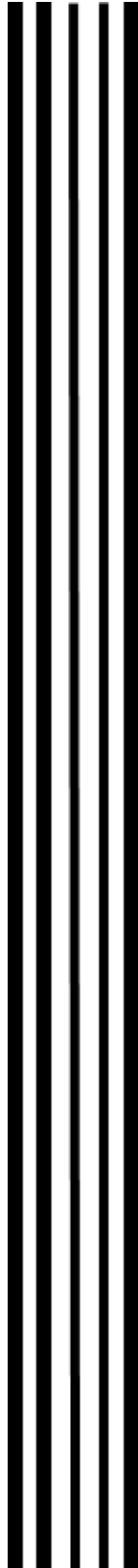


**КГЭУ**



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Практикум

Казань  
2021

УДК 004.94  
ББК 22.31  
К63

**К63      Компьютерные технологии при проектировании технологических процессов** : практикум / составители: В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, Г. Р. Бадретдинова. – Казань : КГЭУ, 2021. – 73 с.

Практикум содержит краткие теоретические сведения, описание построения трехмерных моделей, проведение численного моделирования.

Предназначен для обучающихся по образовательной программе направления подготовки 16.04.01 Техническая физика, направленность (профиль) «Теплофизика».

УДК 004.94  
ББК 22.31

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день неперенным условием повышения эффективности управленческого труда являются оптимальные компьютерные технологии, обладающие гибкостью, мобильностью и адаптивностью к внешним воздействиям. Компьютерные технологии предполагают умение грамотно работать с информацией и вычислительной техникой.

Под компьютерными технологиями понимают сочетание процедур, реализующих функции сбора, получения, накопления, хранения, обработки, анализа и передачи информации в организационной структуре с использованием средств вычислительной техники или, иными словами, совокупность процессов циркуляции и переработки информации и описание этих процессов.

Целью практикума является ознакомление студентов с существующими коммерческими *CFD (computational fluid dynamics)* пакетами для решения задач газовой динамики и гидромеханики и обретение навыков работы с одним из типичных пакетов.

В процессе подготовки к лабораторной работе студент должен усвоить теоретический материал, изучить и ясно представить себе содержание и порядок выполнения работы, знать принципы действия и особенности моделируемых конструкций, правила техники безопасности, ответы на приведенные в практикуме контрольные вопросы, а также выполнить необходимый по заданию объем предварительных расчетов, заготовить необходимые таблицы и рисунки, оформить отчет.

Для освоения дисциплины студент должен:

- знать теоретические основы о составе, свойствах и строении веществ, основные физические законы;
- уметь пользоваться нормативно-методической документацией и справочниками системы автоматизированного проектирования технологических процессов;
- владеть математическими методами дифференцирования и интегрирования функций, основами математического моделирования, основными методами теоретического и экспериментального исследования.

## **УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

1. К работе с персональным компьютером допускаются лица, ознакомленные с его устройством, принципом работы и методическими указаниями, представленными в данном практикуме.

2. Вход в лабораторию осуществляется только по разрешению преподавателя.

3. На первом занятии преподаватель проводит инструктаж по технике безопасности и напоминает студентам о бережном отношении к лаборатории и о материальной ответственности каждого из них за сохранность оборудования и обстановки лаборатории.

4. При ознакомлении с рабочим местом необходимо проверить наличие комплектности оборудования и соединительных проводов (в случае отсутствия какого-либо элемента следует немедленно сообщить об этом преподавателю).

5. Если во время проведения работы замечены какие-либо неисправности оборудования, нужно немедленно сообщить об этом преподавателю.

6. После окончания лабораторной работы необходимо привести в порядок рабочее место.

## Лабораторная работа № 1

### ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ ЦИКЛОННОГО СЕПАРАТОРА

**Цель работы** – изучение конструкции и принципа действия циклонного сепаратора, построение трехмерной модели устройства в соответствии с приведенными вариантами.

#### Краткие теоретические сведения

*Циклоны или циклонные сепараторы* – устройства фильтрации, которые используют центробежную силу инерции для удаления твердых частиц из загрязненного воздуха. Циклонные сепараторы являются одним из нескольких устройств фильтрации загрязненного воздуха, поскольку они удаляют крупные фракции частиц.

Это помогает фильтрам с более тонкой степенью фильтрации, которые установлены после циклонных сепараторов, бороться с крупными частицами загрязнений и отфильтровывать только малые фракции, тем самым обеспечивать длительное время эксплуатации фильтровальной установки. Кроме того, несколько циклонных сепараторов могут работать параллельно, и эта система известна как мультициклон.

