



# **«APM FGA»**

**Fluid and Gas Analysis**

**Анализ течений жидкостей и газов**

**ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ**

# ***APM FGA***

---

## **Система анализа течений жидкостей и газов**

Описание Применения

Версия V16

Научно-технический центр «Автоматизированное Проектирование Машин»

141070, Россия, Московская область, г. Королёв, Октябрьский бульвар 14, оф. 6

тел./факс: +7 (498) 600-25-10, +7 (495) 514-84-19.

Наш адрес в Интернете: <http://www.apm.ru>, e-mail: [com@apm.ru](mailto:com@apm.ru)

Авторские права © 1989 – 2018 Научно-технический центр «Автоматизированное проектирование машин». Все права защищены. Все программные продукты НТЦ «АПМ» являются зарегистрированными торговыми марками центра. Названия и марки, упомянутые в данном руководстве, являются зарегистрированными торговыми марками их законных владельцев.

# Содержание

---

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Анализ потенциальных течений.....</b>	<b>5</b>
1.1 Задание свойств течения.....	5
1.2 Задание граничных условий.....	5
1.3 Настройки и запуск анализа.....	7
1.4 Анализ полученных результатов.....	8
<b>2 Стационарный анализ фильтрации течений.....</b>	<b>10</b>
2.1 Задание свойств течения.....	10
2.2 Задание граничных условий.....	11
2.3 Создание конечно-элементной сетки.....	11
2.4 Настройки и запуск анализа.....	12
2.5 Анализ полученных результатов.....	13
<b>3 Нестационарный анализ фильтрации течений.....</b>	<b>15</b>
3.1 Создание геометрии и конечно-элементной сетки.....	15
3.2 Задание свойств течения.....	15
3.3 Задание граничных условий.....	15
3.4 Настройки и запуск анализа.....	16
3.5 Анализ полученных результатов.....	17
<b>4 Турбулентное обтекание здания воздушным потоком.....</b>	<b>20</b>
4.1 Создание геометрии и конечно-элементной сетки.....	20
4.2 Задание свойств течения.....	20
4.3 Задание граничных условий.....	20
4.4 Параметры и запуск анализа.....	24
4.5 Анализ полученных результатов.....	26
<b>5 Термическое турбулентное течение жидкости через диффузор.....</b>	<b>29</b>
5.1 Построение модели.....	29
5.2 Задание свойств течения.....	32
5.3 Задание граничных условий.....	32
5.4 Создание конечно-элементной сетки.....	36
5.5 Параметры и запуск анализа.....	37
5.6 Анализ полученных результатов.....	38
<b>6 Турбулентное течение жидкости в каналах для охлаждения лопатки турбины. Сопряженный теплообмен.....</b>	<b>41</b>
6.1 Задание свойств течения.....	41
6.2 Задание граничных условий.....	42
6.3 Параметры и запуск анализа.....	46
6.4 Анализ полученных результатов.....	48

## Введение

---

Средства анализа течений жидкостей и газов, реализованные в APM FGA, могут использоваться для моделирования процессов различных течений.

Доступны три типа анализа:

- анализ потенциальных течений; используется для расчета полей скоростей и давлений идеальных течений;
- анализ фильтрации течений; используется для расчета полей давлений и скоростей течений через ортотропную пористую среду; реализован в стационарной и нестационарной постановках;
- анализ течений Навье-Стокса; используется для расчета полей давлений и скоростей течений в ламинарной и турбулентной постановках.

Используемая в APM FGA конечно-элементная формулировка для каждого из типов анализа основана на базовых законах сохранения. Поддерживаемые типы конечных элементов - solid элементы первого порядка:

- 4-х узловой тетраэдр,
- 5-и узловая пирамида,
- 6-и узловая призма,
- 8-и узловой гексаэдр.

Результатами каждого из типов анализа являются:

- поля давлений (контурные карты),
- поля скоростей (контурные и векторные карты).

# 1 Анализ потенциальных течений

---

Конечно-элементная сетка была получена в модуле APM Studio и экспортирована в модуль APM Structure 3D. Для имеющейся *конечно-элементной сетки* необходимо задать *свойства* и *граничные условия* течений. В качестве результатов необходимо получить *поля давлений* и *скоростей*, проведя *анализ потенциальных течений*.

Дальнейшая работа происходит только в модуле APM Structure 3D только в дереве программы (необходимо включить две панели инструментов *Объекты*, *Свойства*).

## 1.1 Задание свойств течения

Для этого выбираем в дереве *Материал / Сталь* и команду *Редактировать...* из контекстного меню. В появившемся диалоговом окне выбираем из *доступных свойств материала* – *Течение* и нажимаем кнопку *Изменить*. Открывается диалог *Дополнительные свойства материала*. Задаем *плотность* воды равную  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Закрываем все диалоговые окна по кнопке *ОК*. Выбираем в дереве *Материал / Сталь* команду *Задать всем* из контекстного меню.

## 1.2 Задание граничных условий

В данной постановке задачи нужно задать два граничных условия: *скорость* слева и *Потенциал скорости* справа.

Для задание *Скорости* выбираем в дереве *Нагрузки / FGA ГУ/НУ* команду *Скорость* из контекстного меню. Выделяем объемные элементы, на поверхности которых будет задана скорость. Для определения поверхностей объемного элемента необходимо выделить еще и узлы объемного элемента, описывающие эту поверхность. В панели *Свойства* в строке *Скорость X / Значение [м/с]* вводим значение  $0.04$ . В строках *Скорость Y / Значение [м/с]* и *Скорость Z / Значение [м/с]* вводим значение  $0$ . Затем в строке *Элементы* нажимаем кнопку *Применить*. После этого в строке *Количество* отобразится количество объемных элементов, на которые задано граничное условие. В данном случае это *150 элементов*.

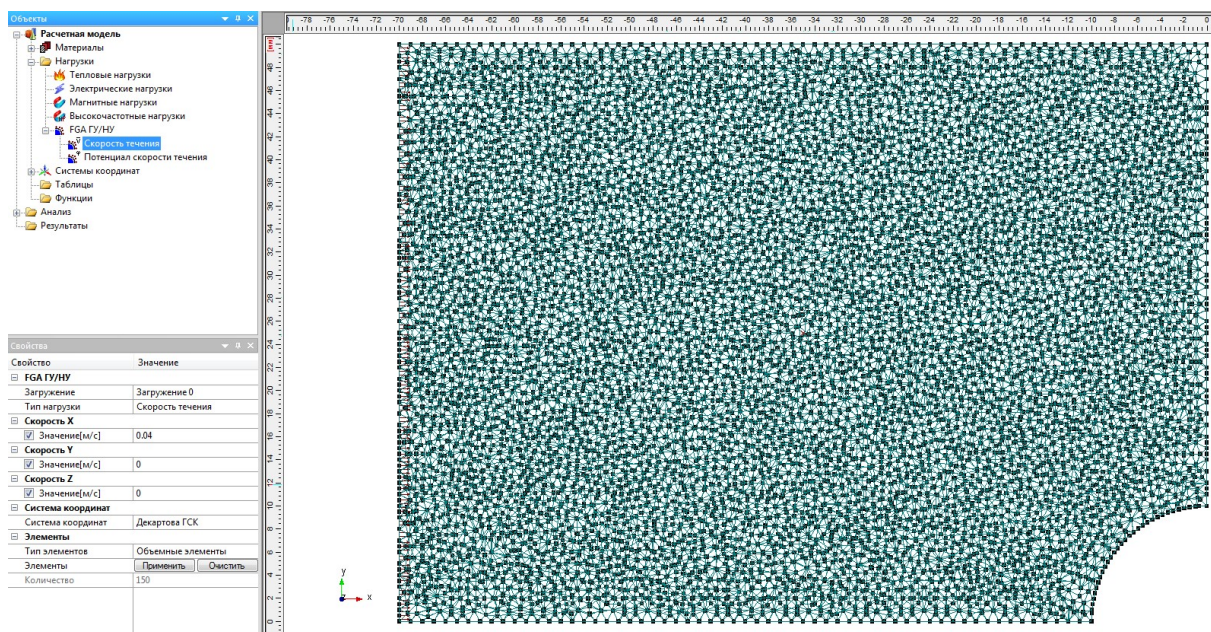


Рисунок 1 – Задание Скорости

Для задания *Потенциала скорости* выбираем в дереве *Нагрузки / FGA ГУ/НУ* команду *Потенциал скорости* из контекстного меню. Выделяем объемные элементы, на поверхности которых будет задан *потенциал скорости*. Для определения поверхностей объемного элемента необходимо выделить еще и узлы объемного элемента, описывающие эту поверхность. В панели *Свойства* в строке *Потенциал скорости / Значение [м<sup>2</sup>/с]* вводим значение – 0. Затем в строке *Элементы* нажимаем кнопку *Применить*. После этого в строке *Количество* отобразится количество объемных элементов, на которые задано граничное условие. В данном случае это *108 элементов*.

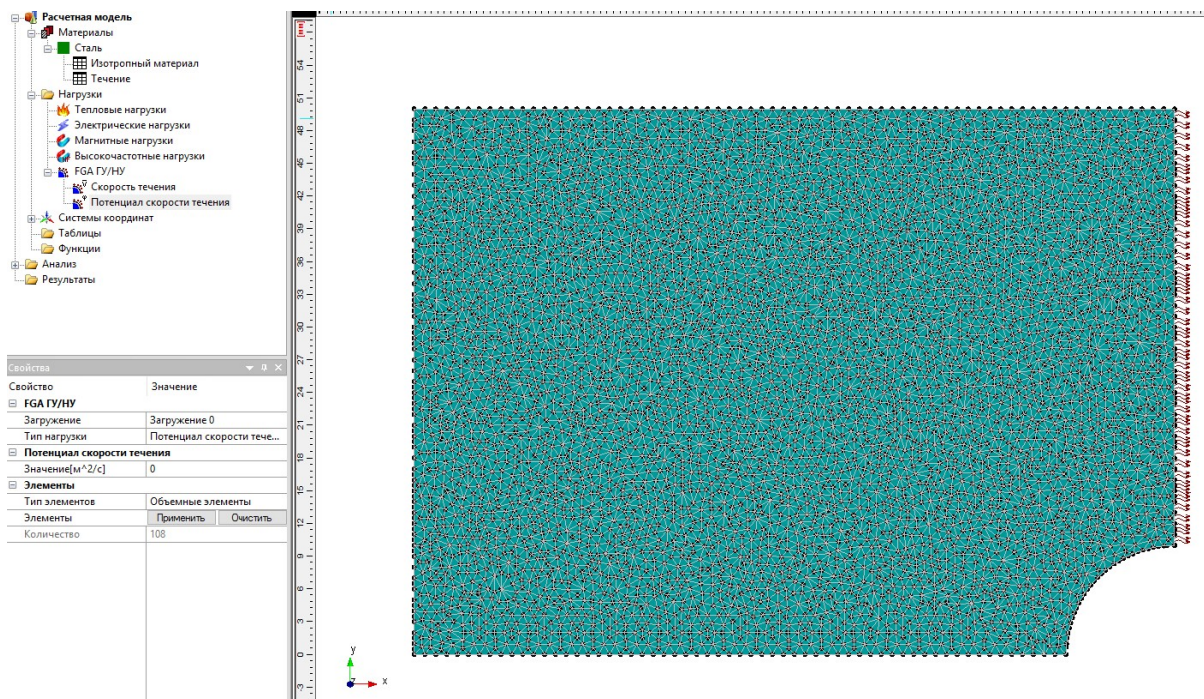


Рисунок 2 – Задание *Потенциала скорости*

### 1.3 Настройки и запуск анализа

Выбираем в дереве *Анализ / FGA* и команду *Анализ потенциальных течений* из контекстного меню.

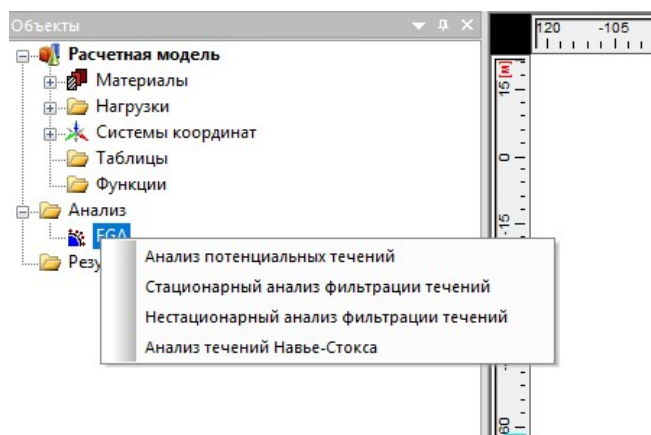


Рисунок 3 – Выбор типа анализа в APM Structure3D

В панели *Свойства* в строке *Запуск анализа* нажимаем кнопку *СТАРТ!*.

После это появляется *FGA Монитор* процесса расчета. Он содержит различную информацию о задаче и ходе процесса решения.

## 1.4 Анализ полученных результатов

Для просмотра карт результатов выбираем команду в меню *Результаты / Карта результатов*. В появившемся диалоговом окне *Параметры вывода результатов* выбираем необходимый *тип результатов*. В нашем случае это *Давление* и *Скорость*.



Рисунок 4 – Поле давлений



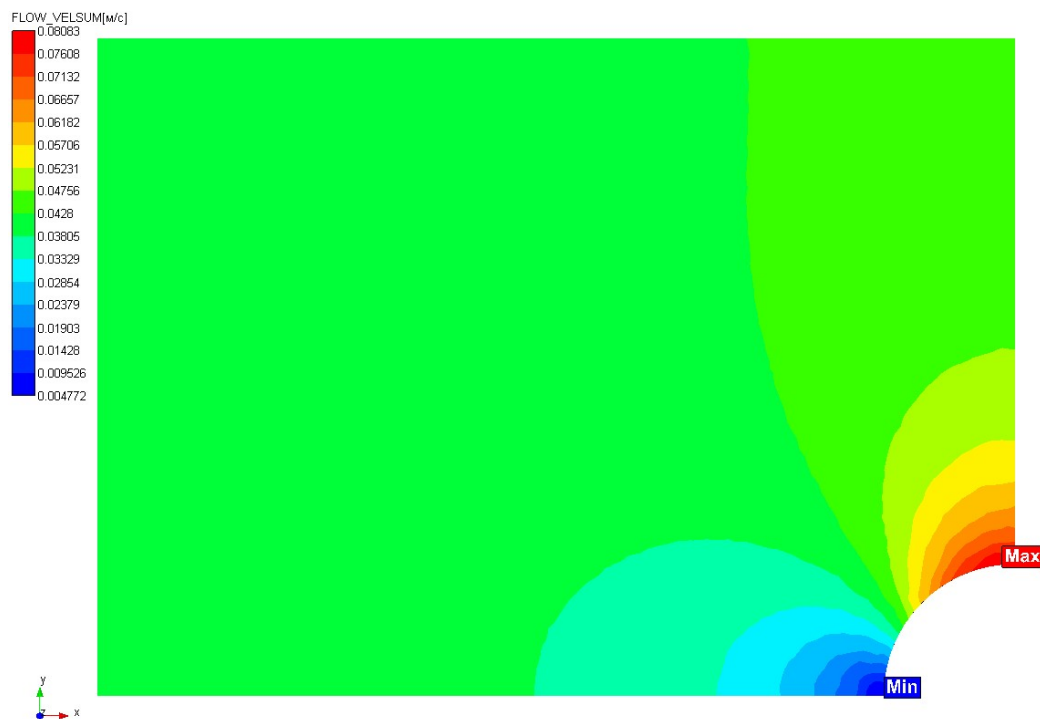



Рисунок 5 – Поле скоростей

## 2 Стационарный анализ фильтрации течений

Рассмотрим задачу течений грунтовых вод под плотиной шириной 50 метров с заглублением в грунт на 30 метров. Уровень воды в реке перед плотиной и за ней 30 метров и 1 метр соответственно. Грунт под плотиной из мелкозернистого песка (проницаемость песка равна  $5.787e-5$  м/с). Фильтрации сквозь тело плотины не осуществляется. Требуется получить поля давлений и скоростей фильтрации грунтовых вод.

### 2.1 Задание свойств течения

Для задания свойств выбираем команду *Материалы*  на панели инструментов. В появившемся диалоговом окне выбираем команду *Изменить / Дополнительные свойства*. В появившемся диалоге *Дополнительные свойства материала* задаем *Плотность* воды равную 1000 кг/м<sup>3</sup>, *Проницаемость среды* по всем осям равной  $5.787e-5$  м/с.

Закрываем все диалоговые окна по кнопке *ОК* до диалога *Материал* и выбираем команду *Задать всем*.

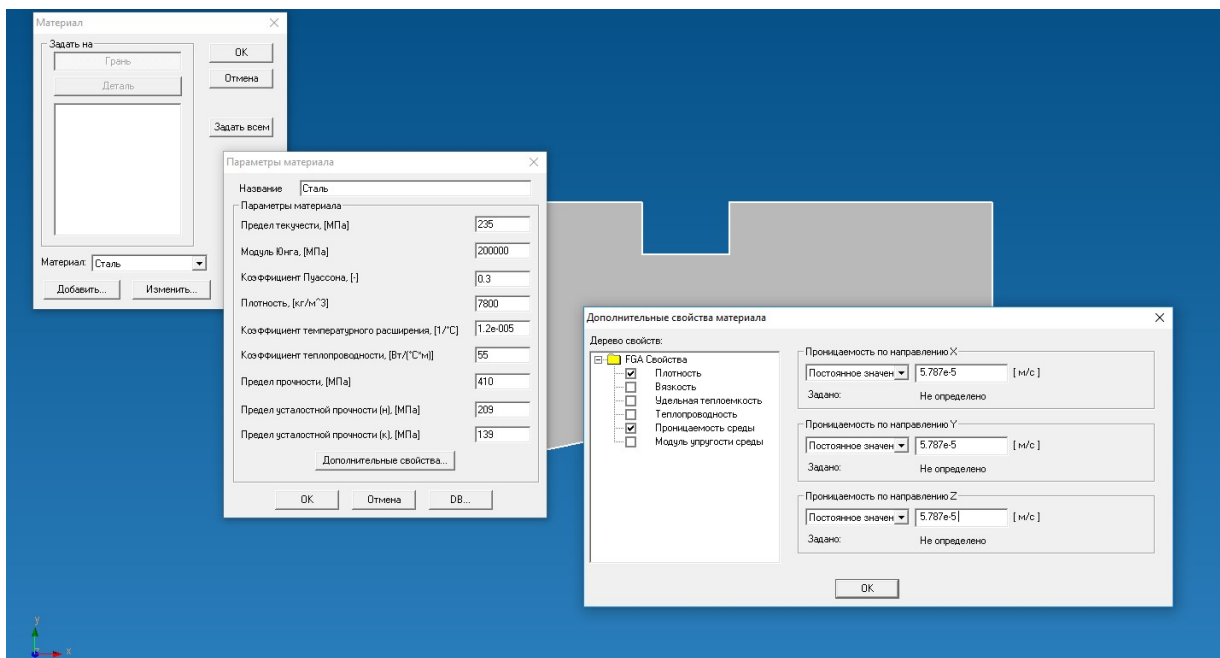


Рисунок 6 – Задание свойств течения

## 2.2 Задание граничных условий

Граничными условиями данной задачи являются давления перед и за плотиной. Для задания давления перед плотиной нажимаем кнопку *Давление течения* . Выбираем грань, на которую будет задано давление, и задаем *постоянное значение* равное  $2,943e+5$  Па.

