# МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА» (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ) (СГАУ)

# **3-D** моделирование процессов нестационарного течения в агрегатах и гидравлической арматуре

Электронные методические указания

к лабораторным работам

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка образовательных стандартов СГАУ по специальности 160700.65 – Проектирование авиационных и ракетных двигателей и направлению подготовки бакалавров 160700.62 – Двигатели летательных аппаратов со сквозной документацией и создание исследовательских лабораторных работ и прогрессивных технологий лекционных занятий» Соглашение № 1/4 от 03 июня 2013 г.

> C A M A P A 2013

УДК 004.9 (075) ББК 32.9я7 Т 67

#### Составитель: Макарьянц Георгий Михайлович

Рецензент: Угланов Д.А., к.т.н., доцент кафедры ТиТД.

Компьютерная верстка: Крысина Д.А.

**3-D моделирование процессов нестационарного течения в агрегатах и гидравлической арматуре** [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. Г. М. Макарьянц. - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,8 Мбайт). - Самара, 2013. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В пособии приведены методические указания к лабораторным работам по дисциплине «САЕ-системы для гидродинамических расчётов».

Целью методических указаний является закрепление практических навыков студентов при моделировании течения рабочей среды в агрегатах запорной пневмоарматуры.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся ПО специальностям 150802.65 «Гидравлические гидроприводы машины, И гидропневмоавтоматика» (5 семестр) И 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (5 семестр), бакалавров, обучающихся по 141100.62 "Энергетическое машиностроение" (5 семестр), направлениям 151000.62 «Технологические машины и оборудование» (5 семестр).

Разработано на кафедре АСЭУ.

© Самарский государственный аэрокосмический университет, 2013

2

## СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
BBE)	<u>цение</u>	4
1	УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ДРЕНАЖНО-	
<u>ПРЕД</u>	<u> ЦОХРАНИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА</u>	6
2	ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В	
ΠΗΕΙ	ВМОКЛАПАНЕ	8
3	ПОРЯДОК МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ В ПНЕВМО-	
КЛА	<u>ПАНЕ</u>	13
3.1	Построение геометрии расчётной области	14
3.2	Построении блочной структуры расчётной сетки	17
3.3	Разработка численной модели	27
4	ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАСЧЁТУ	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Основным источником динамических нагрузок в пневмосистемах с клапанными устройствами являются, возникающие в них, автоколебательные процессы.

Зачастую регулирования К элементам давления И расхода В пневмосистемах предъявляют противоречащие требования. С одной стороны большая скорость срабатывания, простота конструкции и надёжность с другой - высокая точность регулирования и высокое качество переходных процессов. Всё это негативно сказывается на динамике, как самих регуляторов, так и систем, в которых они используются. К примеру, требование высокой скорости сброса давления В топливном баке ракеты-носителя И возможности регулирования давления наддува бака привело к созданию высокорасходного непрямого действия, себе регулятора давления сочетающего В лве противоречивые функции – дренажа газа из бака и поддержания определённого значения давления в газовой подушке. В связи с этим устройство получило название дренажно-предохранительный клапан и нашло широкое применение в ракетной технике. Однако в ходе испытаний таких клапанов у некоторых из наблюдается неустойчивая работа, них которая проявляется В виде импульсного повышении вибрации клапанных элементов, колебаний давления в баке испытательного стенда и импульсном тональном шуме – "гудении".

Эти явления вызваны неустойчивостью равновесия клапана в потоке газа. Трудности обеспечения устойчивости подобных конструкций объясняются сложностью физических процессов акустико-вихревого взаимодействия подвижного блока клапана с потоком газа и присоединённой системой. Кроме того, малая вязкость газа делает невозможным создание стабильных сил демпфирования. Поэтому неустойчивая работа клапанов может возникать неожиданно в отработанных конструкциях при изменении компоновки системы, изменении условий эксплуатации или технологии изготовления

4

отдельных деталей (изменение входного импеданса присоединённой системы, изменение параметров вибрации корпуса, изменение чистоты или твёрдости поверхностей трения).

В работах [1-4] показано, что динамика регуляторов давления в высокой степени зависит от соотношения сил в клапанном механизме, в частности от возникающих при движении клапана газодинамических усилий. Настоящие усилий методическое указание посвящено расчёту газодинамических воздействующих запорно-регулирующем органе пневмоклапана В С использованием CAE - системы ANSYS Fluent.

# 1 УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ДРЕНАЖНО-ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА

Рассматриваемый (рисунок. 1.1) агрегат является регулятором С управлением от рабочей среды, с усилителем клапанного типа. Способ задания управляющей нагрузки – пружинный с газовой камерой. Основным настроечным элементом является газовая камера, конструктивно выполненная в виде газовой пружины. Давление в газовой пружине регулируется с помощью пилотного клапана. Механическая пружина только возвращает замыкающий орган основного клапана на седло при снижении давления в газовой камере. Замыкающий (рабочий) орган – тарельчатый. Регулятор пропорционального действия, малоподъёмный. Направление воздействия на рабочий орган – с подачей под золотник. Специальных демпфирующих устройств в конструкции регулятора не предусмотрено. В роли демпфера сухого трения выступают направляющий шток 1, центрирующий рабочий орган, и стакан тарели.