Важно отметить, что циклоны могут значительно отличаться по своим размерам. Размер циклона в значительной степени зависит от того, какое количество воздуха нужно фильтровать, следовательно, большие объемы требуют больших циклонов. Например, могут существовать несколько различных моделей одного типа циклонов, а размеры варьируются от относительно небольших 0,2 м высотой до 1,8 м.

Циклонные сепараторы работают так же, как центрифуга. В циклонном сепараторе загрязненный воздух подает в камеру. Внутри камеры воздух течет по спирали, подобно торнадо, начиная с верхней части циклона. Чистый воздух имеет меньшую инерционность, поэтому он, благодаря форме камеры, проходит далее по магистрали, а твердые частицы под воздействием инерционной центробежной силы отфильтровываются. Частицы ударяются о внутренние стенки камеры и опускаются в емкость для сбора. Нижняя часть камеры имеет форму конуса, тем самым способствует оседанию частиц в бункере. Очищенный воздух движется дальше по магистрали через верхнюю часть сепаратора.

В основном циклоны построены для фильтрации частиц загрязнений диаметром более 10 мкм. Тем не менее существуют циклонные фильтры, которые спроектированы для того, чтобы фильтровать частицы размером до 2,5 мкм. Стоит также учитывать, что эти сепараторы неэффективно удаляют твердые частицы больших размеров, к примеру пыль размером около 200 мкм.

Из всех устройств фильтрации сжатого воздуха циклонные сепараторы являются одними из наименее дорогих. В основном их используют для предварительной фильтрации, чтобы воздух попадал в фильтр с меньшим количеством загрязнений.

Преимущества циклонных фильтров:

- как правило, циклонные фильтры могут удалить примерно 50–99 % всех загрязнений в сжатом воздухе, но это во многом зависит от размера частиц;

- циклонные сепараторы не дорогие для установки и обслуживания, не имеют движущихся частей. Именно за счет этого снижаются затраты на техническое обслуживание и эксплуатацию;

- отфильтрованные твердые частицы собираются в сухом виде, что облегчает их удаление;

- занимают малую площадь и имеют возможность работы при высоких температурах;

- циклонный фильтр помогает экономить деньги, увеличивая срок службы рукавных и картриджных фильтров. Он улавливает большинство пылевых частиц до попадания в фильтреlementы, за счет этого они не будут заполняться так быстро.

Несмотря на их эффективность, существуют и недостатки использования циклонных фильтров. Стандартные модели не могут эффективно очистить частицы пыли малых размеров, также они имеют высокие эксплуатационные расходы и не способны хорошо обрабатывать липкие материалы [1].

### **Задание на выполнение лабораторной работы**

Выполните построение трехмерной геометрии циклонного сепаратора. Толщину стенок примите равными 1 мм.  $D$  – числовое значение диаметра цилиндрического корпуса, мм.

Таблица 1.1

## Числовое значение диаметра цилиндрического корпуса

№ варианта	$D$ , мм
1	50
2	70
3	90
4	110
5	130
6	150
7	170
8	190
9	210
10	230
11	55
12	85
13	95
14	115
15	135
16	145
17	155
18	165
19	25
20	35

## Методика выполнения лабораторной работы

1. Постройте циклонный сепаратор по данным, представленным на рис. 1.1 и в табл. 1.1 [2].

Таблица 1.1

## Геометрические размеры циклонного сепаратора

$a/D$	$b/D$	$B_c/D$	$D_x/D$	$h/D$	$H_t/D$	$S/D$	$L_i/D$	$L_e/D$
0,5	0,2	0,36	0,5	1,5	4	0,5	1,0	0,5

2. Примите за диаметр корпуса циклонного сепаратора  $D = 200$  мм. Тогда  $a = 100$  мм;  $b = 40$  мм;  $B_c = 72$  мм;  $D_x = 100$  мм;  $h = 300$  мм;  $H_t = 800$  мм;  $S = 100$  мм;  $L_i = 200$  мм;  $L_e = 100$  мм.