Аналогично задается *давление* за плотиной равное  $9810$  Па.

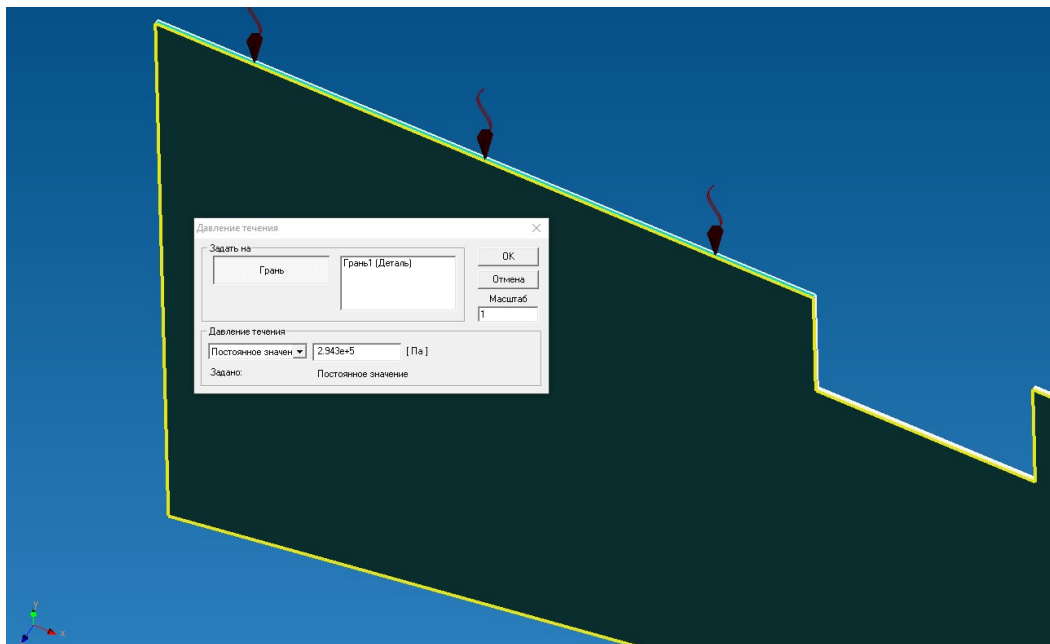


Рисунок 7 – Задание давления

## 2.3 Создание конечно-элементной сетки

После задания свойств и граничных условий необходимо создать КЭ сетку на основе имеющейся геометрии. Для этого выбираем на панели инструментов *Управление* команду *КЭ сетка* . После нажатия откроется диалог *Параметры разбиения твердотельной модели*, в котором необходимо настроить следующие параметры создания КЭ сетки:

- *Алгоритм разбиения на объемные элементы* – *Автовыбор*.
- *Тип объемных элементов* – *4х узловые тетраэдры*.
- *Максимальная длина стороны элемента* – *2000*.
- *Максимальный коэффициент сгущения на поверхности* – *1*.
- *Коэффициент разрежения в объеме* – *1*.

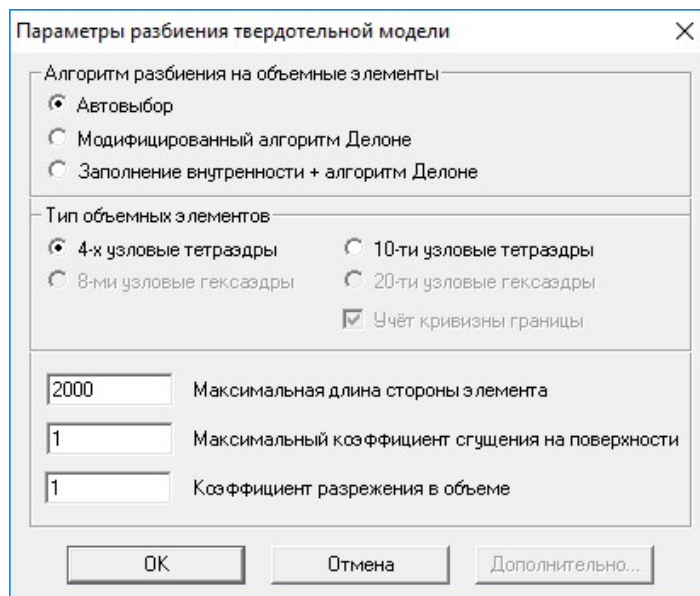


Рисунок 8 – Диалог *Параметры разбиения твердотельной модели*

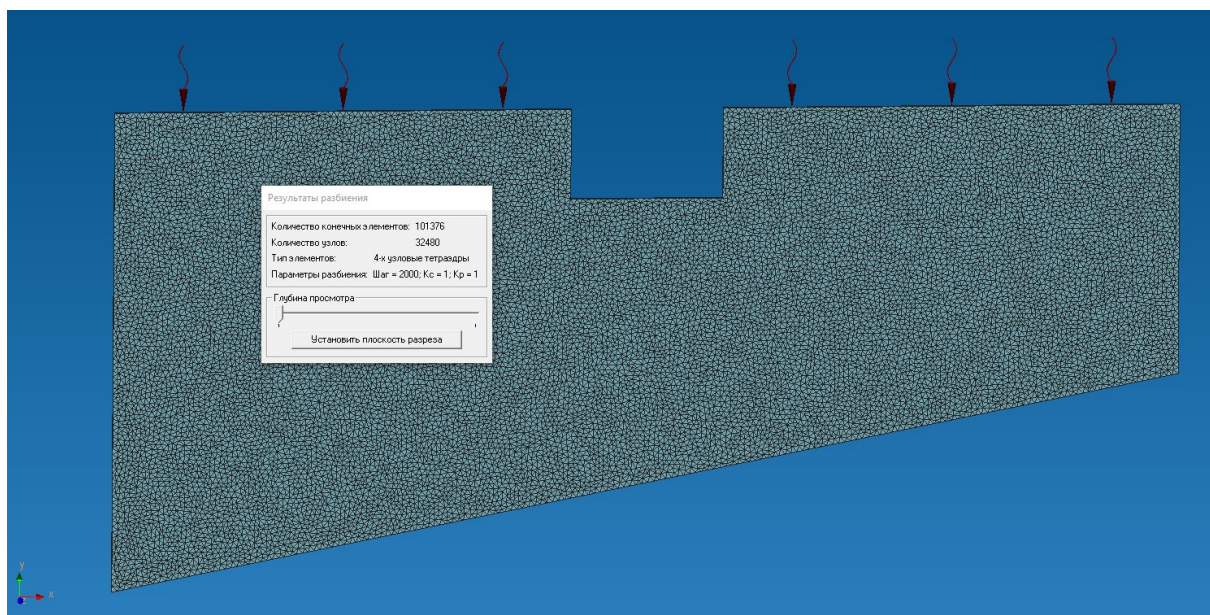


Рисунок 9 – *КЭ сетка* и результаты разбиения

## 2.4 Настройки и запуск анализа

Для запуска анализа выбираем команду *FGA / Расчет...* В появившемся диалоговом окне выбираем *Стационарный анализ фильтрации течений* и нажимаем *OK*. После это появится *FGA Монитор* процесса расчета.

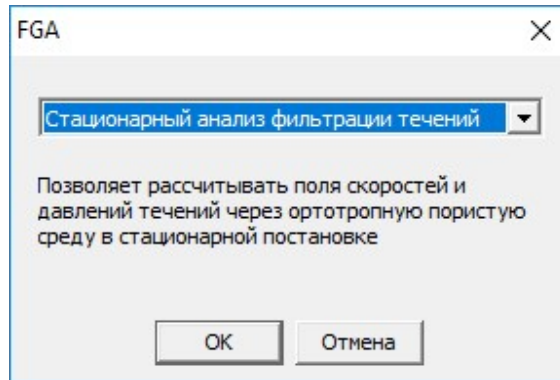


Рисунок 10 – Диалоговое окно запуска анализа

## 2.5 Анализ полученных результатов

Для просмотра карт результатов выбираем команду в меню *Результаты / Карта результатов*. В появившемся диалоговом окне *Параметры вывода результатов* выбираем необходимый *тип результатов*. В нашем случае это *Скорость* и *Давление*.

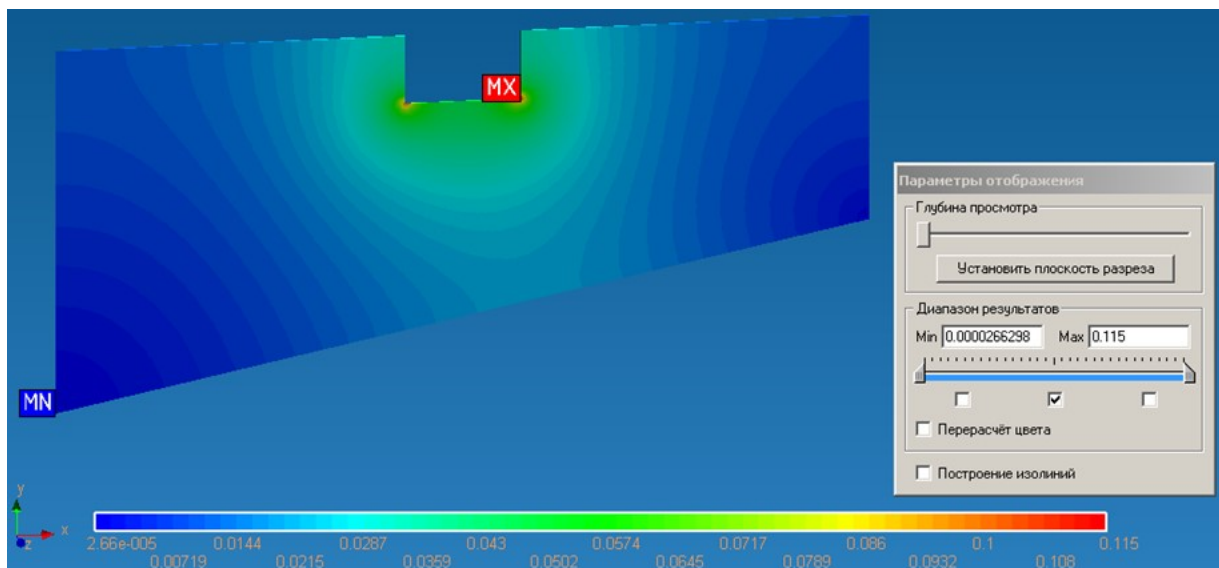


Рисунок 11 – Поля скоростей

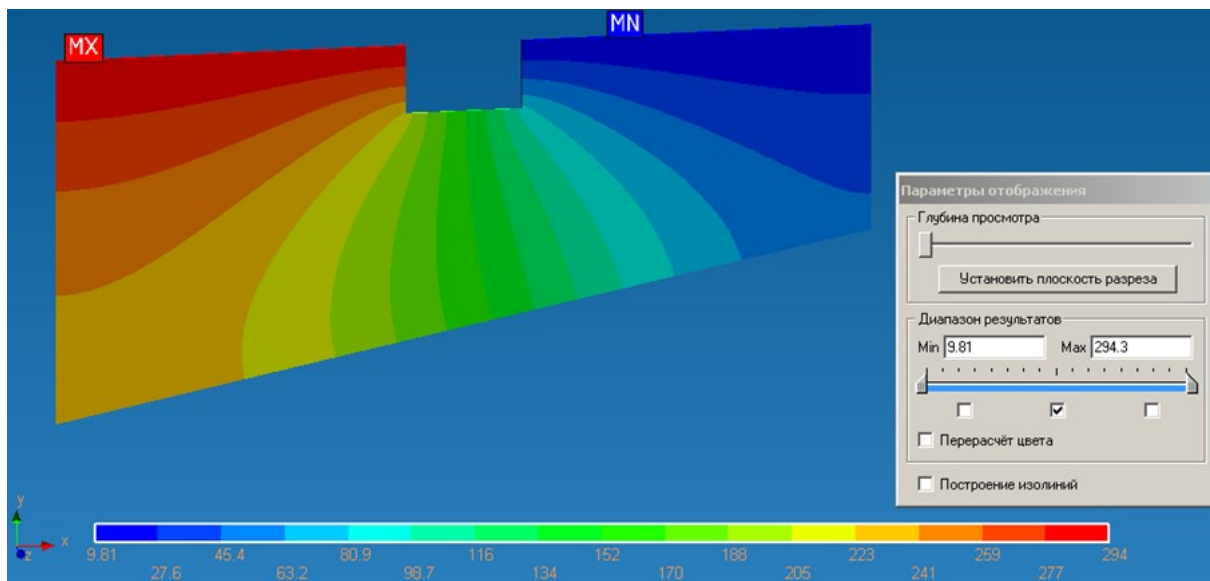


Рисунок 12 – Поля давлений

## **3 Нестационарный анализ фильтрации течений**

---

Рассмотрим предыдущую задачу с плотиной в нестационарной постановке. В частности при такой постановке задачи мы сможем определить время, переходного процесса после которого процесс фильтрации будет происходить в установившемся режиме.

### **3.1 Создание геометрии и конечно-элементной сетки**

После создания геометрии и конечно-элементной сетки передаем ее в APM Structure3D. Для этого необходимо выбрать команду *Файл / Передать КЭ сетку в APM Structure3D*. Или сохраняем сетку в формате APM Structure3D, для этого необходимо выбрать команду *Файл / Сохранить КЭ сетку...* и открываем созданный файл в APM Structure3D. После открытия файла дальнейшая работа происходит только в дереве программы (две панели инструментов *Объекты, Свойства*).

### **3.2 Задание свойств течения**

Для задания свойств течений и сред течений выбираем в дереве *Материал / Сталь* и команду *Редактировать...* из контекстного меню. В появившемся диалоговом окне выбираем из *доступных свойств материала – Течение* и нажимаем кнопку *Изменить*. В появившемся диалоге *Дополнительные свойства материала* задаем *Плотность* воды равную  $1000 \text{ кг/м}^3$ , *Проницаемость среды* по всем осям равную  $5.787e-5 \text{ м/с}$ , *Модуль упругости среды* равный  $5e+7 \text{ Па}$ . Выбираем в дереве *Материал / Сталь* и команду *Задать всем* из контекстного меню.

### **3.3 Задание граничных условий**

Граничными условиями задачи являются давления перед и за плотиной. Для задания давления перед плотиной выбираем в дереве *Нагрузки / FGA ГУ/НУ* команду *Давление* из контекстного меню. Выделяем объемные элементы, на поверхности которых будет задано давление. Для определения поверхности объемного элемента необходимо выделить еще и узлы

объемного элемента, описывающие нудную поверхность. На панели *Свойства* в строке *Значение [Па]* вводим значение давления –  $2.943e+5$ . Затем в строке *Элементы* нажимаем кнопку *Применить*. После этого в строке *Количество* отобразится количество объемных элементов, на которые задана нагрузка. В данном случае это *150 элементов*.

Аналогично задаем давление за плотиной. На панели *Свойства* в строке *Значения [Па]* вводим значение давления –  $9810$ .

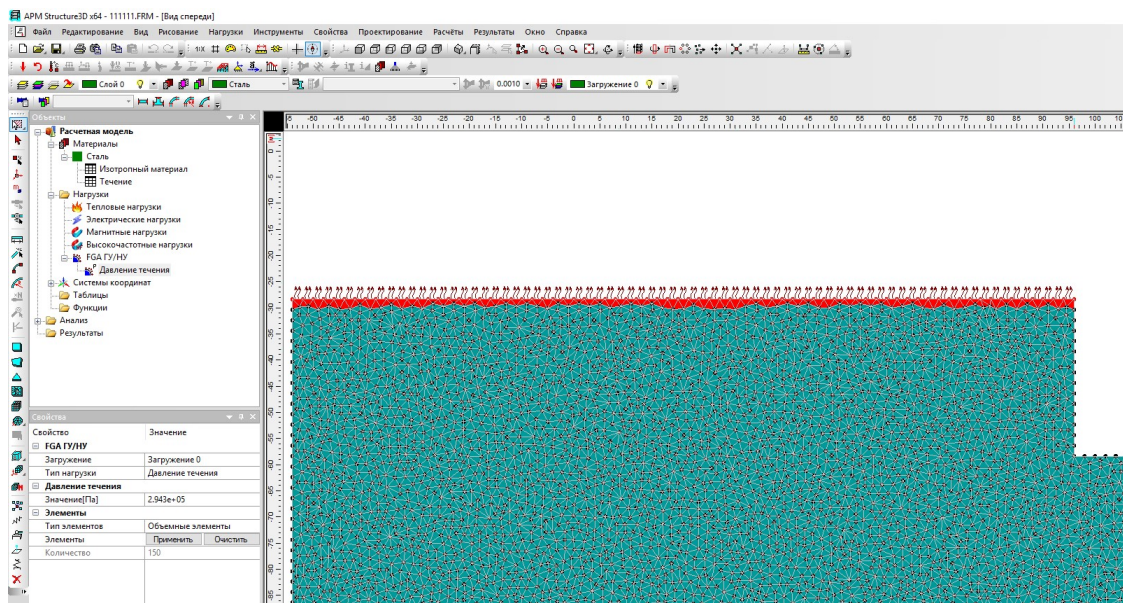


Рисунок 13 – Задание давления

### 3.4 Настройки и запуск анализа

Для этого выбираем в дереве *Анализ / FGA* и команду *Нестационарный анализ фильтрации течений* из контекстного меню.

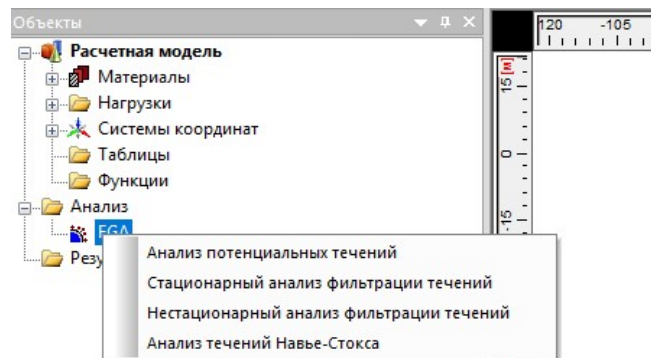


Рисунок 14 – Выбор типа расчета в APM Structure3D



На панели *Свойства* в строке *Параметры анализа* нажимаем кнопку *Редактировать*. В открывшемся диалоговом окне *Параметры расчета* выбираем вкладку *Нестационарные опции*. Для данной задачи требуется определить на какой день установиться процесс фильтрации. Для этого проанализируем первые 10 дней (864000 с.) фильтрации воды под плотиной. При этом *Полное время процесса* составит 864000 с. *Число расчетных моментов времени* равно 10, что соответствует количеству дней фильтрации. *Коэффициент релаксации по времени* оставляем без изменения равным 1.

