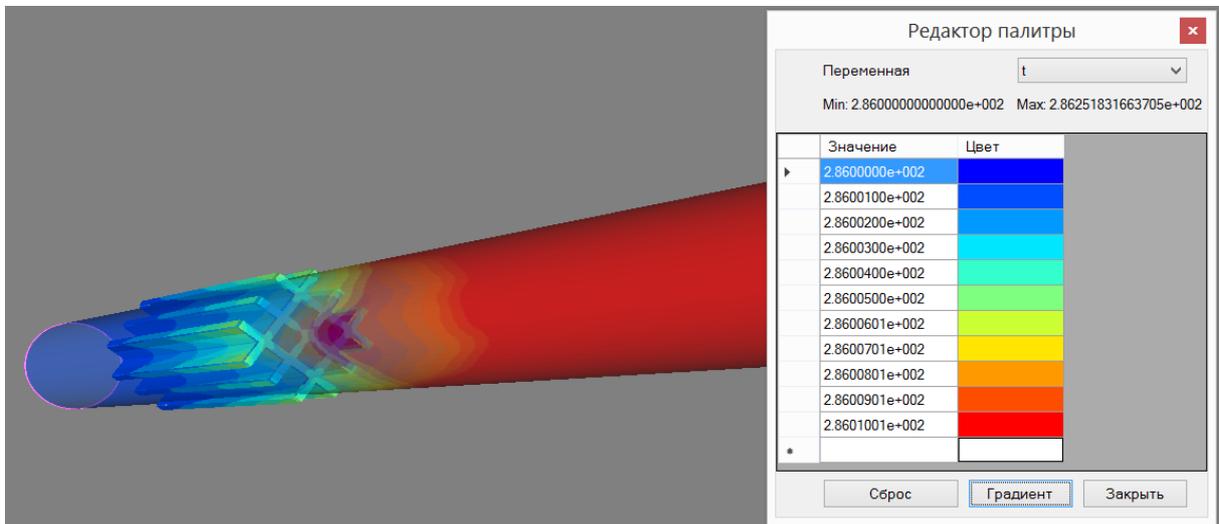


Рисунок 43. Значения функции температуры  $t$  на стенках трубы и смесительных камер