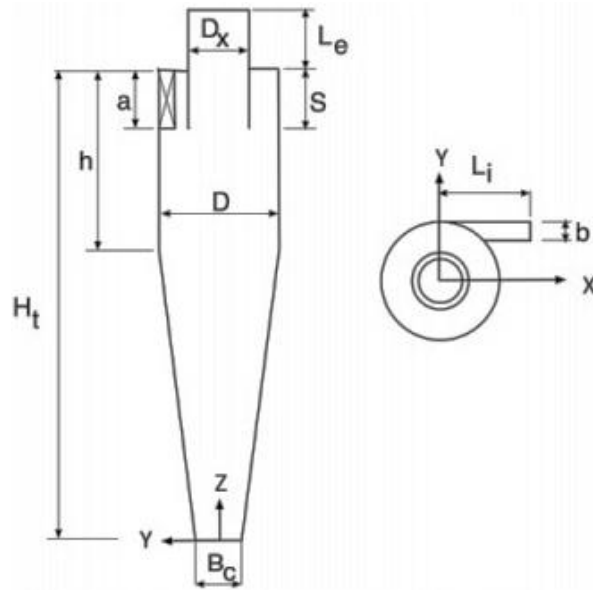


Рис. 1.1. Размеры циклонного сепаратора

3. Перейдите к созданию модели. В программе SpaceClaim создайте эскиз. Для этого выберите плоскость ZX. В верхней панели выберите «Режим эскиза». Далее наведением мыши на центр экрана укажите плоскость ZX (рис. 1.2). Также для удобства работы рекомендуется нажать «Вид сверху» в верхней панели управления.

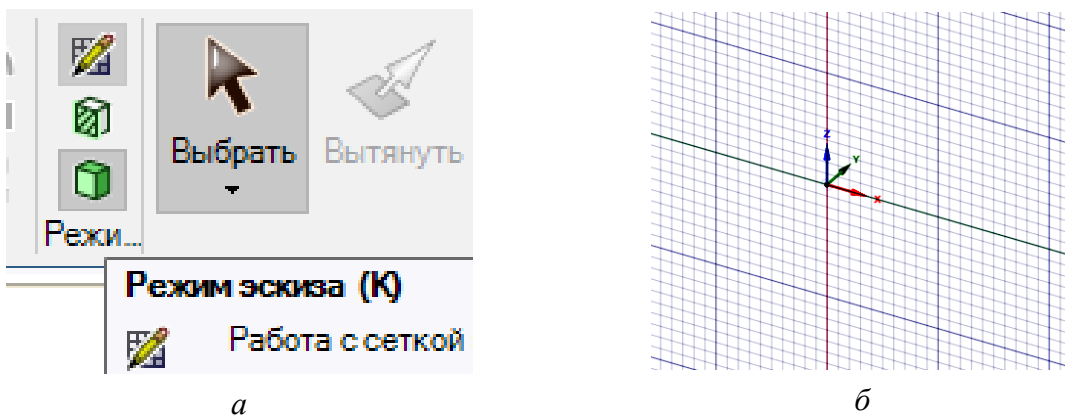


Рис. 1.2. Режим эскиза:

*a* – выполнение команды «Режим эскиза»; *б* – выполнение команды «Вид сверху»

Вертикальная длина корпуса циклонного сепаратора составляет  $H_t = 800$  мм. Длина цилиндрической части  $h = 300$  мм при ее диаметре 200 мм. Длина конусообразной части составляет  $800 - 300 = 500$  мм. Диаметр выходного отверстия составляет  $B_c = 72$  мм. Перейдите к построению корпуса в плоскости ZX. Для этого сперва с помощью прямоугольника нарисуйте цилиндрическую часть корпуса с размерами 300 и 100 мм (рис. 1.3).



Диаметр разделите на 2, так как переход от двухмерного эскиза к трехмерной модели будет осуществляться через вращение.