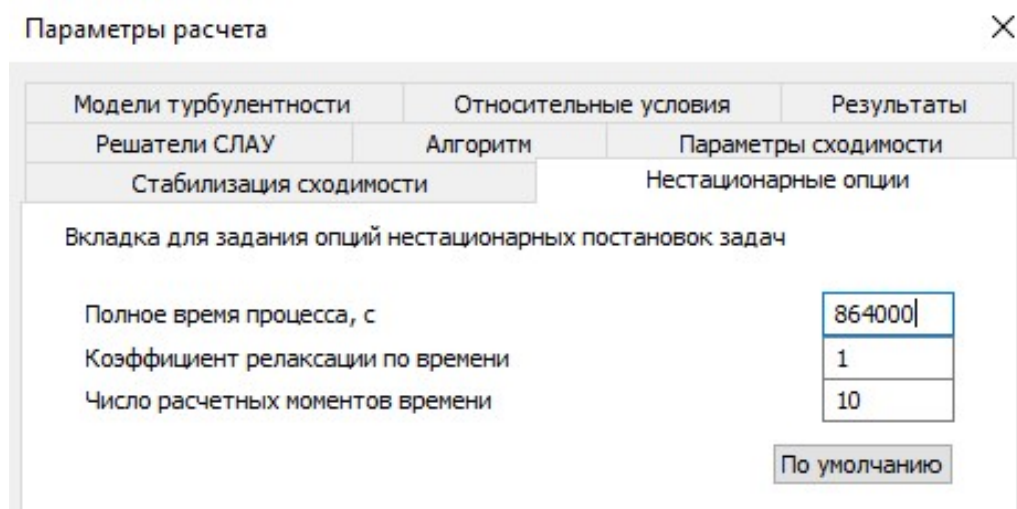


Рисунок 15 – Диалог *Параметры расчета*  
(вкладка *Нестационарные опции*)

На панели *Свойства* в строке *Запуск анализа* нажимаем кнопку *СТАРТ!*. После это появится *FGA Монитор* процесса расчета.

### 3.5 Анализ полученных результатов

Для просмотра карт результатов выбираем команду в меню *Результаты / Карта результатов*. В появившемся диалоговом окне *Параметры вывода результатов* выбираем необходимый *тип результатов* и *шаг*. В нашем случае это *Давление* и *Скорость*.

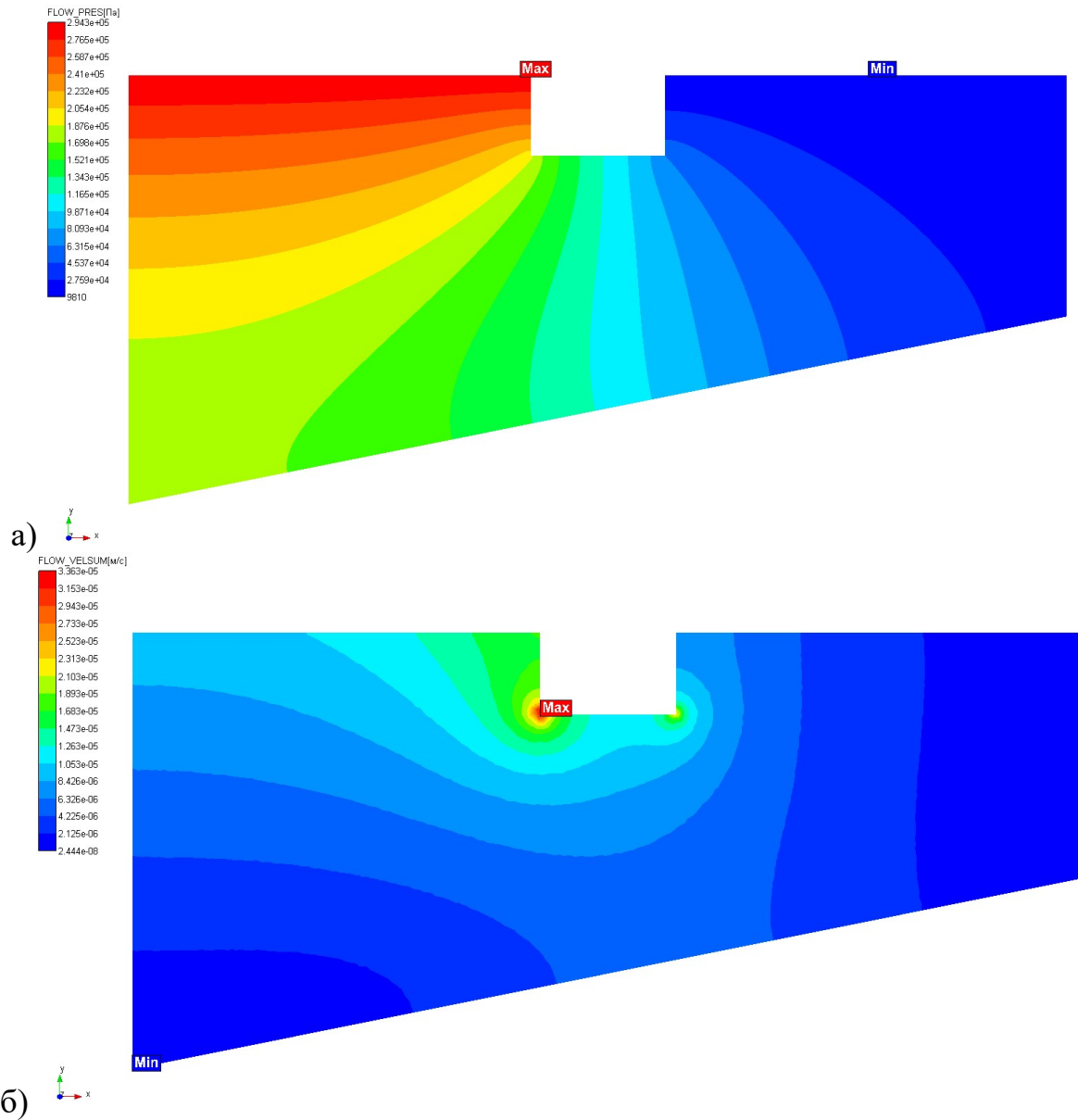


Рисунок 16 – Карта полей течений на первый день:  
 а) давлений, б) скоростей

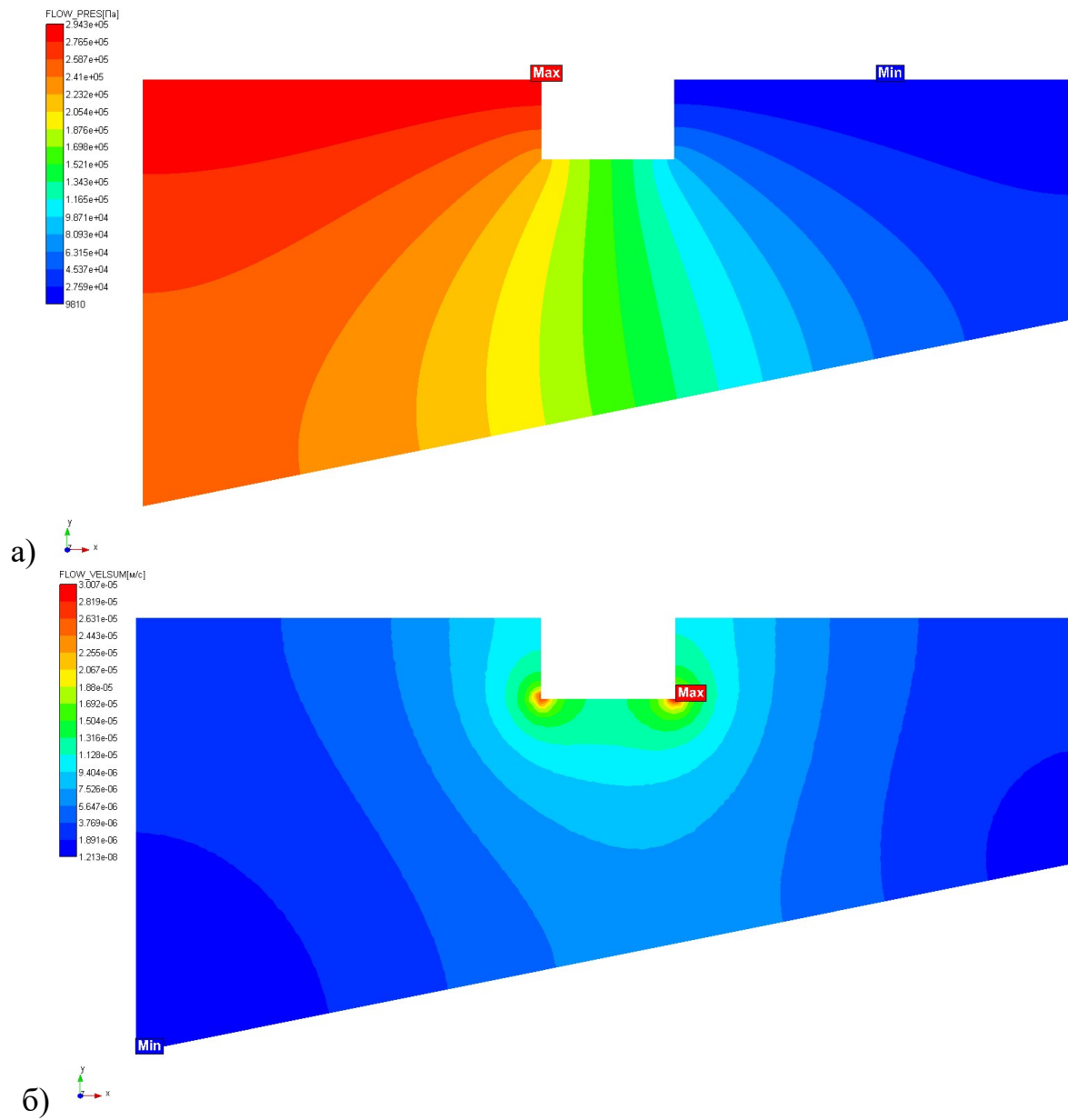


Рисунок 17 – Карта полей течений на третий день:  
а) давлений, б) скоростей

## 4 Турбулентное обтекание здания воздушным потоком

---

Рассмотрим турбулентное обтекание здания воздушным потоком. Скорость ветра на высоте *10 метров* равна *20 м/с*. Закон изменения скорости ветра по высоте при этом  $V=20*0.425*\ln(z+1.0)$ . Требуется определить поля давлений, действующих на здание и поля скоростей воздушных масс.

### 4.1 Создание геометрии и конечно-элементной сетки

Данный этап мы рассматривать не будем. Геометрия здания и окружающего воздуха может быть создана в любом графическом редакторе. После чего на основе геометрии может быть создана *конечно-элементная сетка* в модуле APM Studio, которая впоследствии будет экспортирована в модуль APM Structure3D. После открытия файла дальнейшая работа происходит только в дереве программы (две панели инструментов *Объекты*, *Свойства*).

### 4.2 Задание свойств течения

Для этого выбираем в дереве *Материал / air* и команду *Редактировать...* из контекстного меню. В появившемся диалоговом окне выбираем из *доступных свойств материала* – *Течение* и нажимаем кнопку *Изменить*. Открывается диалог *Дополнительные свойства материала*, в котором задаем *Плотность* воздуха равную *1.3 кг/м<sup>3</sup>*, *Вязкость* воздуха равную *2e-05 Па\*с*.

Закрываем все диалоговые окна и выбираем в дереве *Материал / air* команду *Задать всем* из контекстного меню.

### 4.3 Задание граничных условий

В данной постановке задачи нужно задать несколько граничных условий.

*Условие слипания* на стенках здания и на уровне земли. Данное граничное условие задается на все поверхности всех элементов здания и на поверхности

соответствующие уровню земли. При этом все компоненты скорости должны быть равны 0.

Скорость ветра на удалении от здания (на входе) должна быть задана в соответствии с аппроксимацией по высоте  $V=20*0.425*\ln(z+1.0)$ .

Давление на свободных поверхностях. Здание находится на открытой местности, которое не ограничено рассматриваемым параллелепипедом, поэтому на свободных поверхностях параллелепипеда задаем давление равное 0.

Для задания условий слипания на элементах здания и поверхности земли выбираем в дереве *Нагрузки / FGA ГУ/НУ* команду *Скорость* из контекстного меню. Выделяем объемные элементы, на поверхности которых будет задана скорость. На панели *Свойства* в строках *Скорость X [м/с]*, *Скорость Y [м/с]* и *Скорость Z [м/с]* вводим значение равное 0. Затем в строке *Элементы* нажимаем кнопку *Применить*. После этого в строке *Количество* отобразится количество объемных элементов, на которые задано граничное условие. В данном случае это 170211 элементов.

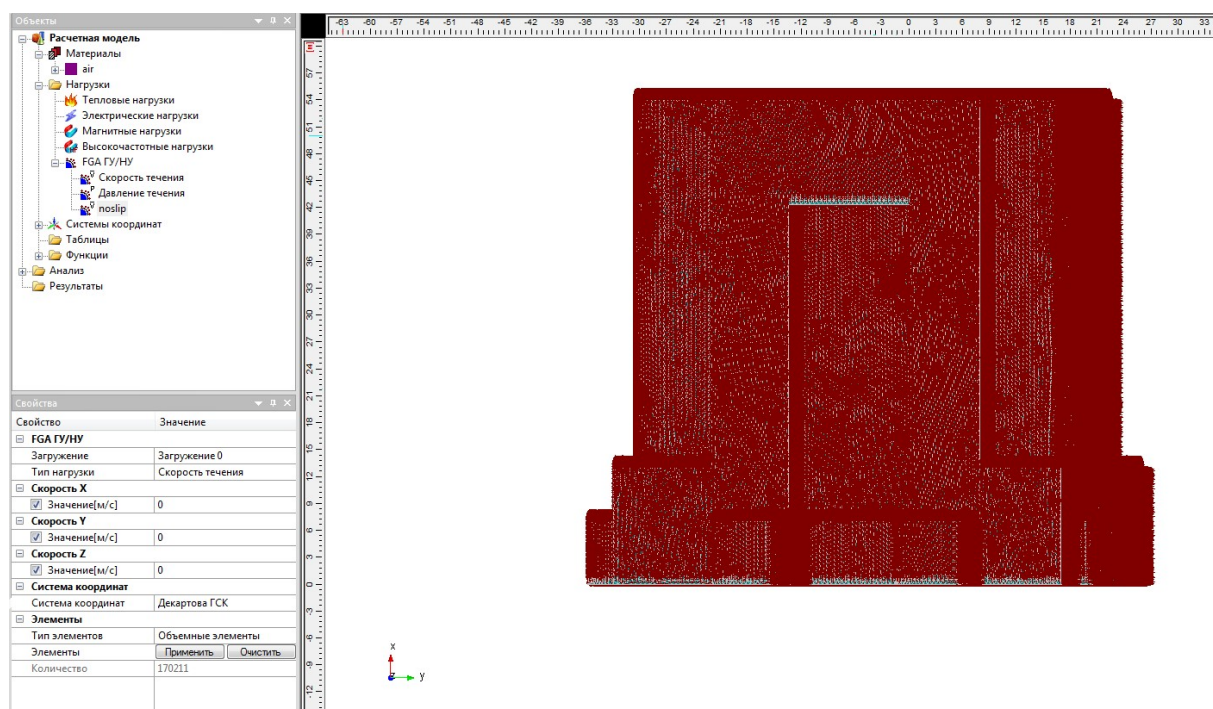


Рисунок 18 – Задание условия слипания на поверхности здания

Для задания *Скорости* ветра на удалении от здания выбираем в дереве *Нагрузки / FGA ГУ/НУ* команду *Скорость* из контекстного меню. Выделяем объемные элементы, на поверхности которых будет задана скорость. На панели *Свойства* в строках *Скорость X [м/с]* и *Скорость Z [м/с]* вводим

значение равно  $0$ . В строке Скорость  $Y$  [м/с] в выпадающем меню выбираем функцию. В появившемся диалоге *Выражения* вводим функцию изменения скорости от глобальной координаты  $X$ . Название функции при этом - *vel*. Затем в строке *Элементы* нажимаем кнопку *Применить*. После этого в строке *Количество* отобразится количество объемных элементов, на которые задано граничное условие. В данном случае это *592 элемента*.