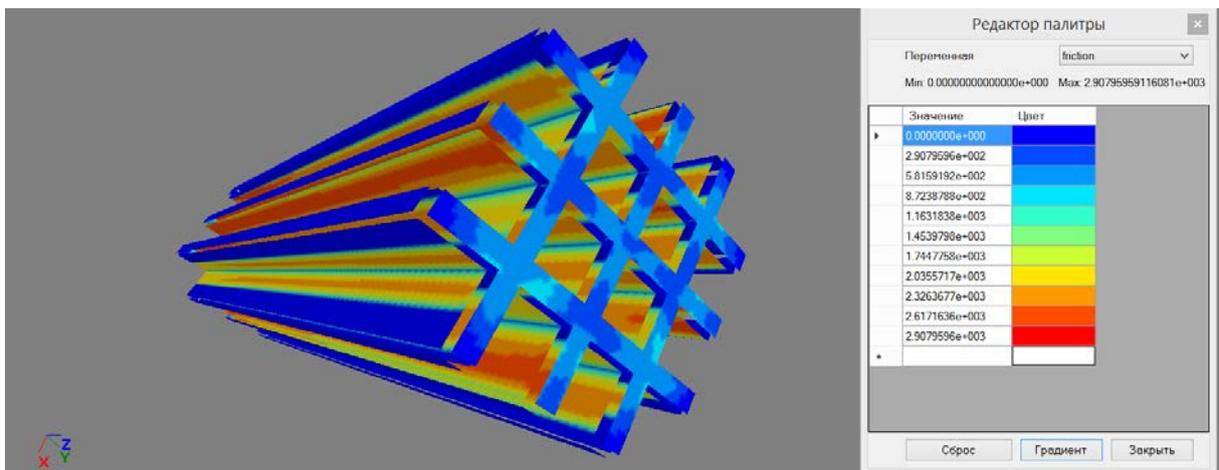


Рисунок 44. Значения функции теплового потока на стенках смесительных камер

## **Заключение**

- Разработана программа Visualizator – инструмент для численного и визуального контроля результатов CFD-расчетов, выполненных ПС CONV-3D/V2.
- Подготовлен документ, который объясняет основные особенности работы Visualizator и ограничения его применения.
- Данный документ позволяет пользователям вычислительного CFD модуля CONV-3D/V2 помочь освоить и в короткие сроки перейти к решению непосредственно теплогидродинамических задач, на которые ориентирован CFD модуль CONV-3D/V2.

## Список использованных источников

- 1 [www.paraview.org](http://www.paraview.org)
- 2 <https://www.tecplot.com/>
- 3 Chudanov V.V., Aksenova A.E., Pervichko V.A. and Plotnikova I.G. Combined approach based on LES, FDM and CAD specifications for solving CFD problems, In book Computation mechanics: Techniques and developments// Edited by: B.H.V. Topping, Civil-Comp Press: Paperback: 323 pages, 2000: ISBN 0-948-749-68-7, pp. 285–291, 2000.
- 4 Чуданов В.В. Модели и методы трехмерного тепломассопереноса для описания тяжелых аварий. Известия Академии Наук, серия Энергетика, №2, 22–37, 2004.
- 5 Chudanov V.V., Aksenova A.E., Pervichko V.A., Plotnikova I.G., Korotkov A.A., “Grid Office” for CFD Pre and Post Processing, Proc. 17th IMACS World Congress, Paris, France July 11–15, 2005. ISBN 2-915913-02-1, CD-disk, paper T1-I-57-0970. 2005.
- 6 Методы вычислительной гидродинамики для анализа безопасности объектов ТЭК // – Труды ИБРАЭ РАН / под. общей ред. чл.-кор. РАН Л.А. Большова. Вып.3. – М: Наука, 2008. – 210 с.: ил.
- 7 Отчет о верификации и обосновании программного средства «Прецизионный масштабируемый вихреразрешающий CFD модуль на базе DNS приближения, ориентированный на петафлопсные ( $10^{15}$ ) вычислительные ЭВМ. Версия 2.0». Инв. № 4735-Н.4х.44.9Б.14.1037-12-Р4-1. ИБРАЭ РАН, Москва, 2016 (стр. 700).
- 8 Аксенова А.Е., Коротов А.А., Первичко В.А., Ромеро Рейес И.В., Чуданов В.В. Геометрический редактор Geometry\_Editor для вычислительного модуля CONV-3D // — М.: Препринт ИБРАЭ, № IBRAE-2015-03, 2015. — 40 с.
- 9 Аксенова А.Е., Коротов А.А., Первичко В.А., Чуданов В.В. Редактор сценария EditInp вычислительного модуля CONV-3D // — М.: Препринт ИБРАЭ, № IBRAE-2018-11, 2018. — 54 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. Форматы файлов Visualizator

### Формат STL трёхмерных объектов

STL - формат файла, широко используемый для хранения трёхмерных моделей объектов. Информация об объекте хранится как список треугольных граней, которые описывают его поверхность, и их нормалей. STL-файл может быть текстовым (ASCII) или двоичным.

#### ASCII STL

ASCII STL файл начинается со строки:

```
solid name
```

где name необязательная строка (но если name опущено, всё равно должен быть пробел после solid). Файл продолжается с любым числом треугольников, описываемых следующим способом:

```
facet normal ni nj nk  
outer loop  
vertex v1x v1y v1z  
vertex v2x v2y v2z  
vertex v3x v3y v3z  
endloop  
endfacet
```

где каждый n или v число с плавающей запятой в виде знака-мантиссы или 'e'-знак-экспоненты, то есть "-2.648000e-002". Файл завершается строкой: *endsolid name*

#### Двоичный формат STL

Поскольку ASCII STL файл может быть очень большим, существует двоичная версия данного формата. Файл начинается с заголовка из 80 символов (который обычно игнорируется, но не должен начинаться с 'solid', так как с этой последовательности начинается ASCII STL файл).