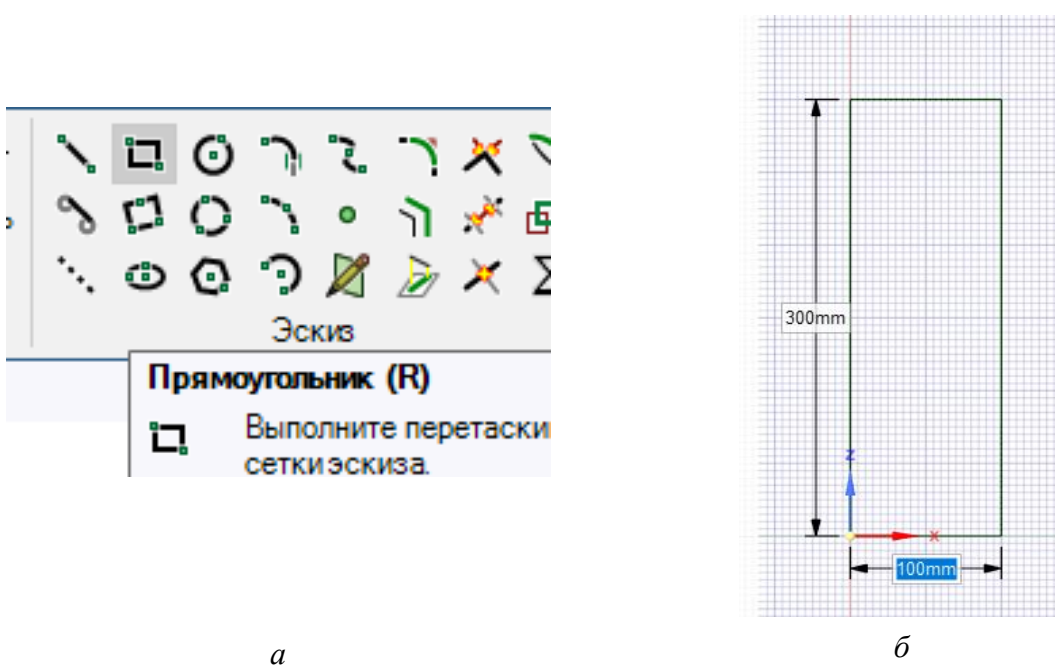


Рис. 1.3. Создание цилиндрической части корпуса:  
*a* – создание прямоугольника; *б* – построение плоскости ZX

4. Нарисуйте конусообразную часть циклона – прямоугольник размерами 500 и 36 мм от начала координат (рис. 1.4).

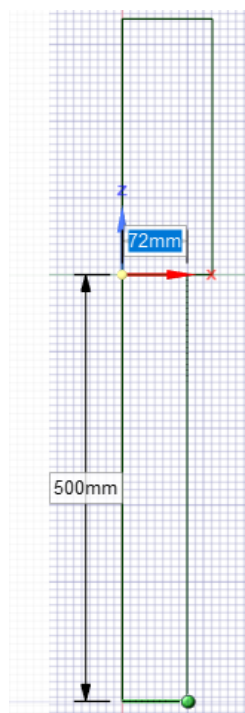
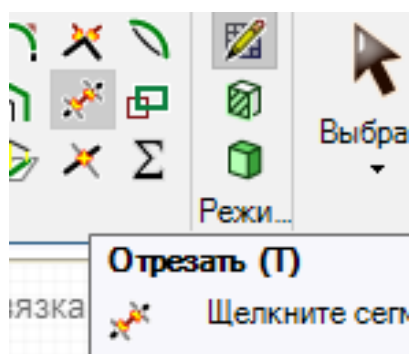
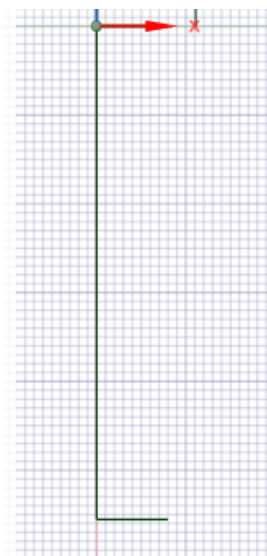


Рис. 1.4. Создание конусообразной части

5. Удалите лишние линии, воспользуйтесь командой «Отрезать» (рис. 1.5).



*a*



*б*

Рис. 1.5. Создание корпуса циклонного сепаратора:  
*a* – выполнение команды «Отрезать»; *б* – удаление линий

6. Замкните эскиз. Для этого линией соедините крайние точки (рис. 1.6).

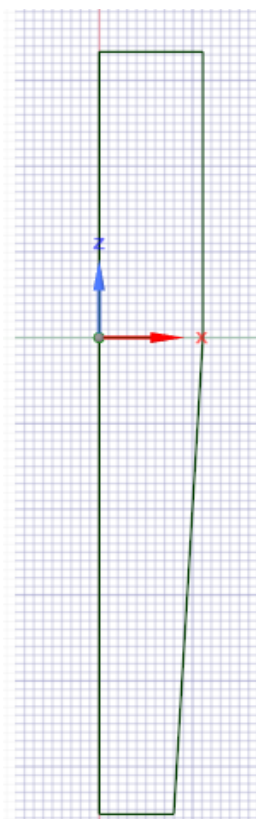


Рис. 1.6. Создание замкнутого эскиза

Для перехода к трехмерной модели воспользуйтесь командой «Вытянуть» (рис. 1.7).