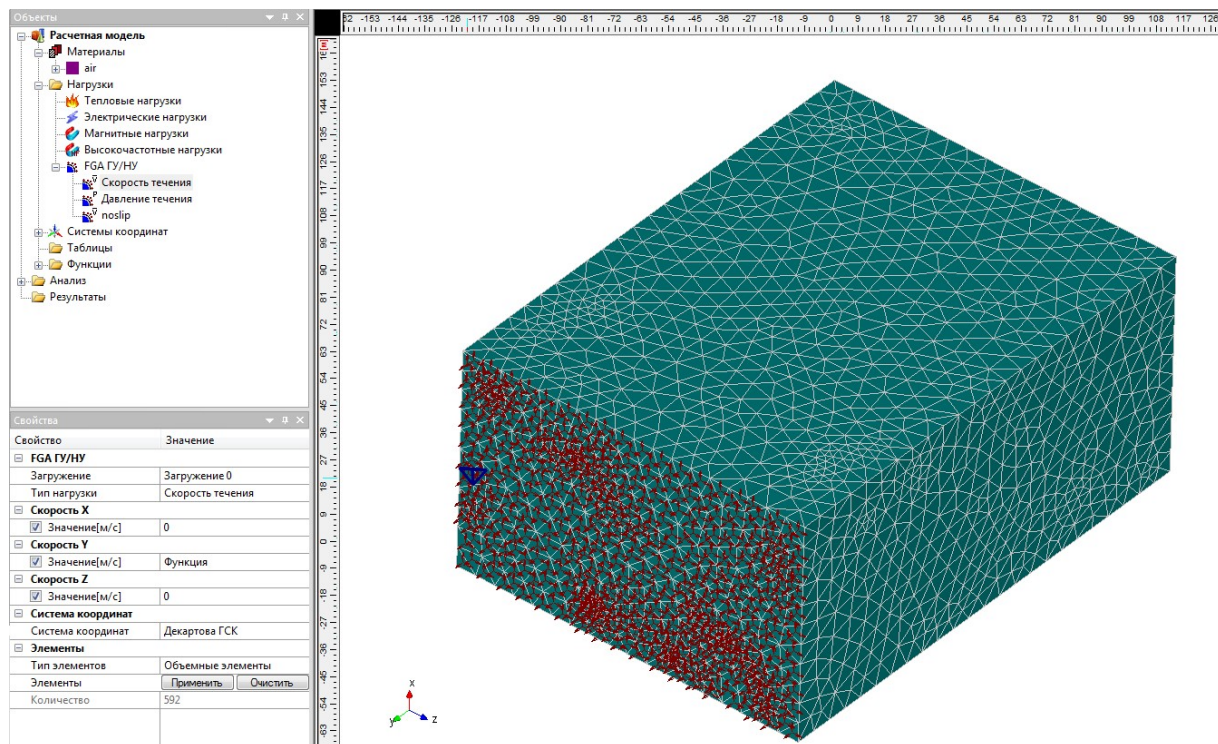


Рисунок 19 – Задание скорости в глобальной системе координат

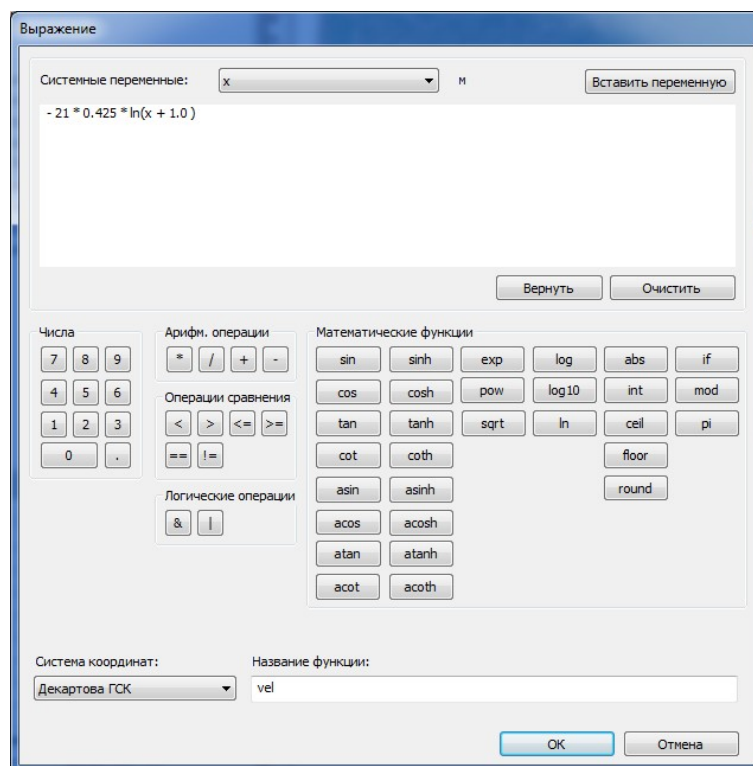


Рисунок 20 – Задание функции скорости в глобальной системе координат

Для задания давления на оставшихся свободных поверхностях выбираем в дереве *Нагрузки / FGA ГУ/НУ* команду *Давление* из контекстного меню. Выделяем объемные элементы, на поверхности которых будет задано давление. На панели *Свойства* в строке *Значения [Па]* вводим значение давления –  $2.943e+5$ . Затем в строке *Элементы* нажимаем кнопку *Применить*. После этого в строке *Количество* отобразится количество объемных элементов, на которые задано граничное условие. В данном случае это 2974 элемента.

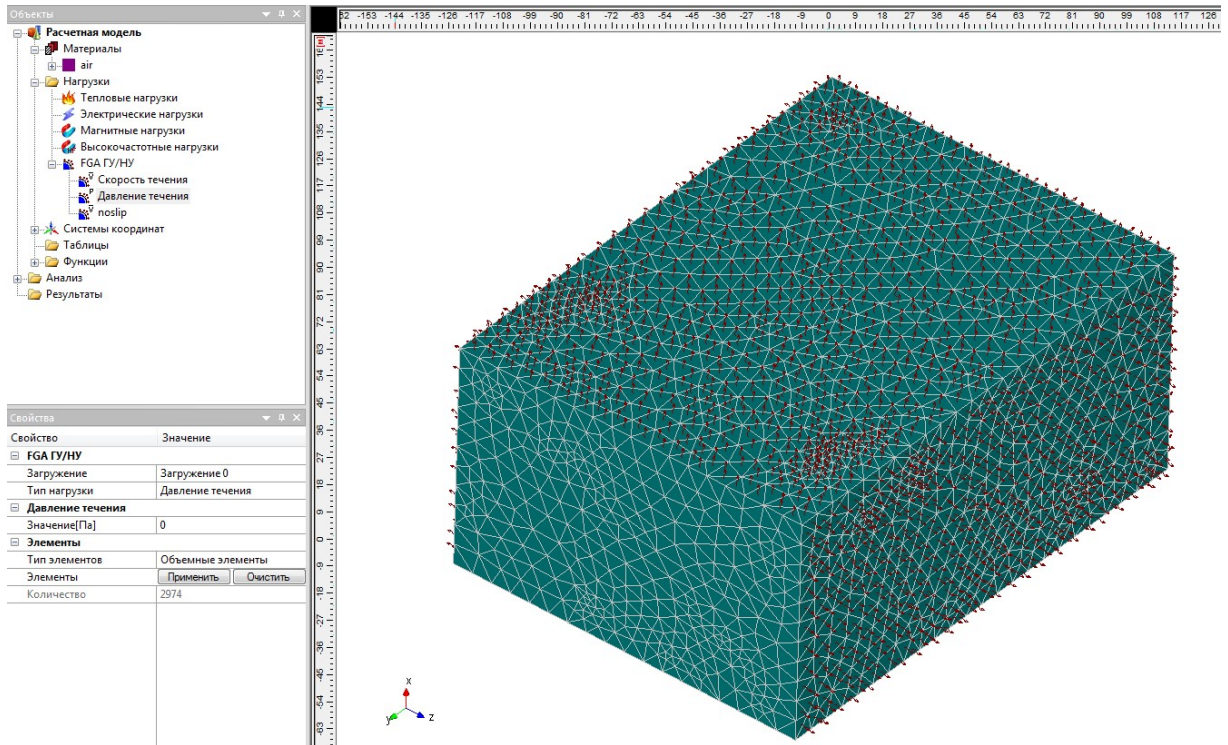


Рисунок 21 – Задание давления на свободной поверхности модели

#### 4.4 Параметры и запуск анализа

Для этого выбираем в дереве *Анализ / FGA* команду *Анализ течений Навье-Стокса* из контекстного меню. На панели *Свойства* в строке *Параметры анализа* нажимаем кнопку *Редактировать*. В открывшемся диалоговом окне *Параметры расчета* выбираем вкладку *Алгоритм*. Для данной задачи требуется выбрать турбулентный режим течения – *TURBULENT*. Эффективная вязкость при расчете переменная.

Во вкладке *Результаты* выбираем необходимые результаты, которые дополнительно будут выводиться после расчета: *Полное давление (TOTPRES)*, *Эффективная вязкость (EFFVISC)*, *Роторы Скоростей (VELROT)*.



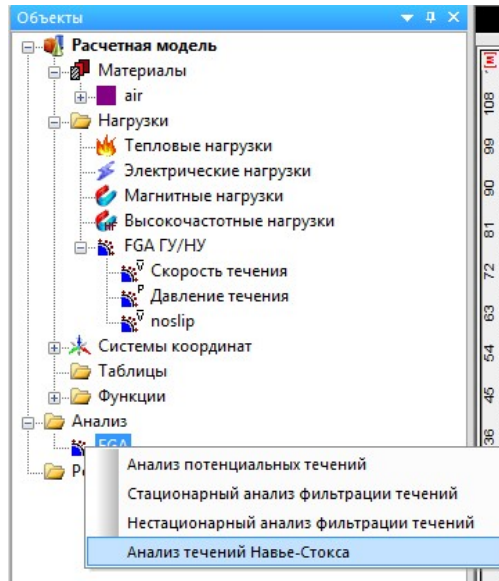


Рисунок 22 – Выбор типа анализа в APM Structure3D

Во вкладке *Параметры сходимости* устанавливаем *максимальное количество итераций* равное *3000*, а *параметры сходимости* и *область определения для степеней свободы* согласно рисунку ниже.

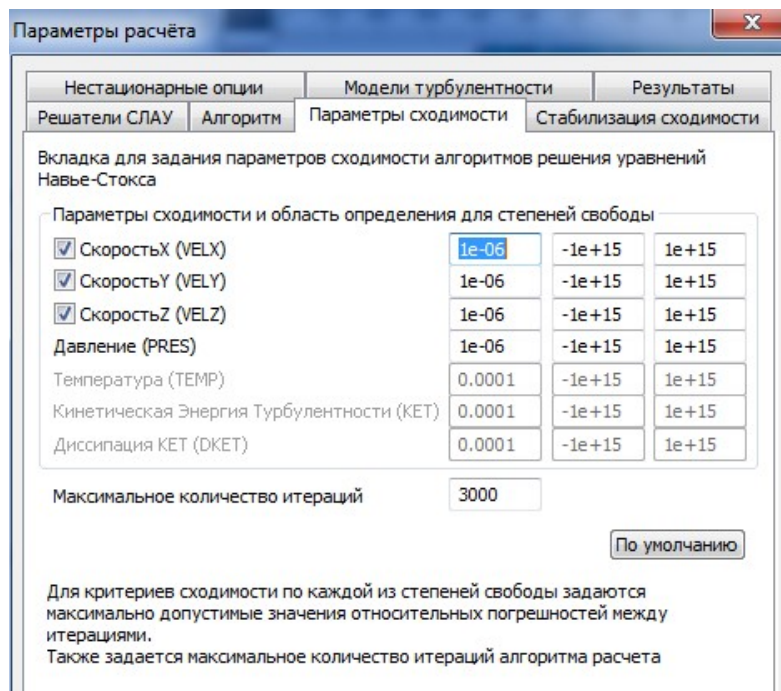


Рисунок 23 – Диалог параметры расчета (вкладка *Параметры сходимости*)

На панели *Свойства* в строке *Запуск анализа* нажимаем кнопку *СТАРТ!*. После это появляется *FGA Монитор* процесса анализа, который содержит общую информацию о задаче, а также различную информацию о ходе процесса сходимости.

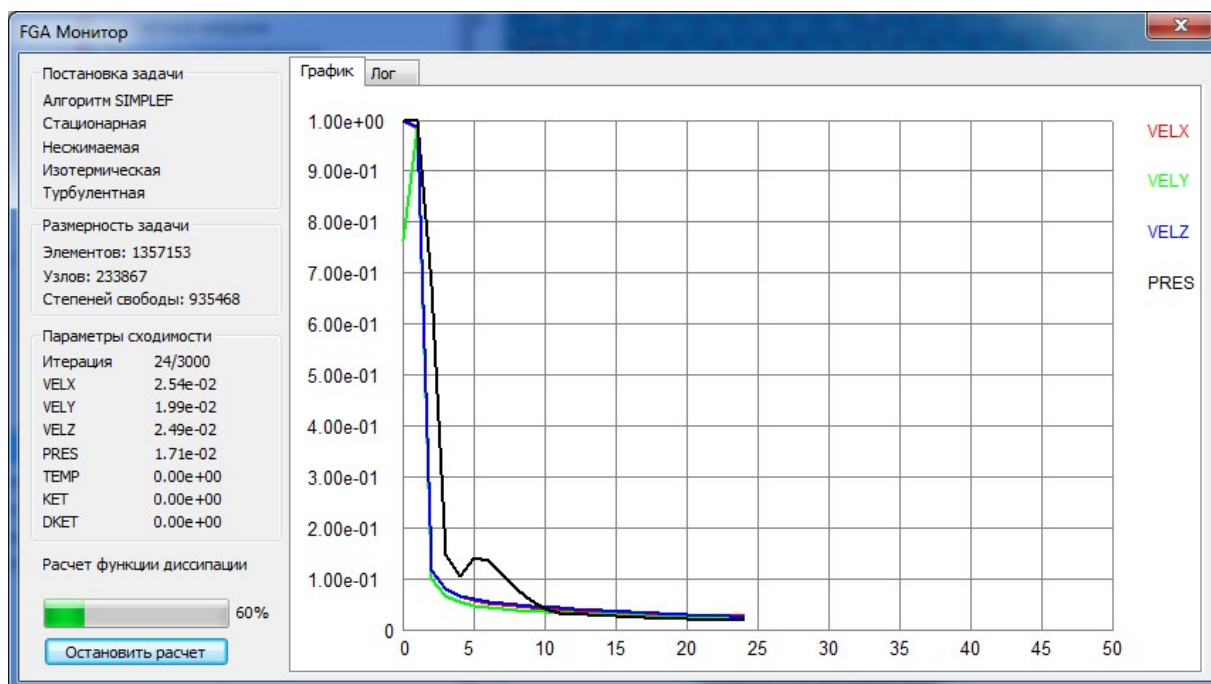


Рисунок 24 – *FGA Монитор* при анализе течения *Навье-Стокса*

## 4.5 Анализ полученных результатов

Для возможности разреза при просмотре карт результатов включаем дополнительные настройки с помощью команды *Файл / Настройки*. В появившемся диалоге *Настройки* ставим галочку напротив *Альтернативная карта результатов*. Нажимаем последовательно кнопки *Сохранить* и *ОК*.

Для просмотра карт результатов выбираем команду в меню *Результаты / Карта результатов*. В появившемся диалоговом окне *Параметры вывода результатов* выбираем необходимый *тип результатов*. В нашем случае это *Давление* и *Скорость*.

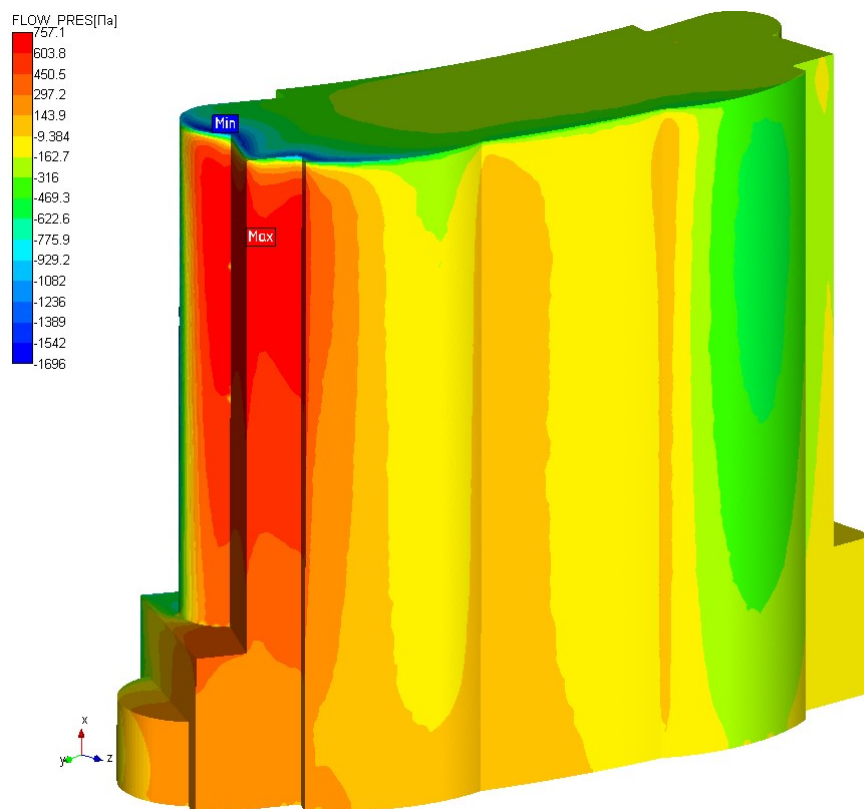


Рисунок 25 – Карта распределения давления воздушных масс на здание

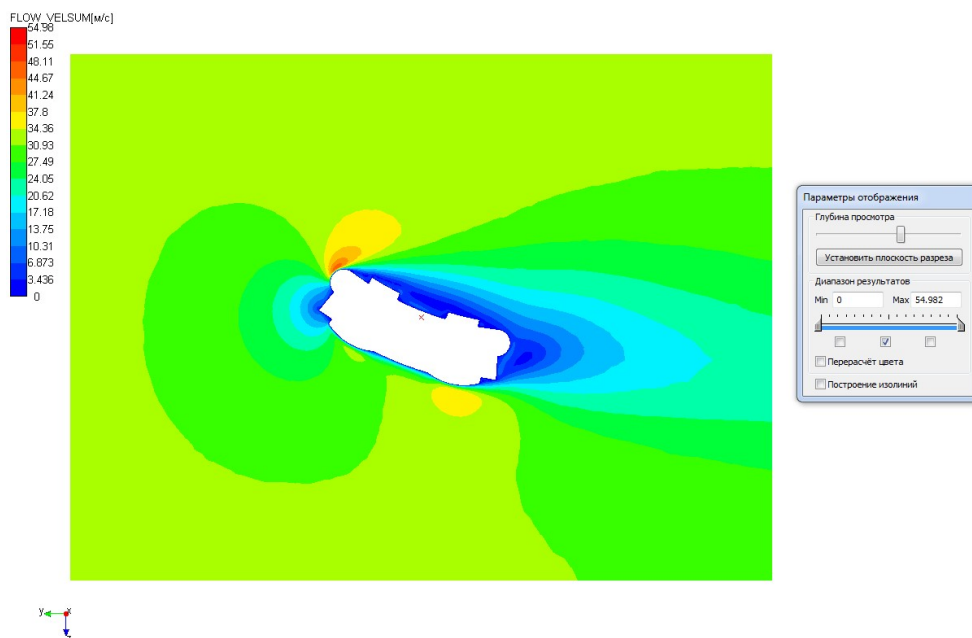


Рисунок 26 – Карта распределения скорости воздуха (разрез, вид сверху)