Поддержание давления в газовой подушке бака с компонентом топлива, происходит следующим образом. При давлении меньше давления настройки тарель 3 основного клапана Б (рисунок 1.1) прижата к седлу 1 силой пружины 5 и давления в газовой пружине 6 основного клапана. Сильфон газовой пружины 6 наддувается баковым давлением, проникающем через дроссель 4. При увеличении давления в испытательной ёмкости А выше настроечного сильфон 11 пилотного клапана Е сжимается и шток-толкатель 9 перемещает тарель 11 от седла 7. Давление в газовой пружине 6 основного клапана падает, и запорный элемент открывается, стравливая давление из бака.

6



Рисунок 1.1 – Дренажно-предохранительный клапан А – испытательная ёмкость, Б – основной клапан, В – пилотный клапан, Г – трубопровод сброса давления из сильфона основного клапана, Д – трубопровод подвода давления к сильфону пилотного клапана, Е – трубопровод сброса давления из сильфона основного клапана в атмосферу

 седло основного клапана с направляющим штоком, 2 – корпус ДПК, 3 – тарель основоного клапана, 4 – дроссель, 5 – пружина основого клапана, 6 – сильфон газовой пружины основого клапана, 7 – седло пилотного клапана, 8 –

тарель пилотного клапана, 9 – шток-толкатель пилотного клапана, 10 – пружина пилотного клапана, 11 –сильфон пилотного клапана, 12 – разрезные пружины-опоры штока-толкателя и тарели пилотного клапана, 13 – настроечная пружина пилотного клапана, 14 – регулировочный винт пилотного клапана

# 2 ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В ПНЕВМОКЛАПАНЕ

Математической моделью, используемой для расчёта течения в дросселирующем элементе клапана, является система осреднённых по Рейнольдсу полных уравнений Навье-Стокса, которые описывают движение вязкого, сжимаемого и теплопроводного газа. В состав системы входят:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\rho'} \bar{u'_j}}{\partial x_j} = 0$$
(2.1)

уравнение движения

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{p} + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_j \bar{u}_i \right).$$
(2.2)

Гидродинамические параметры в этих уравнениях представляются в виде суммы стационарной и нестационарной компоненты. Например, для компоненты скорости *u<sub>i</sub>* такая сумма будет выглядеть следующим образом

$$u_i = \overline{u}_i + u_i' \tag{2.3}$$

где  $u_i$  – стационарное (среднее) значение компоненты скорости в *i*-м направлении,  $u'_i$  – нестационарная (пульсационная) компонента скорости. Среднее значение гидродинамических параметров определяется на достаточно большом интервале времени *T* :

$$\bar{u}_j = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_j(t) dt \,. \tag{2.4}$$

Для решения такой осреднённой системы уравнений необходимо определить слагаемое  $\overline{u'_i u'_j}$ , получившее название рейнольдсовы или

турбулентные напряжения. При определении турбулентных напряжений вводится понятие турбулентной вязкости  $\mu_t$ . Рейнольдсовы напряжения записываются в виде суммы изотропной и анизотропной составляющих:

$$\overline{u_j'u_j'} = \frac{1}{3}2k\delta_{ij} + \left(\overline{u_j'u_j'} - \frac{2}{3}2k\delta_{ij}\right),$$
(2.5)

где  $k = \frac{1}{2} \overline{u'_j u'_j}$  - кинетическая энергия турбулентности, характеризующая интенсивность пульсаций скорости. Согласно предположению Бусинеска связь турбулентных напряжений  $\overline{u'_j u'_i}$ , точнее их анизотропной части и тензора скоростей деформации осреднённого по Рейнольдсу  $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ 

аналогична гипотезе Стокса:

$$-\rho\left(\overline{u_j'u_j'} - \frac{2}{3}2k\delta_{ij}\right) = 2\mu_t\left(\overline{S}_{ij} - \frac{1}{3}\overline{S}_{kk}\delta_{ij}\right).$$
(2.6)

Соотношение (2.6) является гипотезой турбулентной вязкости и может быть записано в виде

$$-\rho \overline{u_j' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial \overline{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}.$$
(2.7)

Замыкание системы уравнений гидродинамики обычно выполняется с моделей турбулентности, особенности помощью учитывающих рассматриваемого течения. Течение в зазоре между седлом и тарелью клапана собой сложную структуру, представляет включающую себя зоны В активно сверхзвукового потока, взаимодействующего с твёрдыми уплотнительного и запорно-регулирующего поверхностями элементов. Поэтому выбор модели турбулентности и её адаптация к условиям течения в

9

клапане основываются на решении задачи отрыва потока от обтекаемой поверхности.