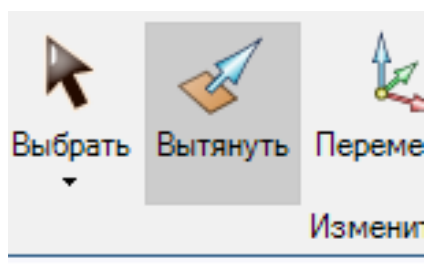


Рис. 1.7. Команда «Вытянуть»

Далее выберите эскиз и нажмите «Повернуть». После чего выберите центральную линию (рис. 1.8).

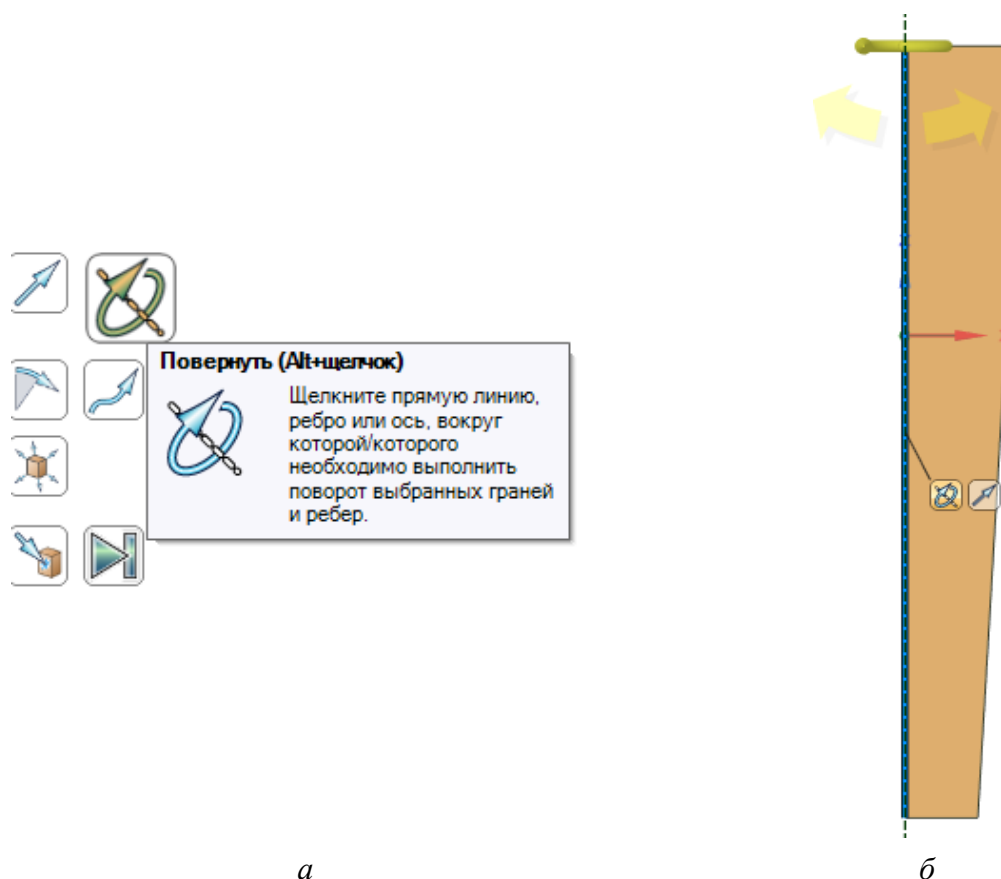
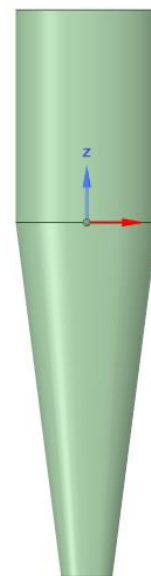
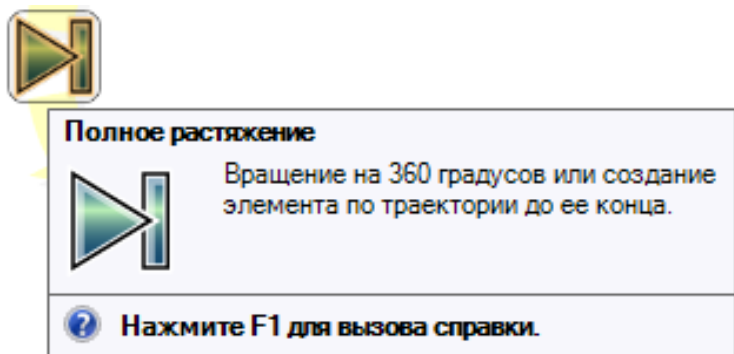


Рис. 1.8. Команда «Повернуть»:  
*a* – выполнение поворота эскиза; *б* – выбор центральной линии

Далее выберите «Полное растяжение» (рис. 1.9).