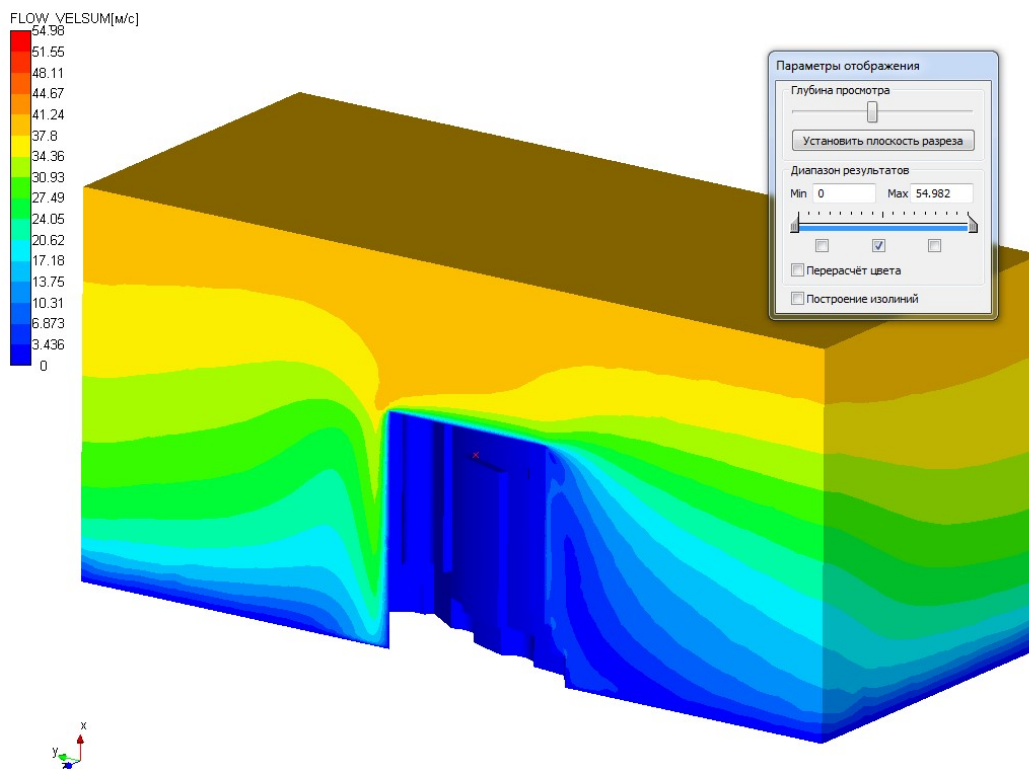


Рисунок 27 – Карта распределения скорости воздуха (разрез, вид сбоку)

## 5 Термическое турбулентное течение жидкости через диффузор

Требуется определить поля давлений, скоростей и температур при течении жидкости через диффузор

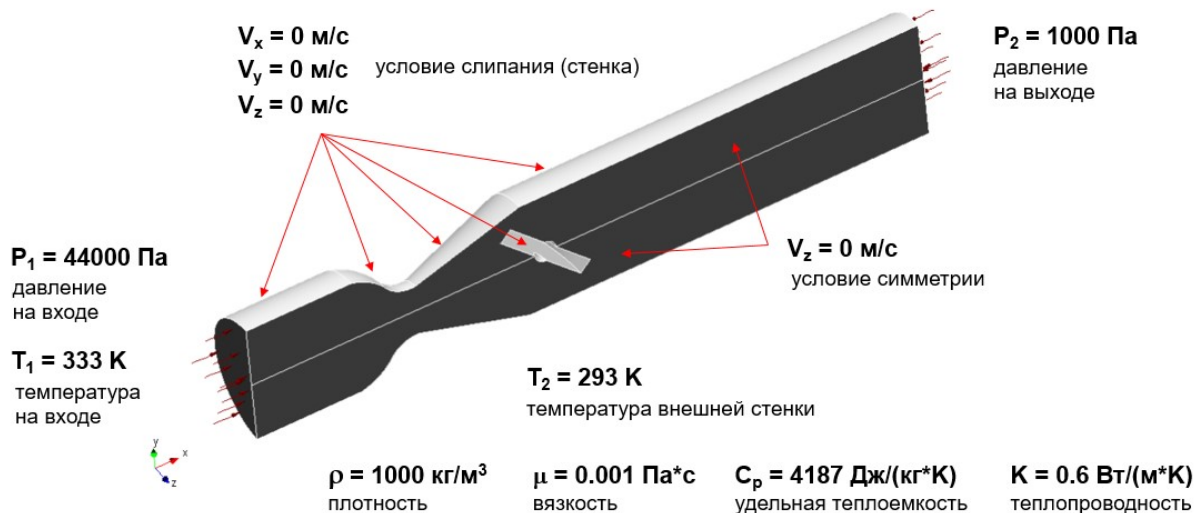


Рисунок 28 – Постановка задачи

### 5.1 Построение модели

Геометрия диффузора создается в модуле APM Studio на основе чертежа.

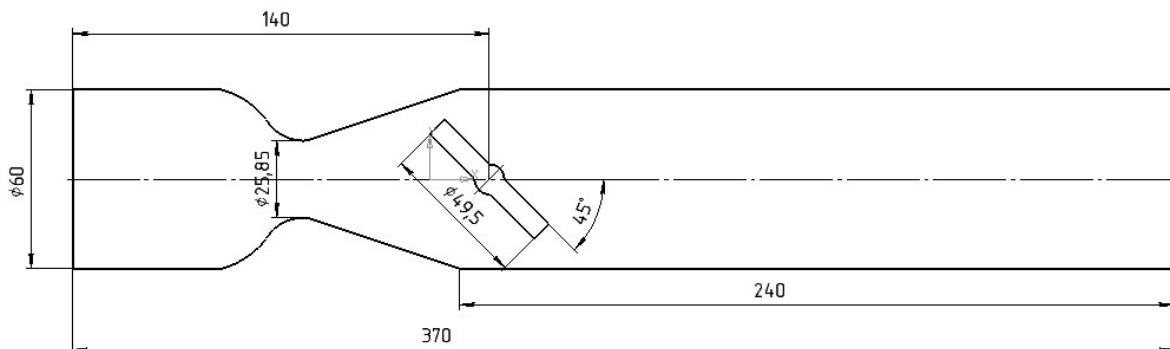


Рисунок 29 – Чертеж диффузора

Выбираем команду *Создать твердотельную модель*. Далее выбираем команду *Новый эскиз* и чертим на эскизе половину профиля диффузора и половину клапана.

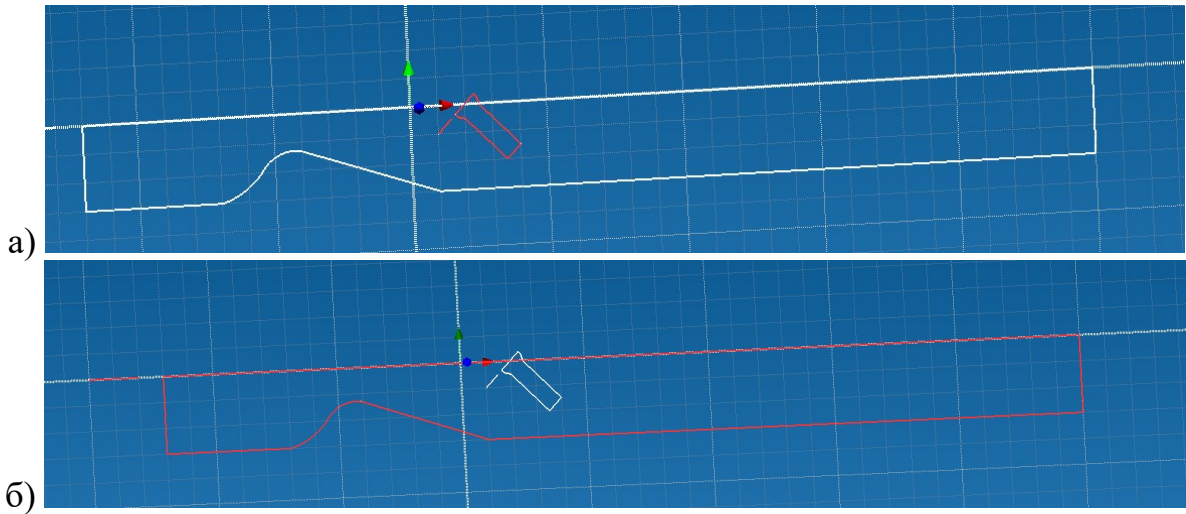


Рисунок 30 – чертеж на эскизе: а) диффузора, б) клапана

Выходим из операции построения эскиза.

Для построения трехмерной модели применяем операцию *Вращение* к профилю диффузора.

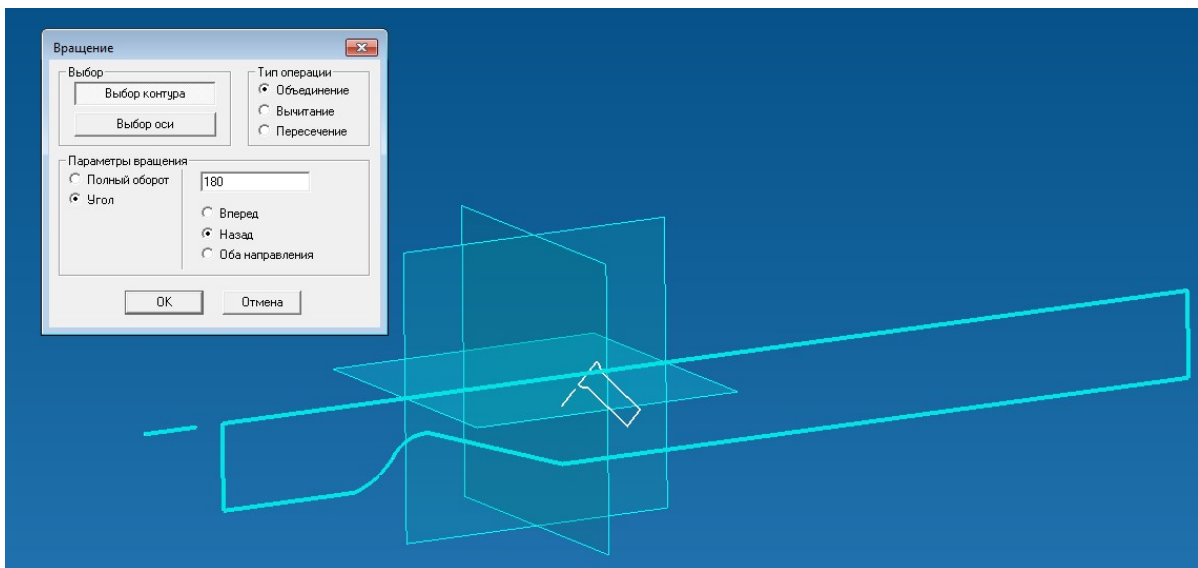


Рисунок 31 – Операция *Вращение* для профиля диффузора

Аналогичным образом операция *Вращение* применяется для клапана, тип операции – *Вычитание*.

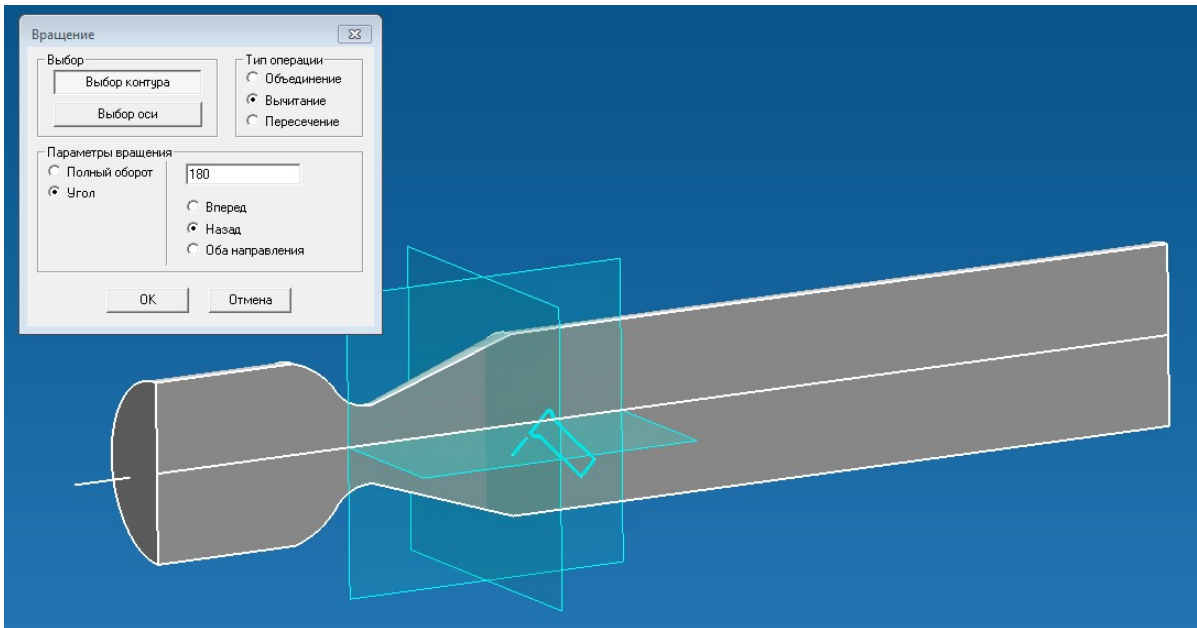



Рисунок 32 – Операция *Вращение* для профиля клапана

## 5.2 Задание свойств течения

Для этого выбираем команду *Материалы*  на панели инструментов. В появившемся диалоговом окне выбираем команду *Изменить / Дополнительные свойства*. Открывается диалог *Дополнительные свойства материала*. Задаем *Плотность* воды равную  $1000 \text{ кг/м}^3$ , *Вязкость* воды равную  $0.001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , *Удельную теплоемкость* воды равную,  $4187 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , *Теплопроводность* воды равную  $0.6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Закрываем все диалоговые окна по кнопке *ОК* до диалога *Материал*, выбираем команду *Задать всем* и закрываем данный диалог.

## 5.3 Задание граничных условий

В данной постановке задачи нужно задать несколько граничных условий.

*Условия слипания.* Данное граничное условие задается на внешние поверхности диффузора и на поверхности регулировочной задвижки. Скорость воды на данных поверхностях во все стороны должна быть равна  $0$ .


*Условия симметрии.* Данное граничное условие задается на поверхности, по которой мы отсекали часть модели. Скорость воды на данной поверхности по координате  $Z$  должна быть равна  $0$ , а остальные компоненты должны быть выключены.

*Температура на входе.* Данное граничное условие задается на поверхность входа в диффузор. Значение температуры равно  $333 \text{ К}$ .

*Температура внешней стенки диффузора.* Данное граничное условие задается на внешние поверхности диффузора. Значение температуры внешней стенки равно  $293 \text{ К}$ .

*Давление на входе.* Данное граничное условие задается на поверхность входа в диффузор. Значение давления на входе равно  $44000 \text{ Па}$ .

*Давление на выходе.* Данное граничное условие задается на поверхность выхода из диффузора. Значение давления на выходе равно  $1000 \text{ Па}$ .

Для задания *Условий слипания* выбираем на панели инструментов *ГУ/НУ* команду *Скорость* . Выделяем грани, на которые будет задано данное граничное условие. В строках *Скорость по направлению X*, *Скорость по направлению Y* и *Скорость по направлению Z* устанавливаем галочки *Использовать* и вводим значение равное  $0 \text{ [м/с]}$ .



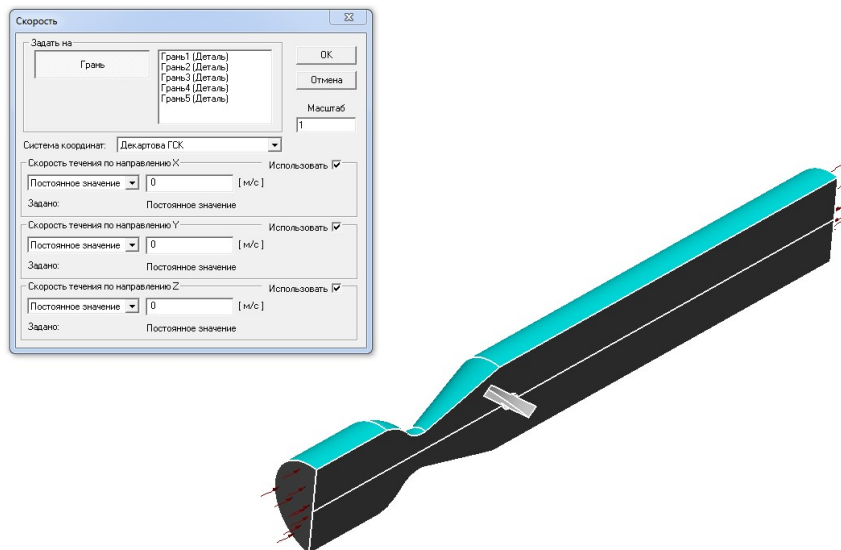


Рисунок 33 – Задание условий сลิปания на поверхности диффузора

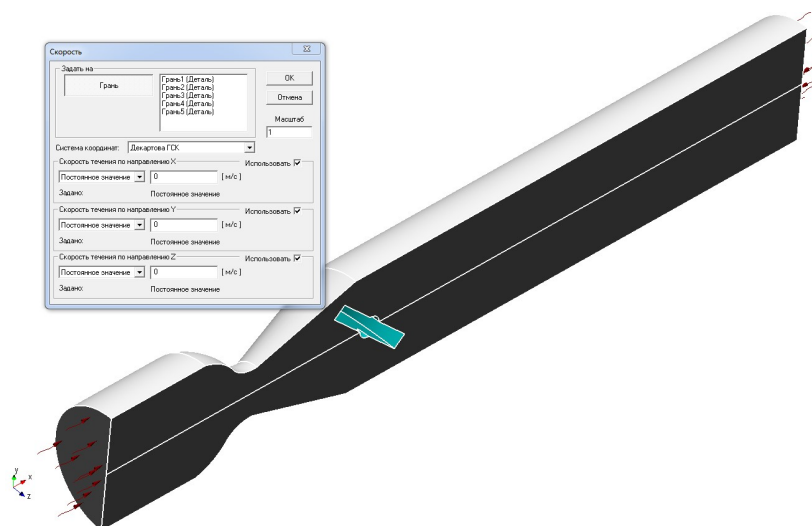



Рисунок 34 – Задание условия сลิปания на поверхности регулировочной задвижки

Для задания *Условий симметрии* выбираем на панели инструментов ГУ/НУ команду *Скорость* . Выделяем две грани, на которые будет задано данное граничное условие. В строках *Скорость по направлению X*, *Скорость по направлению Y* отключаем галочки *Использовать*, а в строке *Скорость по направлению Z* вводим значение равное  $0$  [м/с].

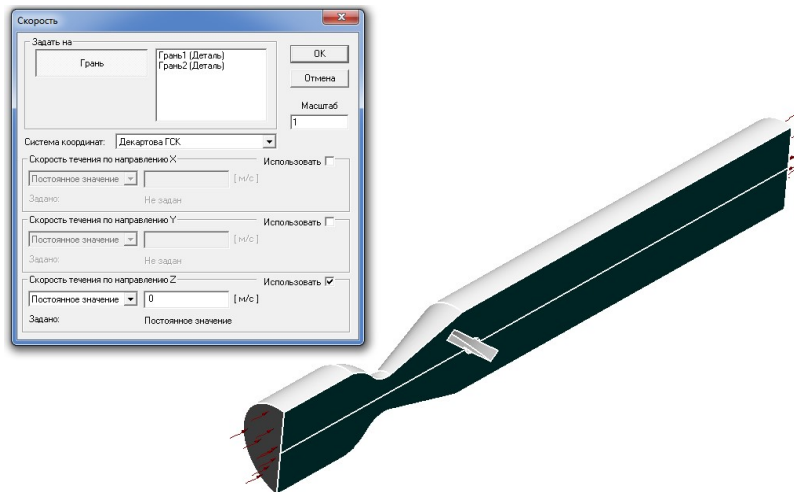



Рисунок 35 – Задание условия симметрии

Для задания *Температуры* на входе выбираем на панели инструментов ГУ/НУ команду *Температура* . Выделяем грань, на которую будет задано данное граничное условие. В блоке *Температура* оставляем *Постоянное значение* и вводим значение 333 К.