Для этих целей используется модель, предложенная Ф. Ментером [5]. Она была создана как комбинированная модель сдвиговых напряжений - *SST* модель, объединяющая  $k - \varepsilon$  и  $k - \omega$  модели. Система уравнений  $k - \omega SST$  модели турбулентности включает в свой состав:

- уравнение переноса кинетической энергии турбулентности *k* 

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho P_k - \rho C_{\mu} k \omega$$
(2.8)

- уравнение величины обратной времени жизни крупных вихрей *ω* 

$$\frac{\partial\rho\omega}{\partial t} + \frac{\partial\rho\omega u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_I) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2}\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial\omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} \rho P_k - \rho \beta_3 \omega^2$$
(2.9)

Коэффициенты  $\alpha_3$ ,  $\beta_3$  вычисляются через соответствующие коэффициенты  $k - \omega$  и  $k - \varepsilon$  моделей. Обобщённая формула для их расчёта выглядит следующим образом

$$X_3 = F_1 X_1 + (1 - F_1) X_2. (2.10)$$

Вычисление коэффициентов  $\sigma_{k3}$  и  $\sigma_{\omega3}$  через соответствующие коэффициенты базовых моделей следующим образом

$$Y_3^{-1} = F_1 Y_1^{-1} + (1 - F_1) Y_2^{-1}.$$
(2.11)

Здесь  $F_1$  – функция переключатель, которая вблизи твёрдой стенки позволяет использовать преимущества  $k - \omega$ , а в ядре потока  $k - \varepsilon$ . Значения остальных коэффициентов определяются эмпирически из условия наилучшего описания особенностей моделируемого течения. Так  $C_{\mu} = 0.09$ ,  $\alpha_1 = 5/9$ ,  $\alpha_2 = 0.44$ ,  $\beta_1 = 0.075$ ,  $\beta_2 = 0.0828$ ,  $\sigma_{k1} = 2$ ,  $\sigma_{k2} = 2$ ,  $\sigma_{\omega 1} = 2$ ,  $\sigma_{\omega 2} = 1/0.856$ .

Кроме этого в *SST* модели есть дополнительные модификации. Генерация кинетической энергии не может превышать пороговой величины *10С<sub>и</sub>рkω*:

$$\rho P_k = \min\left(\mu_t / \bar{S} / {}^2, \ 10C_\mu \rho k\omega\right). \tag{2.12}$$

Здесь  $|\bar{S}|$  - модуль тензора средней скорости деформации, определяемый по формуле [6]:

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ji}} , \qquad (2.13)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right).$$
(2.14)

Следующей модификацией *k* – *ω SST* модели является учёт локального значения скорости деформации поля скорости

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max\left(a_1 \omega, /\bar{S}/F_2\right)}.$$
(2.15)

Здесь  $F_2$  - вторая функция переключатель. При этом возможны два предельных случая. В первом турбулентная вязкость равна  $\mu_t = \frac{\rho a_I k}{\bar{S}/F_2}$ . Это

соответствует положению расчётной точки в пограничном слое и описывается гипотезой Бредшоу [5]. В свободном сдвиговом слое наступает второй предельный случай, при этом  $\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}$ , что соответствует расчёту по классической  $k - \omega$  модели при высоких числах Рейнольдса.

Значение функций-переключателей отражают местоположение расчётной точки относительно границы приповерхностного пограничного слоя. Функции  $F_1$  и  $F_2$  вычисляются в зависимости от расстояния до обтекаемой поверхности и локальных характеристик течения

$$F_{I} = th\left(arg_{I}^{4}\right),$$

$$arg_{I} = min\left(max\left(\frac{\sqrt{k}}{C_{\mu}\omega y}, \frac{500\,\mu}{\rho y^{2}\,\omega}\right), \frac{4\,\rho k}{D_{\omega}^{+}\sigma_{\omega 2}\,y^{2}}\right),$$

$$D_{\omega}^{+} = max\left(\frac{2\rho}{\sigma_{\omega 2}\omega}\frac{\partial k}{\partial x_{j}}\frac{\partial \omega}{\partial x_{j}}, 10^{-10}\right),$$

$$F_{2} = th\left(arg_{2}^{2}\right),$$

$$arg_{2} = max\left(2\frac{\sqrt{k}}{C_{\mu}\omega y}, \frac{500\,\mu}{\rho y^{2}\,\omega}\right).$$
(2.16)

# 3 ПОРЯДОК МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ В ПНЕВМОКЛАПАНЕ

Моделирование течения газа в пневмоклапане включает последовательное выполнение следующих этапов:

- построение геометрии расчётной области;
- построении блочной структуры расчётной сетки;
- нанесении расчётной сетки на геометрическую модель расчётной области;
- загрузка и масштабирование расчётной сетки в программу решатель;
- задание свойств рабочей среды;
- выбор модели турбулентности;
- настройка алгоритма решения;
- задание граничных условий;
- выбор начальных условий;
- расчёт течения и анализ результатов решения.

Для создания геометрической модели и расчётной сетки используется программный комплекс ANSYS ICEM CFD. Задача решается в осесимметричной постановке, поэтому при построении геометрической модели ось симметрии должна совпадать с горизонтальной осью декартовой системы координат. Расчётная область включает в себя область перед тарелью клапана, сечение между тарелью и седлом и область окружающего пространства для моделирования истечения струи.

13

#### 3.1 Построение геометрии расчётной области

Создание геометрической модели начинается с построения точек контура сечения клапана в районе запорно-регулирующего элемента. Для этого необходимо выбрать закладку "Geometry" и активировать графическое меню построения точек "Create Points" (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Выбор меню построения точек

Затем необходимо выбрать способ построения координат точек "Explicit Coordinates" (рисунок 3.2) и задать их координаты, указанные в задании. Каждое новое введение координаты точки заканчивается нажатием на кнопку "Apply". Ввод всех координат завершается нажатием кнопки "OK", при этом происходит автоматический выход из меню работы с точками.