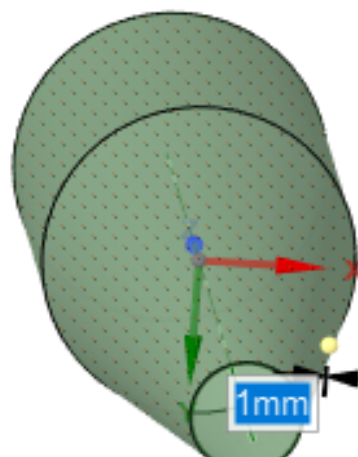
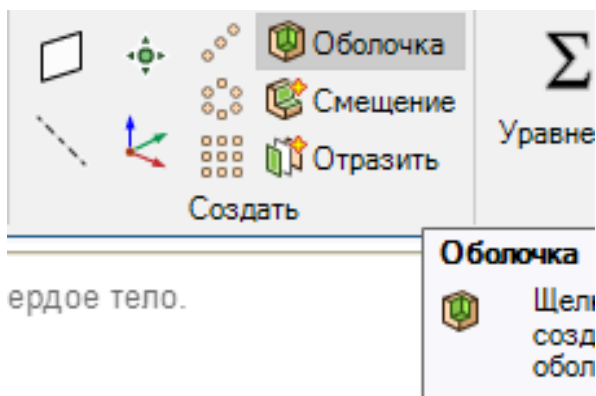


*a*

*б*

Рис. 1.9. Команда «Полное растяжение»:  
*a* – выполнение растяжения модели; *б* – модель после растяжения

7. Задайте толщину стенки циклонного сепаратора 1 мм. Для этого воспользуйтесь командой «Оболочка» и выберите нижнюю грань (рис. 1.10).



*a*

*б*

Рис. 1.10. Создание стенок толщиной 1 мм:  
*a* – выполнение команды «Оболочка»; *б* – выбор нижней грани

8. Выберите верхнюю грань циклона и нажмите «Вид сверху». После чего перейдите в режим эскиза. В центре постройте окружность диаметром  $D_x = 100$  мм (рис. 1.11).

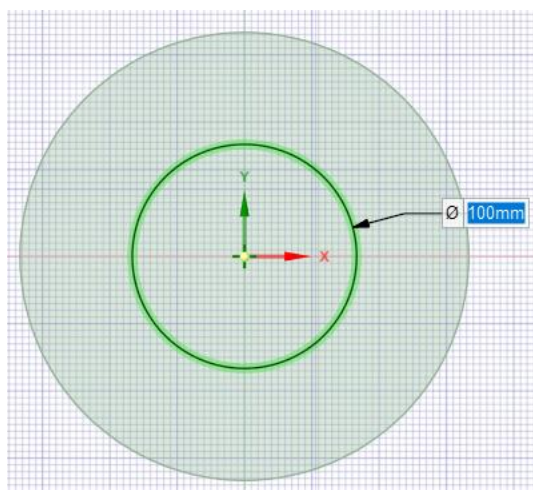


Рис. 1.11. Создание выходного патрубка в эскизе

Далее с помощью команды «Вытянуть» задайте глубину погружения  $a = 100$  мм и высоту патрубка над циклоном  $L_e = 100$  мм. Следует отметить, что при создании глубины необходимо выбрать «Добавить» (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Команда «Добавить»

При создании высоты патрубка над циклоном необходимо создать повторно окружность в эскизе и воспользоваться командой «Вытянуть» (рис. 1.13).

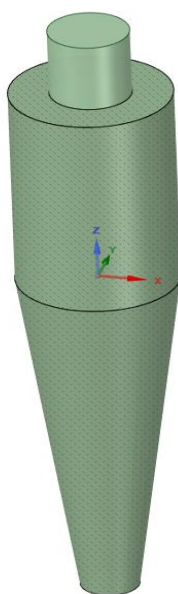


Рис. 1.13. Создание выходного патрубка

9. Для проверки и наглядности в верхней панели управления зайдите в «Отображение» и выберите «Каркас» (рис. 1.14).