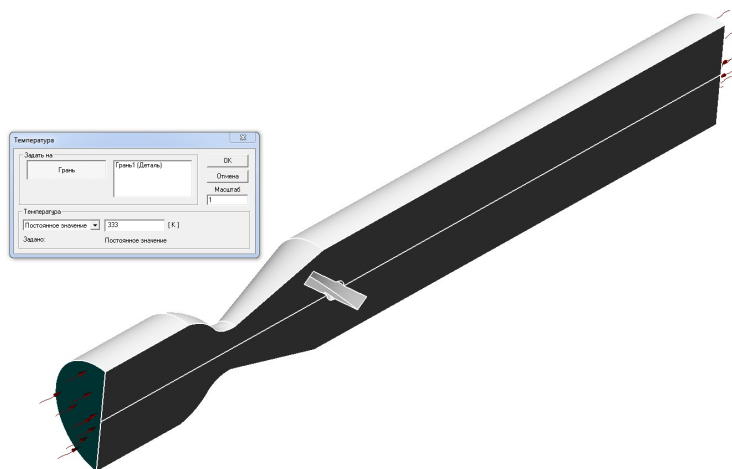



Рисунок 36 – Задание температуры на входе в диффузор

Для задания *Температуры* внешней стенки диффузора выбираем на панели инструментов ГУ/НУ команду *Температура* . Выделяем грани, на которые будет задано данное граничное условие. В блоке *Температура* оставляем *Постоянное значение* и вводим значение 293 К.

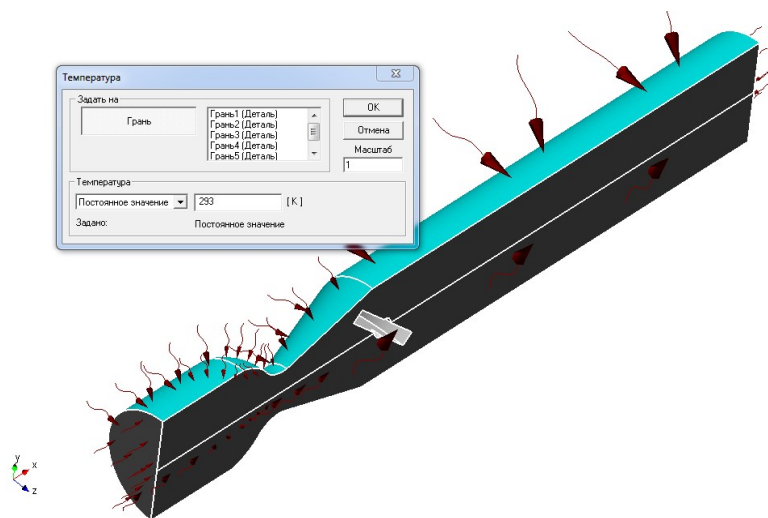



Рисунок 37 – Задание температуры на внешней стенке диффузора

Для задания *Давления* на входе выбираем на панели инструментов *ГУ/НУ* команду *Даление* . Выделяем грань, на которую будет задано данное граничное условие. В блоке *Давление* оставляем *Постоянное значение* и вводим значение *44000 Па*.

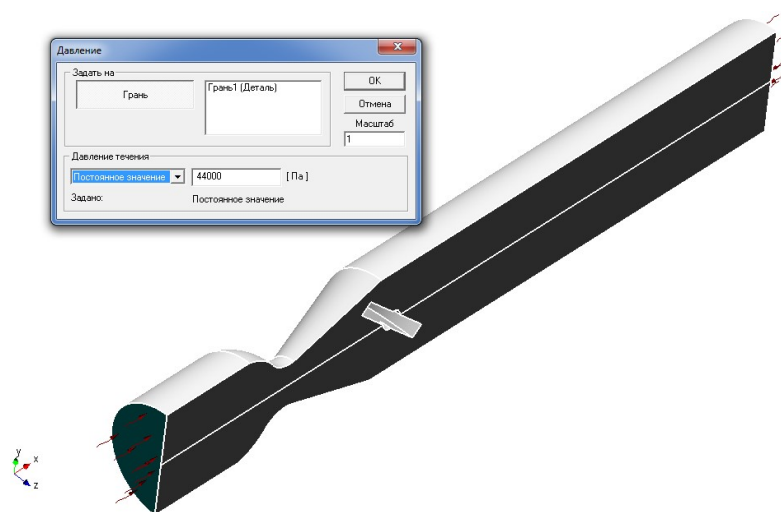



Рисунок 38 – Задание давления на входе в диффузор

Для задания *Давления* на выходе выбираем на панели инструментов *ГУ/НУ* и команду *Даление* . Выделяем грань, на которую будет задано данное граничное условие. В блоке *Давление* оставляем *Постоянное значение* и вводим значение *1000 Па*.

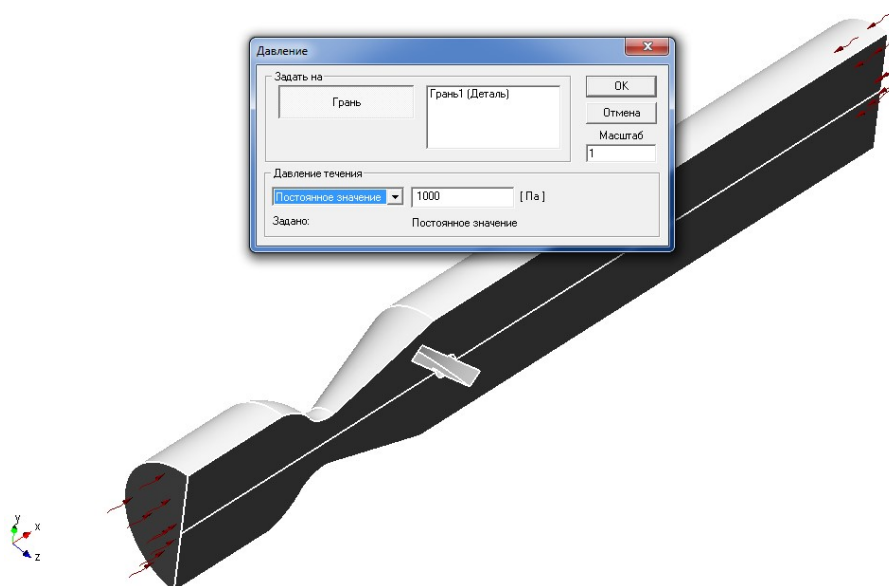



Рисунок 39 – Задание давления на выходе из диффузора

## 5.4 Создание конечно-элементной сетки

После задания свойств и граничных условий необходимо создать КЭ сетку на основе имеющейся геометрии. Для этого выбираем на панели инструментов *Управление* кнопку *КЭ сетка* . После нажатия откроется диалог *Параметры разбиения твердотельной модели*, в котором необходимо настроить следующие параметры создания КЭ сетки:

- *Алгоритм разбиения на объемные элементы – Автовыбор;*
- *Тип объемных элементов – 4-х узловые тетраэдры.*
- *Максимальная длина стороны элемента – 1 мм;*
- *Максимальный коэффициент сгущения на поверхности – 1;*
- *Коэффициент разряжения в объеме – 1.*

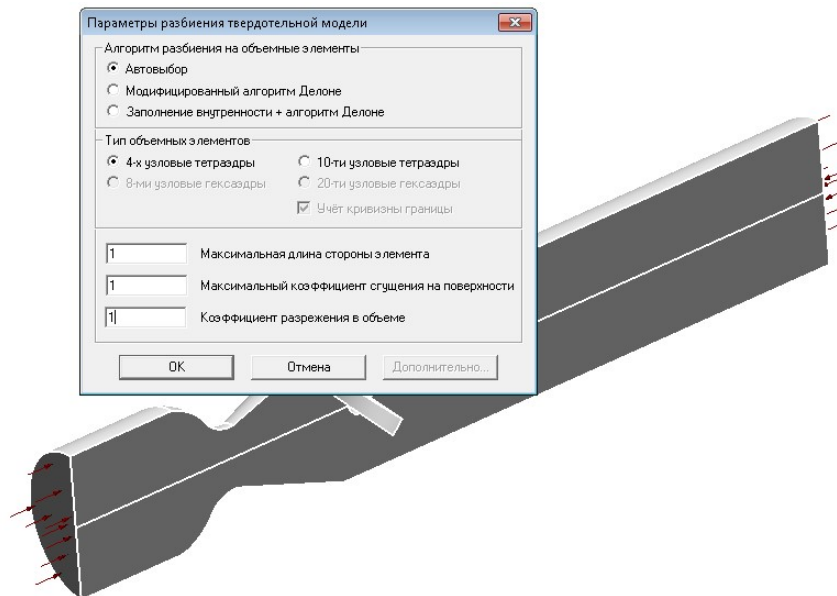


Рисунок 40 – Диалог *Параметры разбиения твердотельной модели*

## 5.5 Параметры и запуск анализа

Для задания параметров анализа необходимо выбрать команду *FGA / Параметры расчета...* В открывшемся диалоговом окне *Параметры расчета* выбираем вкладку *Алгоритм*. Для данной задачи требуется определить постановку:

- термическая постановка задачи – *THERMAL*;
- турбулентная постановка задачи – *TURBULENT*.

Во вкладке *Параметры сходимости* устанавливаем *максимальное количество итераций* равной *3000*, а также *параметры сходимости* и *область определения для степеней свободы*.

Во вкладке *Результаты* выбираем необходимые результаты, которые дополнительно будут выводиться после расчета. После настройки всех параметров нажимаем кнопку *ОК*.

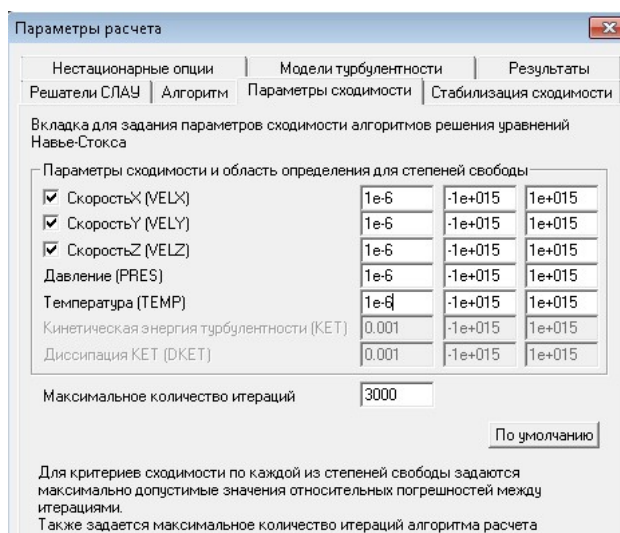


Рисунок 41 – Настройки во вкладке *Параметры сходимости*

Для запуска анализа выбираем команду *FGA / Расчет...* и в появившемся диалоге выбираем *Анализ течений Навье-Стокса*.

После это появляется *FGA Монитор* процесса анализа, который содержит общую информацию о задаче, а также различную информацию о ходе процесса сходимости.

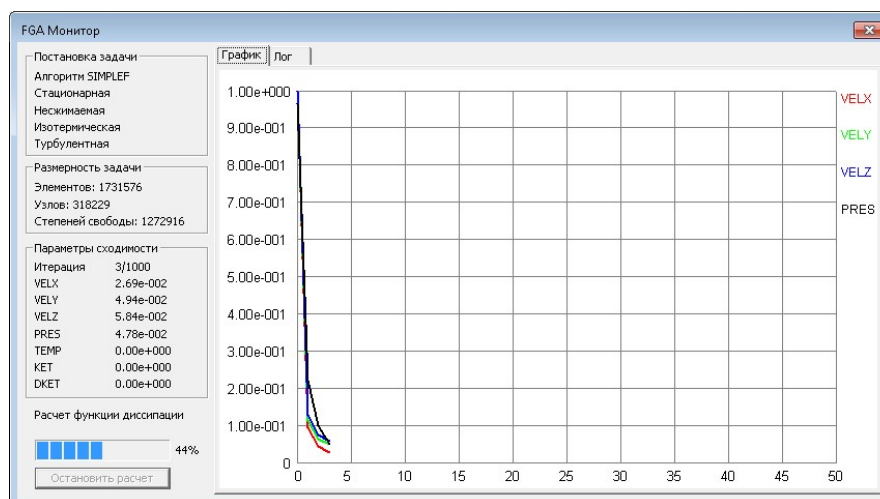


Рисунок 42 – Монитор анализа течений Навье-Стокса

## 5.6 Анализ полученных результатов

Для просмотра карт результатов выбираем команду в меню *Результаты / Карта результатов*. В появившемся диалоговом окне *Параметры вывода*

результатов выбираем необходимый тип результатов. В нашем случае это Скорость, Давление, Эффективная вязкость, Температура, Эффективная Теплопроводность.

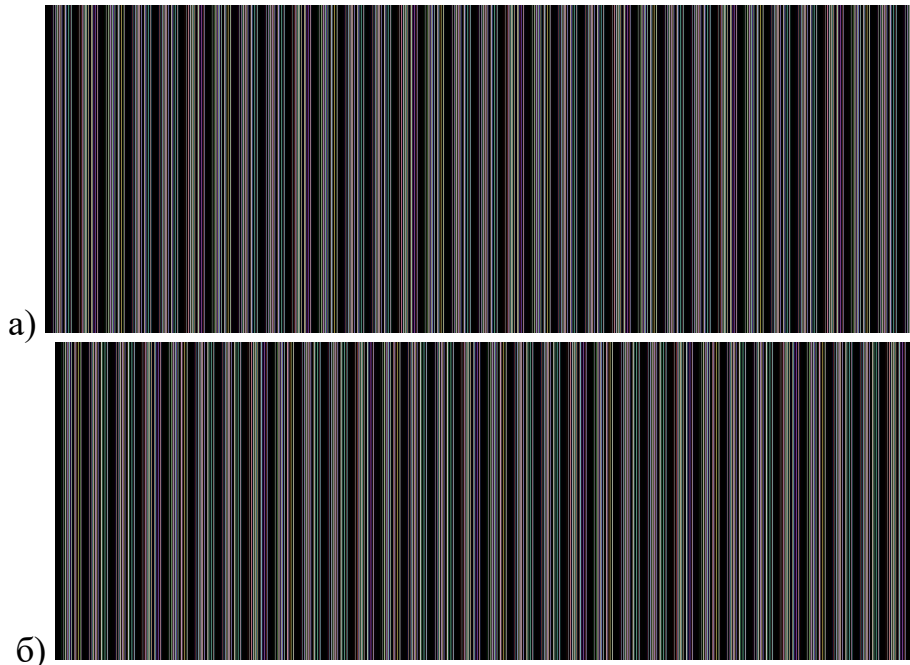


Рисунок 43 – Поля компонент скоростей:  
а) вдоль оси X, б) вдоль оси Y

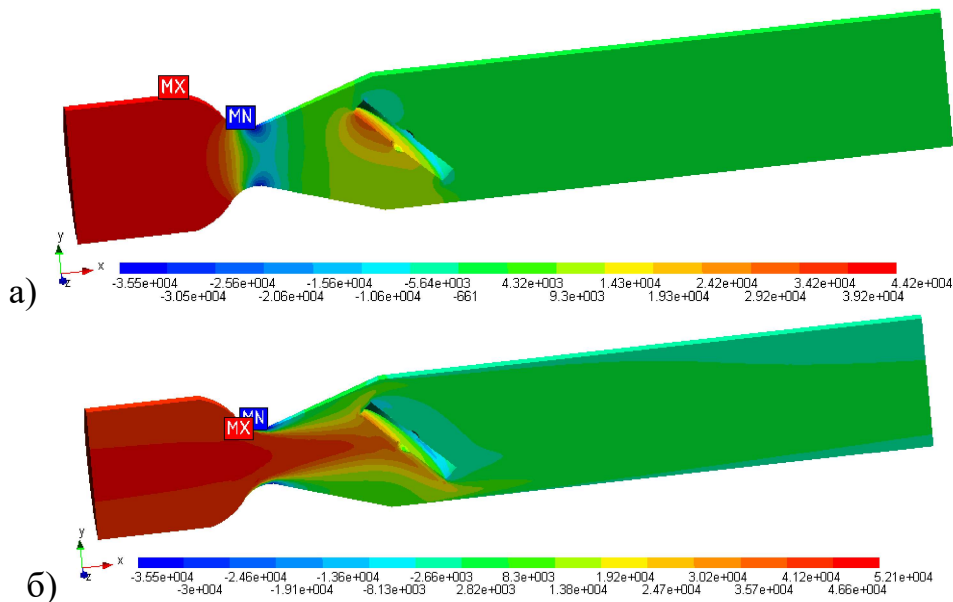


Рисунок 44 – Поля:  
а) давлений, б) полных давлений

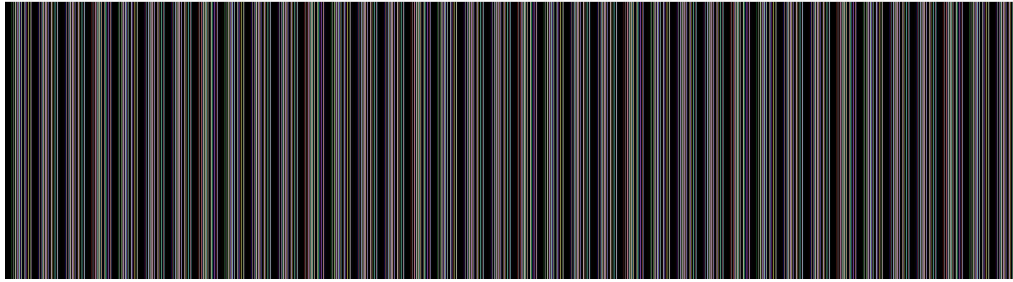


Рисунок 45 – Карта изолиний скорости

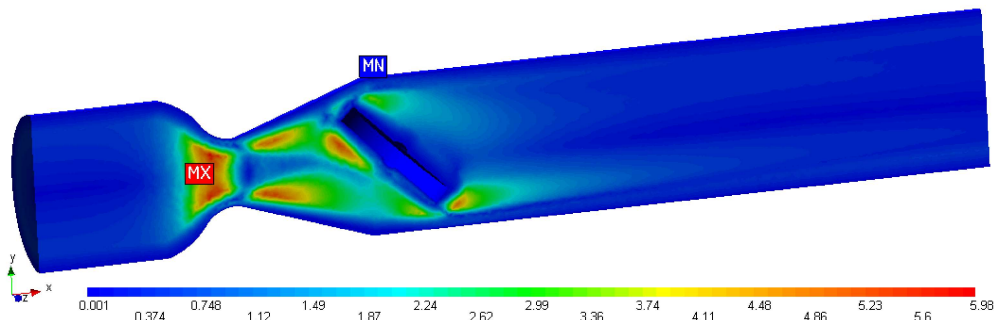


Рисунок 46 – Поля эффективной вязкости

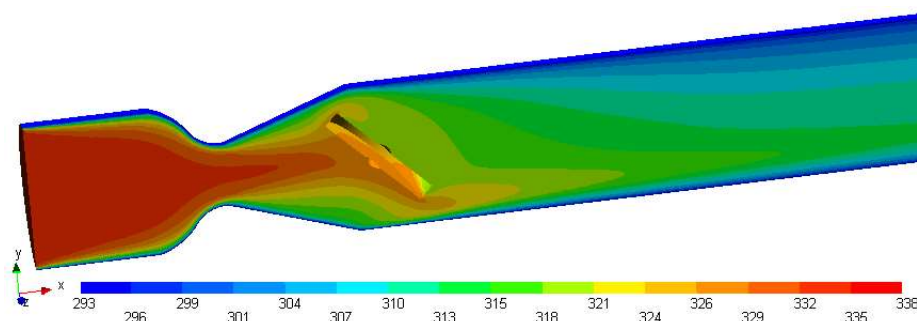


Рисунок 47 – Поля температур

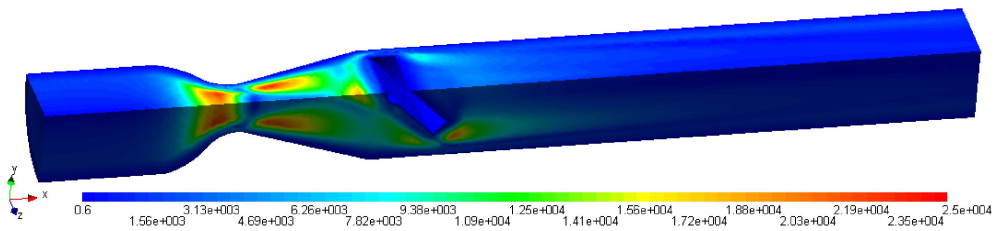


Рисунок 48 – Поля эффективной теплопроводности (разрез)