Create Point				Ŷ
Part GEOM				Ψ.
	⊙, ≯	or ar		
Explicit Locations				
Method Create 1 poir	nt			•
× 0				
	Apply	OK	Dismiss	

Рисунок 3.2 – Задание координат точек

После этого в меню дерева модели в подразделе "Geometry" появляется подраздел "Points". Нажатие на нём правой кнопки мыши активизирует выпадающее меню с элементами управления свойствами отображения точек (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Меню управления свойствами отображения точек

Также полезным может оказаться меню управления видами и масштабами графического поля. К примеру кнопка "Fit Window" (рисунок 3.4) выводит в область графического поля все объекты.



Рисунок 3.4 – Меню управления свойствами отображения точек

Другим элементом управления положением и видами объектов модели служит центральная кнопка (ролик) мыши. Вращение ролика изменяет масштаб отображения, а перемещение мыши при удерживании ролика в нажатом состоянии перемещает изображение модели по области графического поля. Далее построенные точки необходимо соединить прямыми линиями. Для этого выбирается графическое меню построения линий "Create/Modify Curves" (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Выбор меню построения линий

Затем необходимо выбрать способ построения линий "From Points" (рисунок 3.6). Построение линии выполняется при помощи следующей последовательности действий. Необходимо кликнуть левой кнопкой мыши на каждой из соединяемых точек, а затем подтвердить изображение получившейся линии, кликнув центральной кнопкой. Система настроена на продолжение соединения точек, прервать операцию соединения можно правой кнопкой мыши.



Рисунок 3.6 – Выбор способа построения линий

После построения линий рекомендуется сохранить результаты работы с в отдельную папку, назвав её к примеру "Lines". Это позволит в дальнейшем вернуться к исходной геометрии в случае её повреждения во время нанесения блоков и сеточной модели.

В результате должна получиться следующая геометрическая модель области расчёта (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Геометрическая модель области расчёта

### 3.2 Построении блочной структуры расчётной сетки

Полученная в предыдущем разделе геометрическая модель используется как основа для построения блочной структуры сетки. На первом шаге происходит создание блока. Выбирается закладка "Blocking" и графическое меню построения блока "Create Block" (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Выбор меню построения блока

Затем необходимо задать способ построения блока. В области "Initialize blocks" выбирается тип блока "Туре" – "2 D Planar" (рисунок 3.9). Нажатие на кнопку "ОК" приведёт к появлению первоначального прямоугольного блока в рамках габаритов геометрии используемой при этом модели (рисунок 3.10).

Create Block	ą
Part SOLID	
Inherit Part Name	
Create Block	
Initialize Blocks	
Type 2D Planar 3D Bounding Box 2D Surface Blecking	





Рисунок 3.10 – Внешний вид первоначального блока

Затем выполняется разделение блока и удаление лишних элементов. Главная цель создать блочную структуру максимально описывающую используемую геометрическую модель.

В закладке "Blocking" необходимо выбрать графическое меню "Split Block" (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Выбор меню разделения блока

Затем необходимо выбрать способ разделения блока "Split Block" (рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 – Выбор способа разделения блока

После чего конкретизируется метод разделения. В нашем случае это использование опорной точки. Для этого в области "Split Method" из выпадающего меню выбирается метод "Prescribed point" (рисунок 3.13).

Split Metho	od
Split Method	Prescribed point
	Screen select
Point	Prescribed point
Fornet	Relative
	Absolute
	Curve parameter

Рисунок 3.13 – Выбор метода разделения блока

Разделение блока происходит путём указания грани блока "Edge" и точки "Point" по которой должно произойти разделение. Для этого необходимо кликнуть на кнопке "Select edge(s)" (рисунок 3.14), а затем левой кнопкой мыши указать грань, которую необходимо разделить. После чего аналогично выбирается точка по которой должно произойти разделение.

Split Block Block Select	
Visible C Selected Block(s)	
Copy distribution from hearest parallel     edge     Project vertices	[Selfct edge(s]]

Рисунок 3.14 – Подготовка к указанию грани блока

Разделение исходного блока необходимо выполнить так как показано на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15 – Разделение исходного блока

Далее при помощи операции удаление блока выполняется приведение блочной структуры к геометрической модели. Выбор меню удаления блока показан на рисунке 3.16. Левой кнопкой мыши выделяется удаляемый блок, а затем подтверждается его удаление нажатием на центральную кнопку.

ICEM CFD 14.5 - (ANSYS Solvers) : project1			
File Edit View Info Settings Windows Help			
Image: Construction of the second state of the second s	Output		
Delete Block     ?       Blocks     ((k))       Delete permanently     ((k))			

Рисунок 3.16 – Выбор меню удаления блока

Получившаяся блочная структура представлена на рисунке 3.17.



Рисунок 3.17 – Результат удаления блоков

Затем выполняется "натягивание" блоков на "каркас" геометрической модели. Для это используется ассоциация точек модели и вершин блочной структуры.

Выбирается меню "Associate" и тип ассоциации "Associate vertex" (рисунок 3.18).