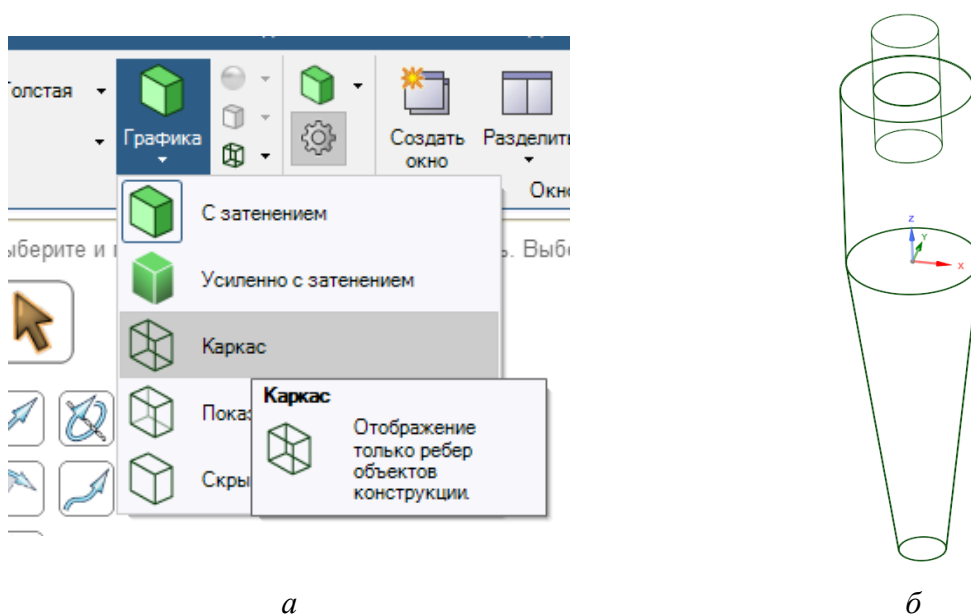


Рис. 1.14. Проверка выходного патрубка:  
*а* – выполнение команды «Каркас»; *б* – каркас конструкции

10. Задайте толщину стенки патрубка 1 мм. Для этого воспользуйтесь командой «Оболочка» или создайте окружность диаметром 99 мм и командой «Вытянуть» вырежьте внутреннюю часть. Рассмотрите второй вариант (рис. 1.15).

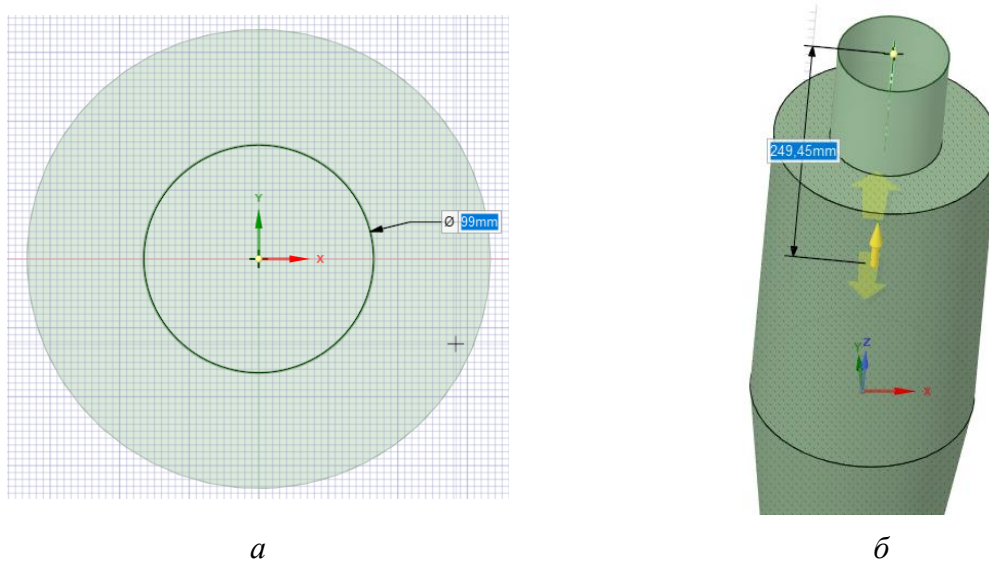


Рис.1.15. Создание толщины стенки выходного патрубка:  
*а* – создание окружности; *б* – выполнение команды «Вытянуть»

11. Перейдите к созданию входного патрубка. Создайте вспомогательную плоскость, выберите ось  $OX$  (рис. 1.16).