## 6 Турбулентное течение жидкости в каналах для охлаждения лопатки турбины. Сопряженный теплообмен

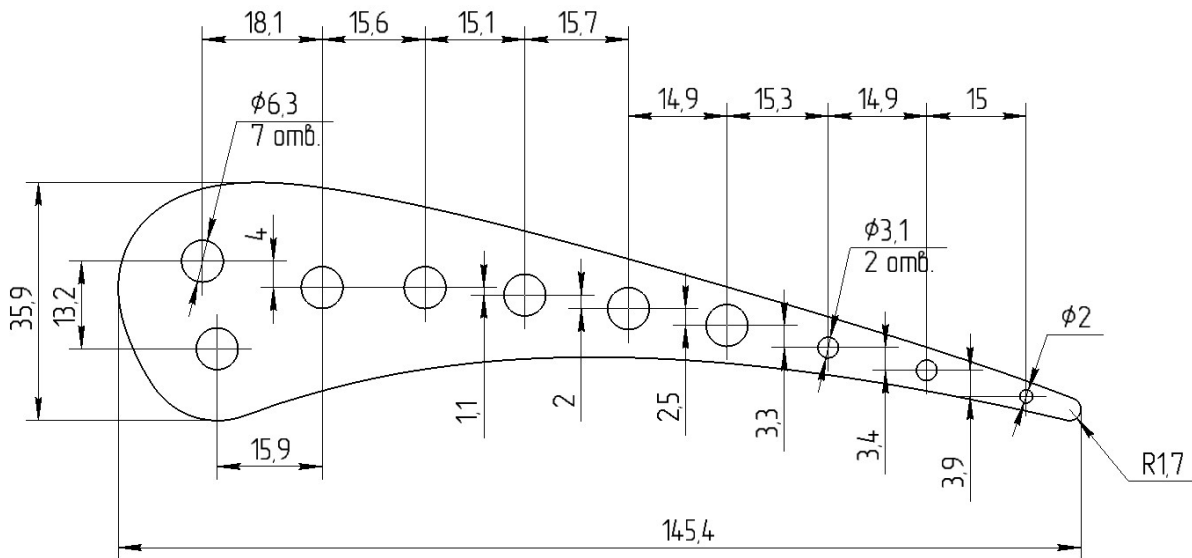


Рисунок 49 – Чертеж лопатки турбины

Геометрия лопатки турбины и жидкости в каналах создана в модуле АРМ Structure 3D в полуавтоматическом режиме. Дальнейшая работа происходит только в дереве данного модуля (две панели инструментов *Объекты*, *Свойства*).

### 6.1 Задание свойств течения

Задания свойств *Стали*. Для этого выбираем в дереве *Материалы / Сталь* и команду *Редактировать* из контекстного меню. В появившемся диалоговом окне выбираем из *доступных свойств материала – Течение*, нажимаем кнопку *Изменить* и задаем *Удельную теплоемкость* равную  $462 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  и *Теплопроводность* равную  $55 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Закрываем по кнопке *ОК* все диалоговые окна и выбираем в дереве *Материалы / Сталь* и команду *Задать всем* из контекстного меню.

Задания свойств *Жидкости*. Для этого выбираем в дереве *Материалы* команду *Добавить*. В появившемся диалоговом окне выбираем тип материала *Общий*, после чего появиться диалог *Выбор свойств материала*, в котором вводим название материала, в нашем случае – *Жидкость*.

Выбираем из *доступных свойств материала – Течение*, нажимаем кнопку *Изменить* и задаем *Плотность* равную  $1000 \text{ кг/м}^3$ , *Вязкость* равную  $0.001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , *Удельную теплоемкость* равную  $4187 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ , *Теплопроводность* равную  $0.6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$ . Закрываем по кнопке *ОК* все диалоговые окна. Отключаем слои содержащие тело лопатки. На экране остаются только слои содержащие каналы, в которых течет жидкость. Выделяем эти элементы и выбираем в дереве *Материал / Жидкость* и команду *Задать выделенным* из контекстного меню.

## 6.2 Задание граничных условий

В данной постановке задачи нужно задать несколько граничных условий.

*Условия слипания на стенках лопатки.* Это граничное условие задается на всех поверхностях лопатки. Все компоненты вектора скорости должны быть равны нулю.

*Давление на выходе из каналов лопатки.* На выходе из моделируемой части лопатки давление должно быть равно нулю.

*Температура на поверхности лопатки.* Данную температуру задаем на поверхности лопатки. Температура лопатки при этом равна  $568 \text{ K}$ .

*Давление на входе в каждый канал лопатки.* Для этого выделяем только поверхности на входе каждого канала и задаем ему соответствующее давление.

*Температура на входе в каждый канал лопатки.* Для этого выделяем только поверхности на входе каждого канала и задаем на них соответствующую температуру.

№ трубки	Давление, Па	Температура, К
1	268	349
2	294	349
3	268	340
4	304	342
5	294	334
6	301	365
7	277	343
8	562	365
9	220	409
10	324	453

Рисунок 50 – Температура и давление на входах в каналы лопатки

Задание *условий сลิปания*. Для этого выбираем в дереве *Нагрузки / FGA ГУ/НУ* команду *Скорость* из контекстного меню. Выделяем поверхности объемных элементов, принадлежащие телу лопатки. Для определения поверхности объемного элемента необходимо выделить еще и узлы объемного элемента, описывающие соответствующие поверхности. На панели *Свойства* в строках *Скорость X [м/с]*, *Скорость Y [м/с]* и *Скорость Z [м/с]* вводим значение равное 0. Затем в строке *Элементы* нажимаем кнопку *Применить*. После этого в строке *Количество* отобразиться количество объемных элементов, на которые задано граничное условие. В данном случае это *76600 элементов*.

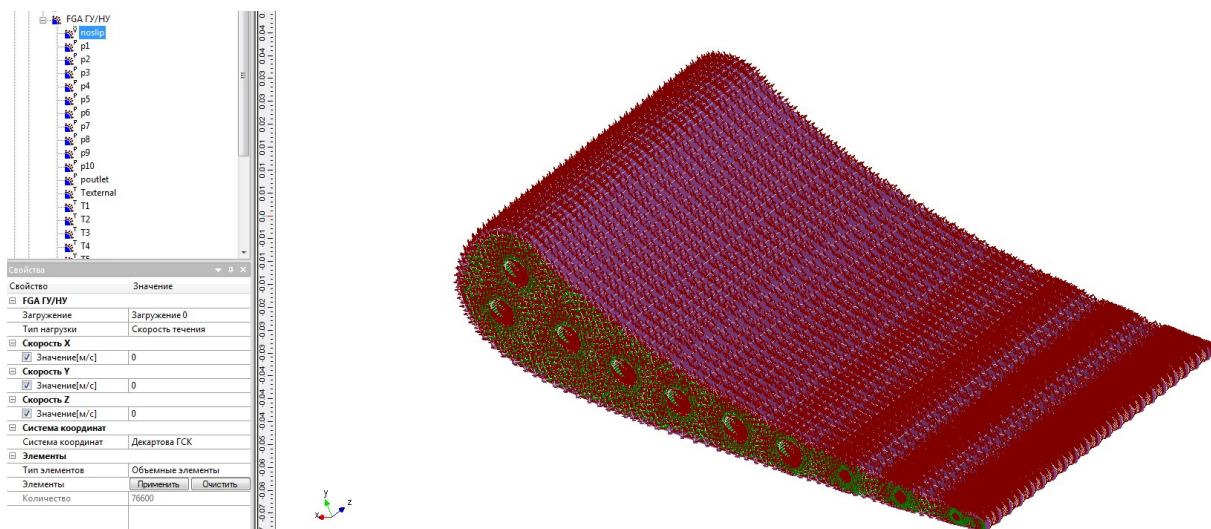


Рисунок 51 – Задание *условий сลิปания*

Задание *давления* на выходе из каналов лопатки. Для этого выбираем в дереве *Нагрузки / FGA ГУ/НУ* команду *Давление* из контекстного меню. Выделяем объемные элементы, на поверхности которых будет задано давление. Для определения поверхности объемного элемента необходимо выделить еще и узлы объемного элемента, описывающие соответствующие поверхности. На панели *Свойства* в строке *Значения [Па]* вводим значение давления равное 0. Затем в строке *Элементы* нажимаем кнопку *Применить*. После этого в строке *Количество* отобразиться количество объемных элементов, на которые примениться граничное условие. В данном случае это *1660 элементов*.

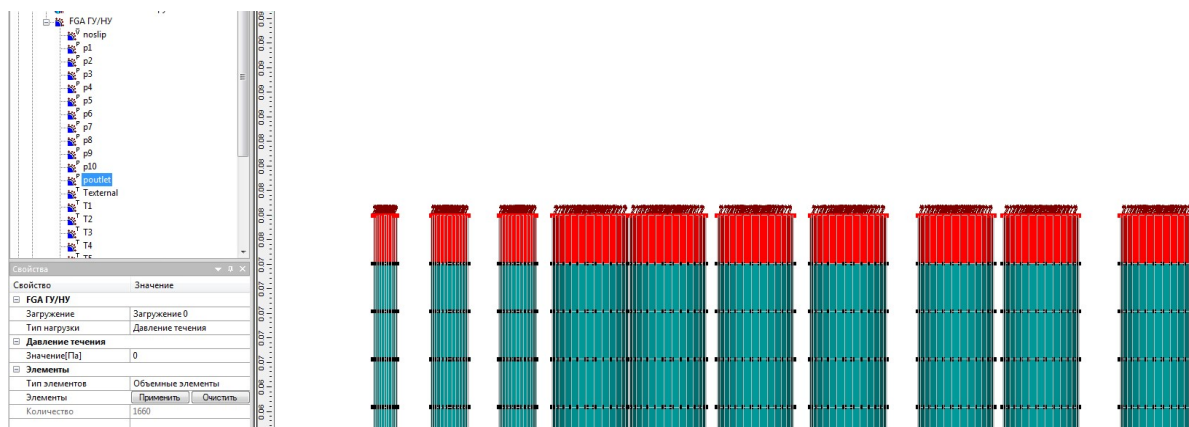


Рисунок 52 – Задание давления на выходе из каналов лопатки

Задание температуры на поверхности лопатки. Для этого выбираем в дереве *Нагрузки / FGA ГУ/НУ* команду *Температура* из контекстного меню. Выделяем объемные элементы, на поверхности которых будет задана температура. Для определения поверхности объемного элемента необходимо выделить еще и узлы объемного элемента, описывающие соответствующие поверхности. На панели *Свойства* в строке *Значения [K]* вводим значение температуры равное *568 K*. Затем в строке *Элементы* нажимаем кнопку *Применить*. После этого в строке *Количество* отобразится количество объемных элементов, на которые применится нагрузка. В данном случае это *3560 элемента*.

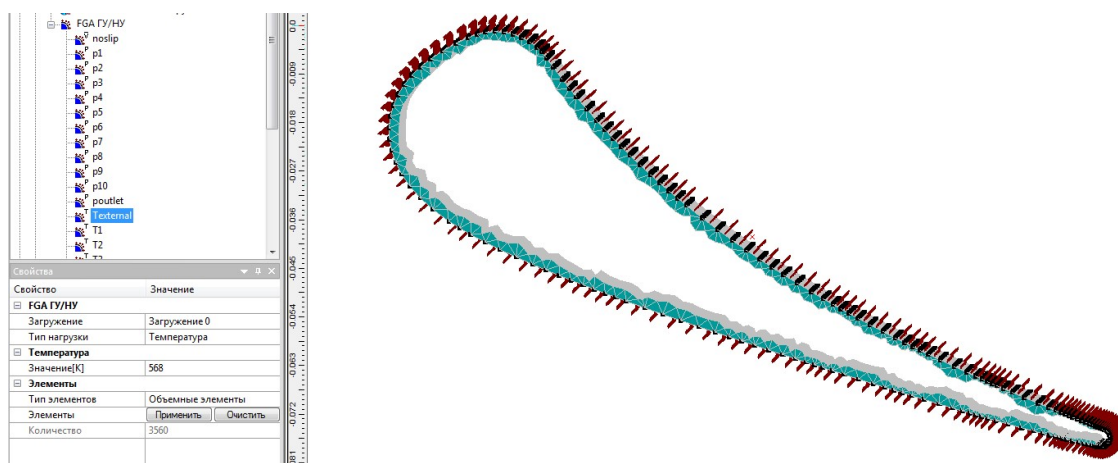


Рисунок 53 – Задание температуры на внешней поверхности лопатки

Задание *Давления* и *Температуры* на входе в каждый канал лопатки. Данные граничные условия задаются для каждого канала отдельно в соответствии с исходной таблицей. Принцип задания давления на входе в канал лопатки такой же, как и задание давления на выходе из каналов

лопатки. При этом выделяется вся поверхность сечения трубы. Принцип задания Температуры на входе канал такой же, как и задание температуры на поверхности лопатки. При этом выделяется только внутренняя поверхность сечения трубы. Узлы модели, которые описывают поверхность канала не должны иметь граничного условия в виде температуры жидкости на входе канал. Для этого *Температура* не должна быть задана на объемные элементы принадлежащие этим узлам.

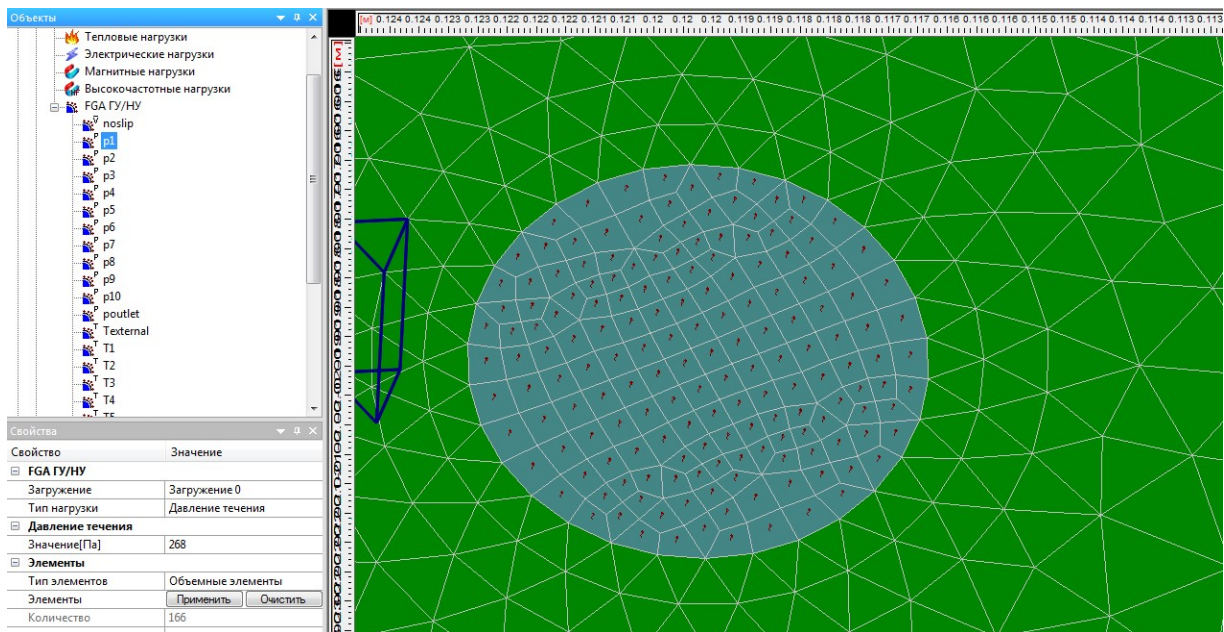


Рисунок 54 – Задание *давления* на входе в первый канал лопатки

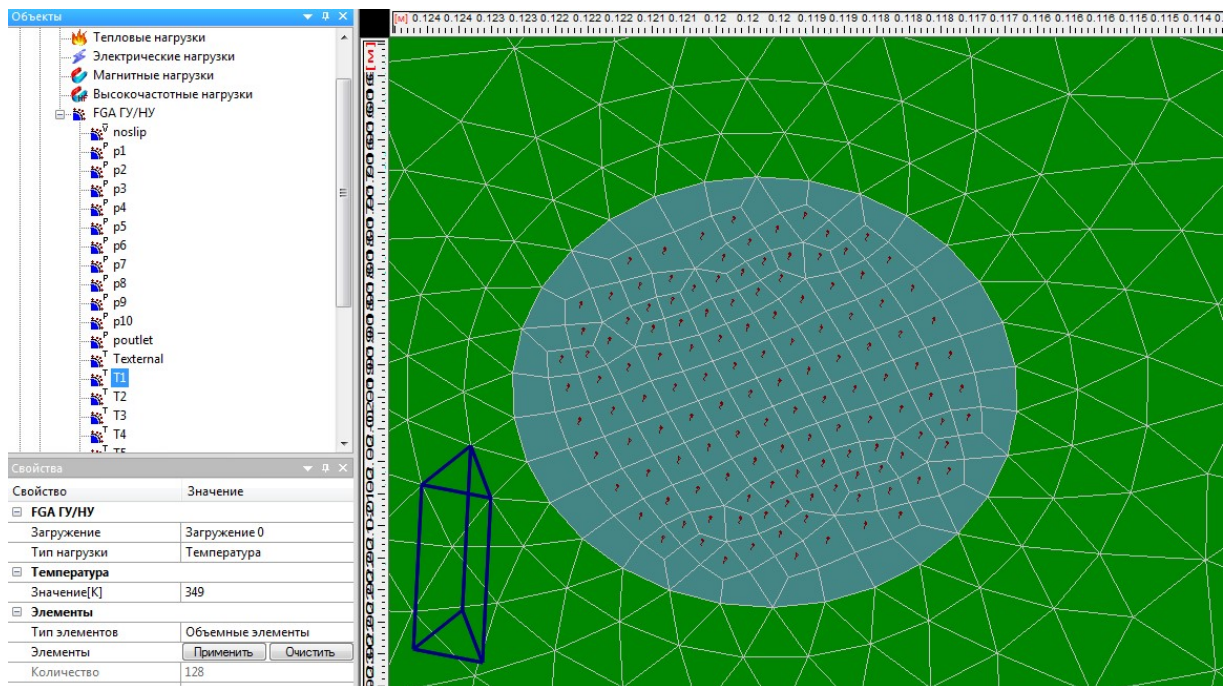


Рисунок 55 – Задание температуры на входе в первый канал лопатки

### 6.3 Параметры и запуск анализа

Для этого выбираем в дереве *Анализ / FGA / Анализ течений Навье-Стокса* из контекстного меню.