ICEM CFD 14.5 - (ANSYS Solvers) : project1	
File Edit View Info Settings Windows Help	
Image: Construction     Image: Construction     Geometry     Mesh     Blocking     Edit Mesh       Image: Construction     Image: Construction     Image: Construction     Image: Construction     Image: Construction	) Output ] 🖗 🧟 🌠 🔗 🛞
Model     Geometry     Subsets     Vertices     Faces     Blocks     Pre-Mesh     Topology     Parts	
Associate Vertex ->	
Entity         C Self          • Point         C Curve          Surface         Vertex          \$\$	
Point 📈	

Рисунок 3.18 – Выбор способа ассоциации элементов блока и геометрической модели

В районе зазора между тарелью и седлом клапана эта ассоциация выглядит так как показано на рисунке 3.19. В районе выходного сечения расчётной области и оси симметрии ассоциация выполняется аналогичным образом. Результат выполнения ассоциации представлен на рисунке 3.20.

Кроме этого для геометрического замыкания блочной модели необходимо ассоциировать её границы с границами геометрической модели. Соответствующее меню представлено на рисунке 3.21.



Рисунок 3.19 – Ассоциация блоков в районе тарели клапана



Рисунок 3.20 – Результат ассоциации блоков в районе тарели



Рисунок 3.21 – Меню ассоциации граней блоков и линий

После ассоциации блоков с геометрической моделью требуется задать название граням будущей сеточной модели. Это необходимо для того, чтобы после импорта расчётной сетки в программу решатель можно было ссылаться на конкретные грани при задании граничных условий.

В дереве модели необходимо кликнуть правой кнопкой мыши на меню "Parts" и в появившемся списке команд выбрать "Create part" (рисунок 3.22).



Рисунок 3.22 – Задание названия участка

Затем задаётся название участка и указание его месторасположения (рисунок 3.23).

Рисунок 3.23 – Задание названия "Parts"

Для задания параметров сетки, размеров ячеек и степени их сгущения используется команда "Pre-Mesh Param" (рисунок 3.24).



Рисунок 3.24 – Выбор команды задания параметров расчётной сетки

Параметры сетки задаются в меню "Edge params". В строке "Nodes" задаётся количество узлов, на которые происходит разбиение грани. Выбирается способ "Copy Parameters" – "To All Parallel Edges" (рисунок 3.25).

Pre-Mesh Parar	ns		Ŷ
Meshing Para			
Edge		rtis .).	
Length		Select e	dge(s)
Nodes		▲ ▼	
Mesh law	BiGeometric	•	
Spacing 1		Γ	
🔲 Sp1 Linked	Select	Reverse	
Ratio 1		Γ	
Spacing 2		Γ	
🔲 Sp2 Linked	Select	Reverse	
Ratio 2		Γ	
Max Space		Γ	
🔲 Spacing Rela	ative		
🗌 Nodes Locke	d		
Copy Parameters L	ocked ters		
Method To All	Parallel Edges	$\overline{\mathbf{\cdot}}$	)

Рисунок 3.25 – Параметры граней сеточной модели

Значения параметров сетки находятся в задании к лабораторной работе. Результат разметки расчётной сетки можно проверить выбрав "Pre-Mesh" в меню дерева модели (рисунок 3.26).



#### Рисунок 3.26 – Проверка разметки расчётной сетки

Создание расчётной сетки выполняется командой "Convert To Unstruct Mesh" (рисунок 3.27).



Рисунок 3.27 – Генерация расчётной сетки

Далее получившуюся сетку необходимо подготовить к импорту в программу решатель. В расчётах будет использоваться ANSYS Fluent. Для этого в меню "Output" выбирается команда "Output to fluent". Необходимо последовательно утвердительно ответить на все вопросы. После чего в рабочей папке появится файл сетки с расширением \*.msh.

### 3.3 Разработка численной модели

После запуска ANSYS Fluent в появившемся окне настройки запуска peшения необходимо выбрать "2D Dimension", а также выбрать рабочую папку в "Working Directory" (рисунок 3.28).

E Fluent Launcher		
<b>ANSYS</b>	Fluent Launcher	
Display Options Display Mesh After Reading Display Mesh After Reading Display Mesh Color Scheme	Options  Double Precision  Use Job Scheduler  Use Remote Linux Nodes  Processing Options Serial  Parallel (Local Machine) Number of Processes 8	
Show Fewer Options		
Show Fewer Options          General Options       Parallel Settings       Scheduler       Environment         Version       14.5.0 <ul> <li>Pre/Post Only</li> <li>Working Directory</li> <li>D:VAts_tmp</li> <li>Fluent Root Path</li> <li>C:\Program Files\ANSYS Inc\v145\fluent</li> <li>Ise Journal File</li> <li>Ise Journal File</li> </ul>		
QKef.	ault <u>C</u> ancel <u>H</u> elp <b>v</b>	

Рисунок 3.28 – Меню настройки запуска Fluent

Далее выполняется

- загрузка расчётной сетки (рисунок 3.29);
- масштабирование модели (рисунок 3.30);
- настройка решателя (рисунок 3.31);
- выбор жидкости в качестве рабочей среды (рисунок 3.32);

- задание свойств рабочей среды (рисунок 3.33);
- выбор модели турбулентности (рисунок 3.34);
- задание граничных условий на входе (рисунок 3.35);
- задание граничных условий на выходе (рисунок 3.36);
- задание граничных условий осевой симметрии (рисунок 3.37);
- выбирается метод решения (рисунок 3.38);
- задаются параметры решателя (рисунок 3.39);
- выполняется инициализация расчёта (рисунок 3.40);
- выполняется запуск процесса решения (рисунок 3.41);
- анализ результатов расчёта выполняется по виду полей распределения газодинамических параметров в расчётной области (рисунок 3.42).