После заголовка идет 4 байтовое беззнаковое целое число, указывающее количество треугольных граней в данном файле. После этого идут данные, характеризующие каждый треугольник, в свою очередь.

Каждый треугольник описывается двенадцатью 32 битными числами с плавающей запятой: 3 нормали и по 3 на каждую из трех вершин для X/Y/Z координат. После идут 2 байта беззнакового 'short', который называется 'attribute byte count'. В обычном файле должно быть равно нулю, так как большинство программ не понимают других значений.

Числа с плавающей запятой представляются в виде IEEE числа с плавающей запятой и считается обратным порядком байтов, хотя это не указано в документации.

```
UINT8 – Заголовок
```

```
UINT32 – Количество треугольников
```

```
foreach triangle
```

```
REAL32 – Нормаль
```

```
REAL32 – Вершина 1
```

```
REAL32 – Вершина 2
```

```
REAL32 – Вершина 3
```

```
UINT16 – Количество байт под атрибуты
```

```
end
```

#### Approx-STL

Approx-STL - преобразованный с помощью алгоритма-аппроксиматора STL-объект. Обработка производится на заранее заданной трёхмерной сетке. Результатом такого преобразования является STL-объект, каждый треугольник которого имеет ровно по две вершины, лежащих на ребрах использованной сетки.

## STL+|-

В рамках визуализатора, для Arproх-STL строятся вспомогательные объекты. Эти объекты представляют собой копии Arproх-STL, у которых все треугольники сдвинуты по нормали на заранее заданную величину. В зависимости от знака этой величины, объекты обозначаются либо как STL+, либо как STL-.

## Формат DAT трёхмерных объектов

DAT-формат есть стандартный формат программного пакета Tecplot. Формат позволяет описать сетку любого формата – неоднородную/однородную, на плоскости, в пространстве и т.п.

Программа Visualizator поддерживает следующий формат файлов для чтения и записи:

Заголовок файла. Здесь N - количество вершин в файле, а E - количество составленных из них треугольников.

```
TITLE = "3D triangles"
VARIABLES = "x" "y" "z"
ZONE N= 29454 , E= 58904 F=FEPOINT, ET=TRIANGLE
```

Далее идет N строк, каждая из которых описывает вершину тремя координатами (x, y, z)

```
-0.12240794E+02 -0.48875000E+02 -0.72773438E+02
... N ...
0.15290498E+02 0.77815321E+02 0.73515625E+02
```

Далее идет E строк, каждая из которых описывает треугольник тремя индексами описанных ранее вершин (индекс соответствует порядковому номеру строки, описывающей вершину).

```
4997 10575 14727
... E ...
9896 4970 29454
```

## Формат CNV для хранения сетки с данными

Файлы формата CNV содержат информацию о координатах узлов и значениях функций в узлах сетки.

CNV-формат описывает двоичный файл следующей структуры.

(здесь "переменные" - список соответствующих файлу переменных)

INT32 - ключ-константа, указывающий на обратный порядок записи байт в файле (для UNIX-систем)

INT32, INT32, INT32 - количество узлов сетки (NX, NY и NZ)

REAL32 \* NX - координаты X

REAL32 \* NY - координаты Y

REAL32 \* NZ - координаты Z

```
for (k от 0 до NZ-1)
{
  for (j от 0 до NY-1)
  {
    for (i от 0 до NX-1)
    {
      INT16- значение переменной "m" в точке i,j,k
    }
  }
}
```