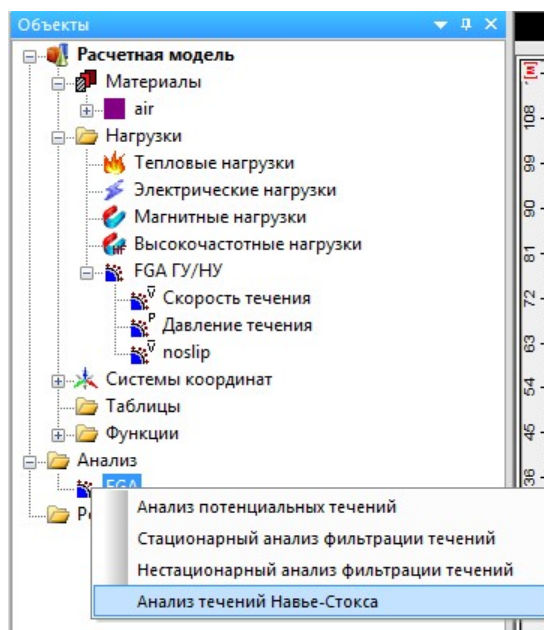


Рисунок 56 – Выбор типа анализа

На панели *Свойства* в строке *Параметры анализа* нажимаем кнопку *Редактировать*. В открывшемся диалоговом окне *Параметры расчета* выбираем вкладку *Алгоритм*. Для данной задачи требуется выбрать турбулентный режим течения – *TURBULENT*. Для учета влияния температуры выбираем термическую постановку задачи – *THERMAL*.

Во вкладке *Результаты* выбираем необходимые результаты, которые дополнительно будут выводиться после расчета: *Температура (TEMP)*, *Теплопроводность (COND)*, *Удельная Теплоемкость (SPHT)*, *Эффективная вязкость (EFFVISC)*, *Эффективная Теплопроводность (EFFCOND)*, *Тепловые Поток* (*HEATFLUX*).

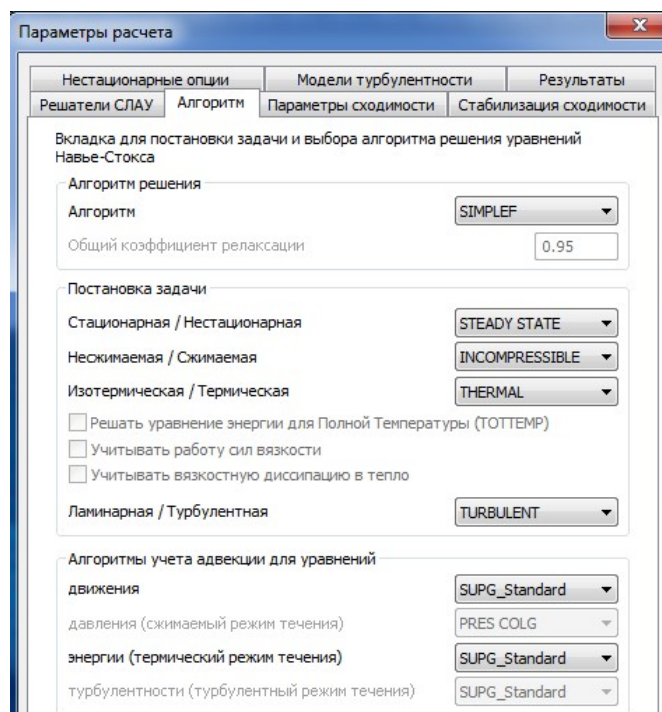


Рисунок 57 – Настройки во вкладке *Алгоритм*

Во вкладке *Параметры сходимости* устанавливаем *максимальное количество итераций* равное *5000*, а также *параметры сходимости* и *область определения для степеней свободы*.

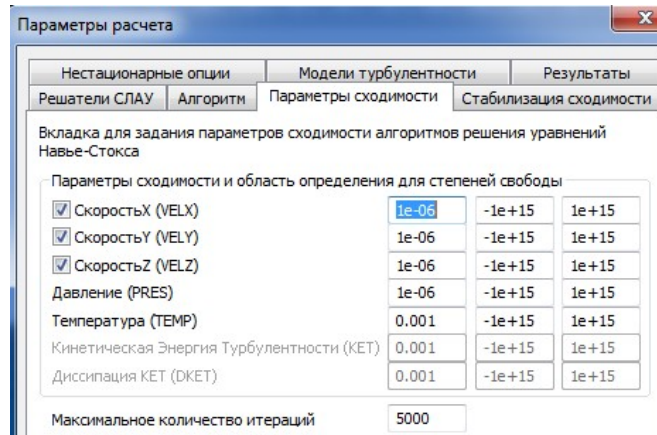


Рисунок 58 – Настройки во вкладке *Параметры сходимости*

Для запуска анализа на панели *Свойства* в строке *Запуск анализа* нажимаем кнопку *СТАРТ!*. После это появляется *FGA Монитор* процесса анализа, который содержит общую информацию о задаче, а также различную информацию о ходе процесса сходимости.

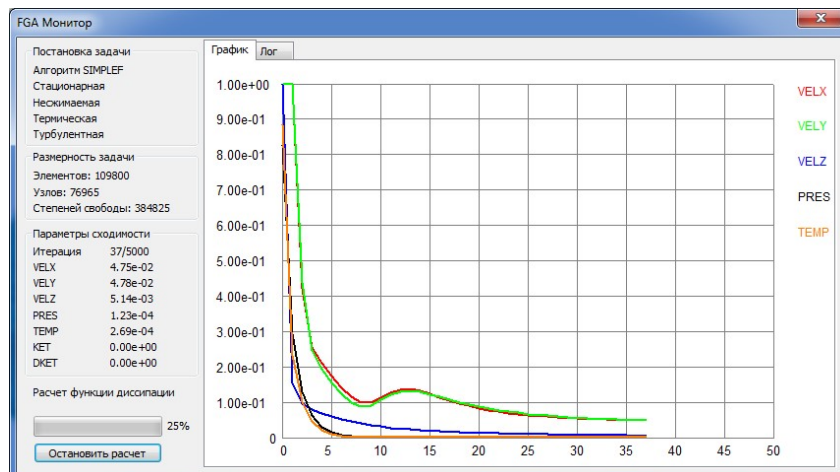


Рисунок 59 – Монитор анализа течений *Навье-Стокса*

## 6.4 Анализ полученных результатов

Для возможности разреза при просмотре карт результатов включаем дополнительные настройки с помощью команды *Файл / Настройки*. В появившемся диалоге *Настройки* ставим галочку напротив *Альтернативная карта результатов*. Нажимаем последовательно кнопки *Сохранить* и *ОК*.

Для просмотра карт результатов выбираем команду в меню *Результаты / Карта результатов*. В появившемся диалоговом окне *Параметры вывода*



результатов выбираем необходимый тип результатов. В нашем случае это Давление, Скорость, Температура.

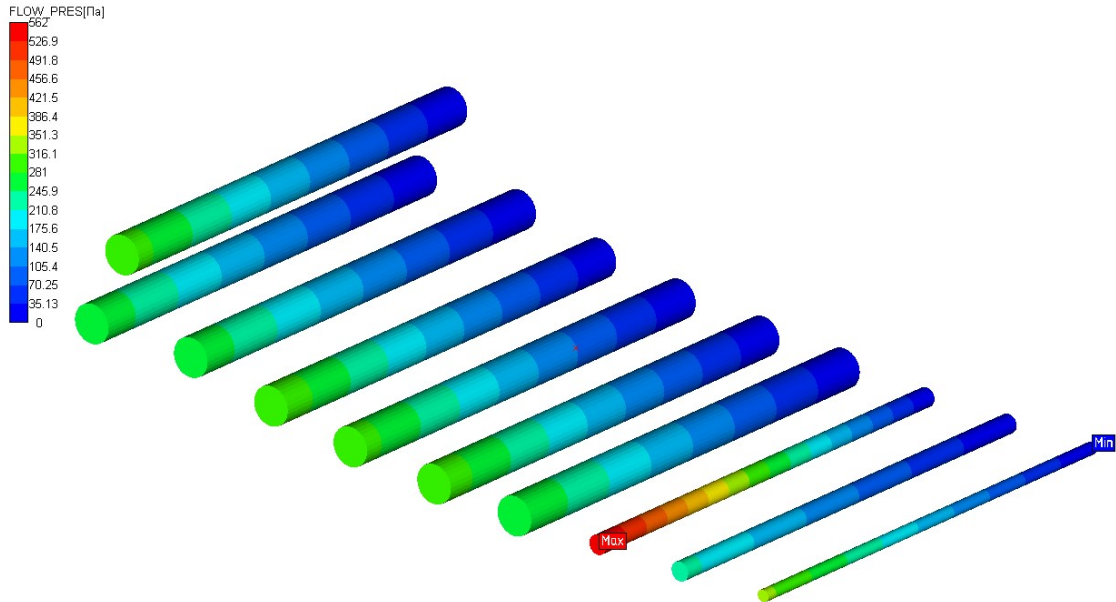


Рисунок 60 – Карта распределения давления в каналах лопатки

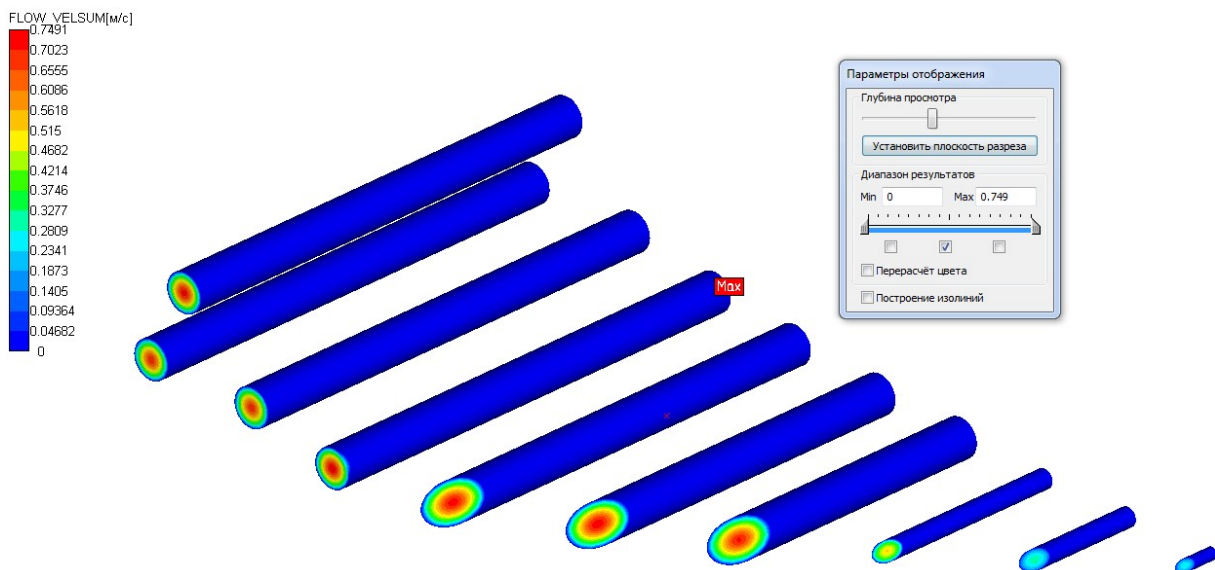


Рисунок 61 – Карта распределения скорости в каналах лопатки (разрез)

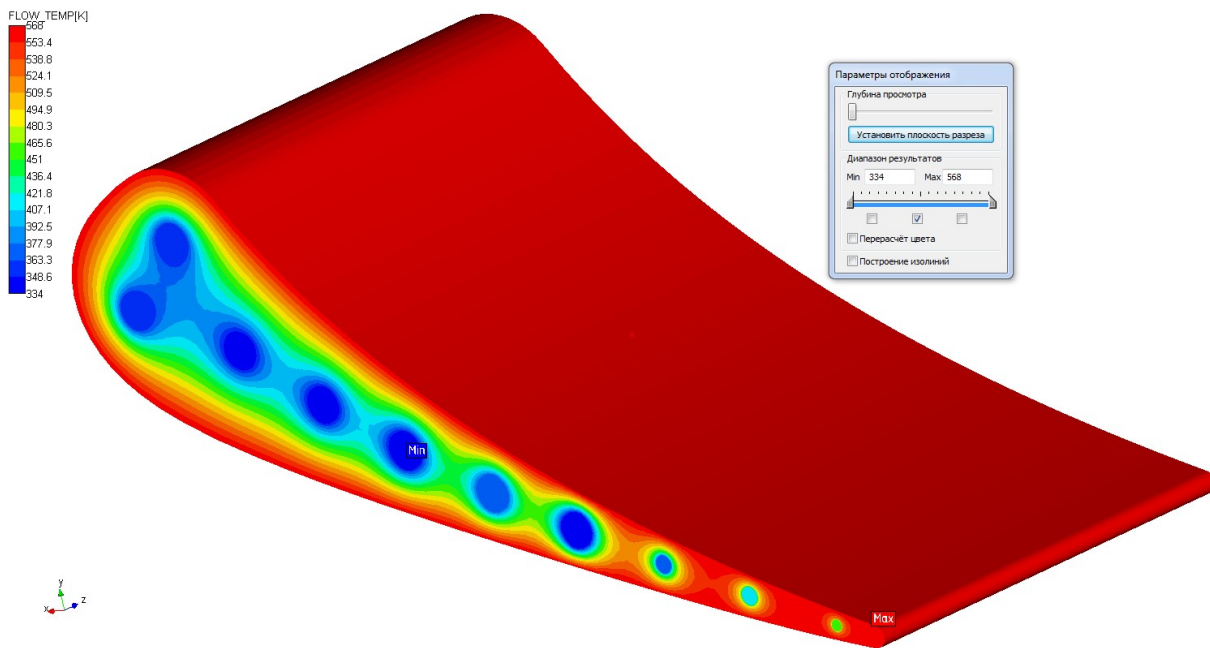


Рисунок 62 – Карта распределения температуры в лопатке (на входе)

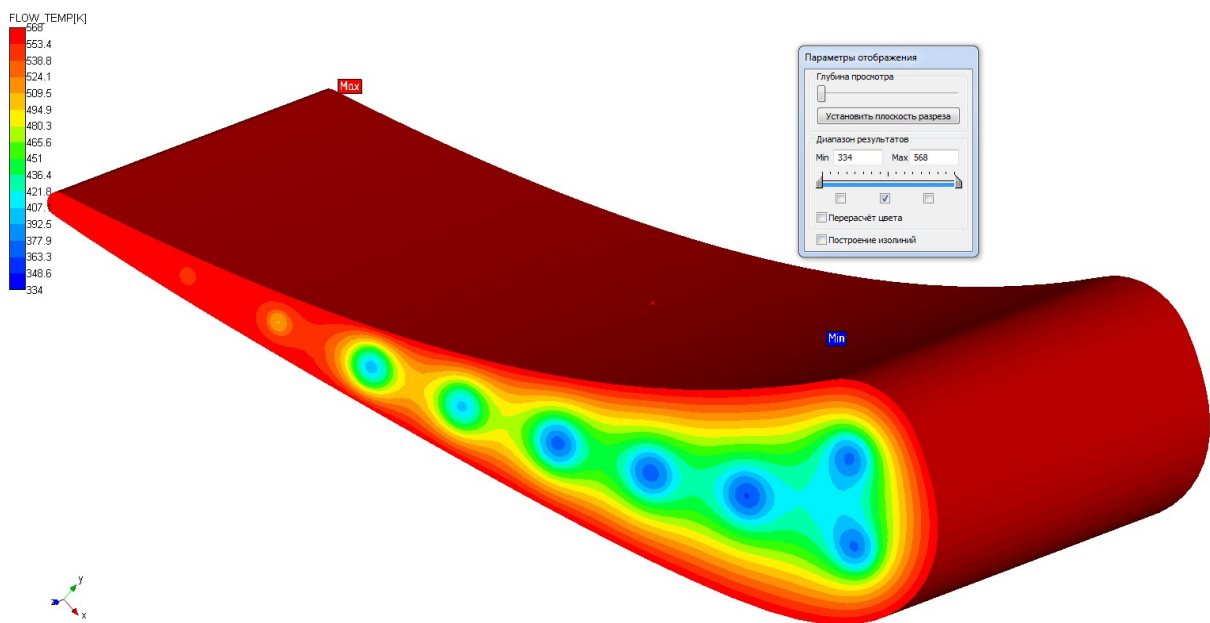


Рисунок 63 – Карта распределения температуры в лопатке (на выходе)