Рисунок 3.29 – Команды загрузки расчётной сетки

Iluent Parallel Fluent@aseu_324_4 [2d, dp, pbns, lam]					
File Mesh Define So	File Mesh Define Solve Adapt Surface Display Report Parallel View Help				
1 🔜 1 📂 🕶 🔜 🔻 🚳					
Meshing	General Window 1				
Mesh Generation	Mech				
Solution Setup General Models Materials	Scale Check Report Quality Display				
Phases Cell Zone Conditions Boundary Conditions Mesh Interfaces Dynamic Mesh Reference Values	Solver Type Press Domain Extents Xmin (m) Xmax (m) 25 Convert Units				
Solution Solution Methods Solution Controls Monitors Solution Initialization Calculation Activities Run Calculation	Time     Stea     Specify Scaling Factors       Tran:     Ymin (m)     Ymax (m)       Tran:     View tength Unit In       Grant     Mesh Was Created In       X     1				
Results Graphics and Animations Plots Reports	Help Scale Unscale Close Help				

Рисунок 3.30 – Команды масштабирования модели





🖸 fluent Parallel Fluent@aseu_324_4 [axi, dp, pbns, lam]			
File Mesh Define So	Ive Adapt Surface Display Report Parallel Vie	ew Help	
1 📖 1 📂 <b>- 🔛 -</b> 🔟	◎  5┣ՉႡ <b>↗</b>   Ⴁ똤喘▾□▼		
Meshing Meshing Mesh Generation Solution Setup General Models Materials Dramit Mesh Reference Values Solution Solution Meshods Solution Meshods Solution Meshods Solution Initialization Calculation Activities Run Calculation Results Graphics and Animations Plots	Cell Zone Conditions Zone sold Phase Internet ID mixture fluid 11 Edt Copy Profiles	Window 1	
Reports	Parameters Operating Conditions		
Fluid	Porous Formulation		
Zone Name solid Material Name air Frame Motion Mesh Motion Porous Zone Reference Frame This page is not a	Source Terms Fixed Values Mesh Motion   Porous Zone   Embedded LES   Reaction   pplicable under current settings.	Source Terms   Fixed Values   Multiphase   ed1 ed1 ed1	
	OK Cancel Help	ed!	
		Done.	

### Рисунок 3.32 – Команды выбора рабочей среды

fluent Parallel Fluent@aseu	324_4 [axi, dp,	pbns, lam]	Darallel Vi	ew Heln		1000
	Adapt Surface			ew Help		
	in Flore	<b>▲ ∥ ∥ ۹4</b> /∧ III	a : 🖂 .	lur L A		
eshing Ma	terials			Window 1		•
Mesh Generation	orials					
Conoral Flu	id air		_			
Models	id Numuu m					
Materials Discos	aiuminum					
Cell Zone Conditions						
Create/Edit Materials						<b>—</b> X
ame					Order	Materials by
air		Material Type				Name
hemical Formula		India			- O	Chemical Formula
		<ul> <li>Fluent Fluid Materials</li> </ul>				luent Database
		air			▼ Use	-Defined Database
		none				
roperties		lione				
Density (kg/mg)	-			-		
	deal-gas		- Edit.			
1	$\sim$					
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	ronstant		- Edit.			
<u>í</u>	1006.43			=		
	10001.0					
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant		▼ Edit.			
	0.0242			_		
Maranalta (ka da a) (						
viscosity (kg/m-s)	constant		▼ Edit.			
	1.7894e-05					
				•		
	Change/Create	Delete	Close	Help		

Рисунок 3.33 – Команды задания свойств рабочей среды

💶 fluent Parallel Fluent@aseu_324_4 [axi, dp, p	obns, lam]
File Mesh Define Solve Adapt Surface	Display Report Parallel View Help
ं 🔳 🛯 😴 🗕 🖌 💽 🞯 🗐 💭 🕀 🍳 🕀	2 〃 ◎ 久 唱 - □ -
Meshing Models	Window 1
Mesh Generation Medala	
Solution Setup	
General Energy - On	
Models Viscous - Laminar	
Heat Exchanger - Off	
Cell Zone Conditions Species - Off Discrete Phase - Off	
Boundary Conditions Solidification & Melting	a-Off
Mesh Inte	
Reference Model	Model Constants
Solution O Inviscid	Alpha* inf
Solution N 🖉 Laminar	1
Solution Q Spalart-Allmaras (1 eqn)	
Solution II ( ) k-omega (2 eq.)	Alpha_inf
Calculatio Transition K-kl-omega (3 eqn)	0.52
Run Calcu O Transition SST (4 eqn)	Alpha_0
Calle-Adaptive Simulation (SAS)	0.11111
Plots	Beta* inf
Reports Chandrad	0.09
standard     sst	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	User-Defined Functions
k-omega Options	Turbulent Viscosity
Compressibility Effects	none 💌
	Prandtl Numbers
Options	Energy Prandtl Number
Viscous Heating	none
	Wall Prandtl Number
	none 🔻
	-
$ \sim $	
ОК	Cancel Help
	Warning: Flo

Рисунок 3.34 – Команды выбора модели турбулентности

fluent Parallel Fluent(	@aseu_324_4 [axi, dp, pbns, sstkw]	
File Mesh Define S	olve Adapt Surface Display Report Parallel V	/iew Help
IIII   📂 🖬 🕶 🖻		
		Window 1
Meshing	Boundary Conditions	_
Mesh Generation	Zone	
Solution Setup	exis	
General	inlet	
Models	autet	
Materials	tarel	
Phases	wall	
Cell Zone Conditions	youbka	
Mesh Interfaces		
Dynamic Mesh		
Reference Values		
Solution		
Solution Methods		
Solution Controls		
Monitors		
Solution Initialization		
Calculation Activities		
Run Calculation	Phase ID ID	
Results	mixture v pressure-inlet v 13	
Graphics and Animations		
Plots	Edit Copy Profiles	
Reports	Parameters Operating Conditions	
	Display Mesh Borindic Conditions	
	Display Mesilian Periodic Conditions	
_		_
🛛 🖸 🖸 🖸	ressure Inlet	
Zone	Name	_
inle	t	
Mor	mentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase	e UDS
		· · · []]
	Reference Frame Absolute	
	Gauge Total Pressure (pastal) 20000	constant -
		constant
Sup	ersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)	constant v
	·	
	Direction Specification Method Normal to Boundary	
Tur	bulence .	
	buchce	
	Specification Method Intensity and Viscosity	Ratio
	Turbulent Intens	sity (%) 5
		e
	Turbulent Viscosi	ty Ratio 10 b
	OK Cancel He	P b
1		type to symmetry

Рисунок 3.35 – Команды задания граничных условий на входе

fluent Parallel Fluent@a	aseu_324_4 [axi, dp, pbns, sstkw]	
<u>File M</u> esh D <u>e</u> fine <u>S</u> oh	ve <u>A</u> dapt S <u>u</u> rface <u>D</u> isplay <u>R</u> eport Parallel <u>V</u> ie	ew <u>H</u> elp
i 🔳 i 📂 🕶 🖬 🕶 🔟	❷ 🕼 🔁 € € 🖋 🔍 📜 ▼ 🔲 ▼	
Meshing	Boundary Conditions	Window 1
Mesh Generation	Zone	
Solution Setup	axis inlet	
Models	int-solid	
Materials	tore	
Cell Zone Conditions	wall youbka	
Boundary Conditions		
Dynamic Mesh		
Reference Values		
Solution		
Solution Methods Solution Controls		
Monitors		
Solution Initialization Calculation Activities		
Run Calculation	Phase ID ID	
Results	mixture outlet-vent 15	
Graphics and Animations Plots	Edit Copy Profiles	
Reports	Parameters Operating Conditions	
	Display Mesh Periodic Conditions	
<u> </u>		
Cutlet Ver	it	
Zone Name		
outlet		
Momentum	Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS	1
· · · · ·		<u> </u>
	Gauge Pressure (pascal) 0	tant 🔹 ai
Backflow Dire	ction Specification Method From Neighboring Cell	
Average F	Pressure Specification	
Target Ma	iss Flow Rate	iai
	polynomial	▼ Edit laı
Turbulence		$\sim$
	Specification Method Intensity and Viscosity Ratio	
	Backflow Turbulent Intensity (%)	
		P   im
	Backflow Turbulent Viscosity Ratio 10	P .
	<sup>×</sup>	.01
	OK Tancel Help	
		Note: Enabling energy

Рисунок 3.36 – Команды задания граничных условий на выходе



Рисунок 3.37 – Команды задания граничных условий осевой симметрии

fluent Parallel Fluent@aseu_324_4 [axi, dp, pbns, sstkw]						
<u>F</u> ile <u>M</u> esh D <u>e</u> fine <u>S</u> ol	lve <u>A</u> dapt S <u>u</u> rface <u>D</u> isplay <u>R</u> eport Para <u>l</u> lel <u>V</u> i					
i 📖 i 📂 🕶 🖬 🕶 🚳	❷∥\$\$ €•€ € ↗∥® % I∥ • □ •					
Meshing Mesh Generation Solution Setup General Models Materials Phases Cell Zone Conditions Boundary Conditions Mesh Interfaces Dynamic Mesh Reference Values Solution Solution Methods Solution Solution Methods Solution Controls Monitors Solution Initialization Calculation Activities Run Calculation Results Graphics and Animations Plots Reports	Solution Methods  Pressure-Velocity Coupling  Scheme Coupled  Spatial Discretization  Gradient Veast Squares Cell Based  ressure Second Orde Density Second Orde Upwind  Turbulent Kinetic Energy Vecond Order Upwind  Transent Formulation  Transent Formulation  Piseudo Transient  High Order Term Relaxation Options  Default					

### Рисунок 3.38 – Команды выбора метода решения

fluent Parallel Fluent@aseu_324_4 [axi, dp, pbns, sstkw]						
<u>F</u> ile <u>M</u> esh D <u>e</u> fine <u>S</u> o	lve <u>A</u> dapt S <u>u</u> rface <u>D</u> isplay <u>R</u> eport Para <u>l</u> lel <u>V</u> ie					
i 💼 i 📂 🕶 🖬 🔻 🔟	@  \$€€€₹∥ ®Ҳ⊪-□-					
Meshing	Solution Controls					
Mesh Generation	Flow Courant Number					
Solution Setup	5					
General Models	Explicit Relaxation Factors					
Materials Phases	Momentum 0.75					
Cell Zone Conditions Boundary Conditions	Pressure 0.75					
Mesh Interfaces Dynamic Mesh Reference Values	Under-Relaxation Factors					
Solution	Density					
Solution Methods	1					
Solution Controls	Body Forces					
Solution Initialization	1					
Calculation Activities	Turbulent Kinetic Energy					
Run Calculation	0.8					
Graphics and Animations						
Plots	0.8					
Reports						
	Turbulent Viscosity					
	1 					
	Default					
	Equations) Limits) Advanced					

Рисунок 3.39 – Команды выбора параметров решателя 33





💶 fluent Parallel Fluent@aseu_324_4 [axi, dp, pbns, sstkw]						
<u>File M</u> esh D <u>e</u> fine <u>S</u> o	lve <u>A</u> dapt S <u>u</u> rface <u>D</u> isplay <u>R</u> eport Para <u>l</u> lel <u>V</u> i					
i 🔳 i 📂 🖌 🖬 🕶 🔟	@ \$₽€€ / !@ %					
Meshing Mesh Generation Solution Setup General Models Materials Phases Cell Zone Conditions Boundary Conditions Mesh Interfaces Dynamic Mesh Reference Values Solution Solution Methods Solution Solution Controls Monitors Solution Initialization Calculation Activities <u>Run Calculation</u> Results Graphics and Animations Plots Reports	Run Calculation     Check Case   Preview Mesh Motion   Number of Iterations   500   1   Profile Update Interval   1   V   Data File Quantities   Acoustic Signals   Help					

Рисунок 3.41 – Команды запуска процесса решения

fluent_0 Parallel Fluent	@aseu_324_4 [axi, dp, pbns, sstkw]
<u>File M</u> esh D <u>e</u> fine <u>S</u> ol	lve <u>A</u> dapt S <u>u</u> rface <u>D</u> isplay <u>R</u> eport Para <u>l</u> lel <u>V</u> ie
i 🛋 i 💕 🕶 🖬 🕶 🞯	❷∥\$3 €€ € ↗∥ @ 次 開 - □ -
Meshing Mesh Generation Solution Setup General Models Materials Phases Cell Zone Conditions Boundary Conditions Boundary Conditions Mesh Interfaces Dynamic Mesh Reference Values Solution Solution Methods Solution Solution Methods Solution Controls Monitors Solution Initialization Calculation Activities Run Calculation Resulte	Graphics and Animations Graphics Graphics Mesh Contours Vectors Pathlines Particle Tracks Set Up Animations Sweep Surface Scene Animation Solution Animation Playback Set Up
Fraphics and A imations Plots Reports	Options Scene Views Lights Colormap Annotate
Contours	
Options  Filled  Node Values  Auto Range  Clip to Range  Draw Profiles  Draw Mesh  Levels  Surface Name Pattern	Contours of Velocity Mach Number Min Max 1.087138e-06 0.8541486 Surfaces axis inlet int_solid outlet tarel wal New Surface ▼
Display	ch Surface Types
Display	Compute Close Help

Рисунок 3.42 – Команды анализ результатов расчёта

# 4 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАСЧЁТУ



Таблица 4.1 – Исходные данные для расчёта

N⁰	Диаметр	Диаметр	Диаметр	Высота	Давление	Давление
вари-	горла, <i>d</i> <sub>v</sub> ,	упло-	тарели,	подъёма	В	окружающей
анта	ММ	тнения,	ММ	тарели,	ёмкости,	среды, $p_a$ ,
		<i>d</i> <sub><i>c</i></sub> , MM		<i>x</i> , MM	$p_I$ , кг/см <sup>2</sup>	мм, кг/см <sup>2</sup>
1	100	102	104	5	3,5	0
2	50	52	54	8	0,5	0,2
3	75	77	80	6	1,5	0
4	100	102	120	5	3,5	0
5	150	152	154	10	2	0

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бугаенко, В.Ф. Пневмоавтоматика ракетно-космических систем [Текст] / В.Ф. Бугаенко - М.: Машиностроение, 1979. - 168 С.
- Кондратьева, Т.В. Предохранительные клапаны [Текст] / Т.В. Кондратьева Л.: Машиностроение, 1976. 232 С.
- Невинский, В.В. Влияние защищаемой системы на работу предохранительного клапана [Текст] / В.В. Невинский, В.И. Розенблюм, Ю.И. Тарасьев, А.М. Тарасенко // Гидравлические и гидродинамические исследования арматуры. Сб. науч. тр. Центр. КБ арматуростроения . -1981. - Л. - С. 42-50
- Попов, Д.М. Влияние режимов течения в клапанных изделиях и структуры потока на устойчивость предохранительного клапана [Текст] / Д.М. Попов, П.В. Отрошко // Вестник машиностроения. 1982. № 6 С. 6-9
- Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Text] / F.R. Menter // AIAA Journal. - 1994. - Vol. 32, No 8., P. 1598–1605
- Smagorinsky, J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment [Text] / J. Smagorinsky // Monthly Weather Review. - 1963. - Vol. 91, No 3. P. 99–164