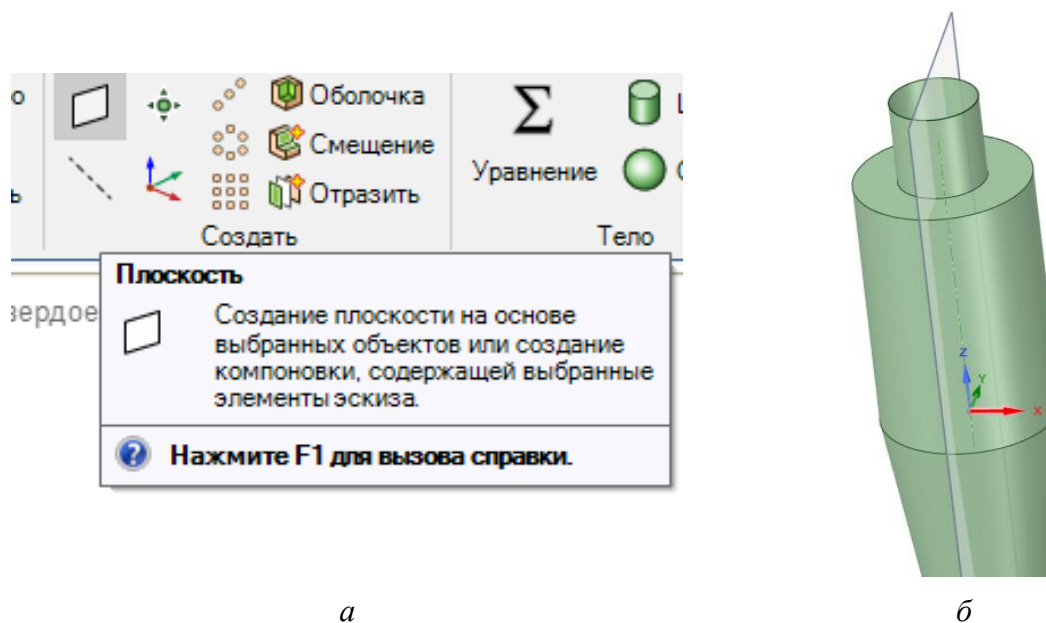


Рис. 1.16. Построение вспомогательной плоскости:  
*a* – создание плоскости; *б* – выбор оси  $OX$

Переместите плоскость на расстояние  $L_i = 200$  мм (рис. 1.17). Для этого выберите команду «Переместить» и выберите ось  $OX$ .

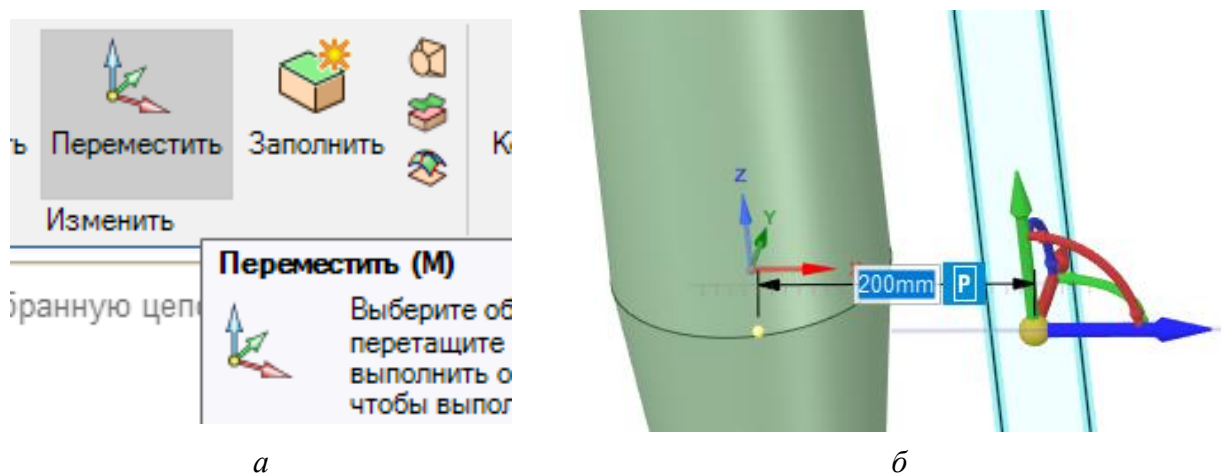


Рис. 1.17. Перенос плоскости:  
*a* – выполнение команды «Переместить»; *б* – выбор оси  $OX$

12. Выберите плоскость и нажмите «Вид сверху». Далее перейдите к созданию эскиза и нарисуйте прямоугольник размерами  $a = 100$  мм и  $b = 40$  мм (рис. 1.18).

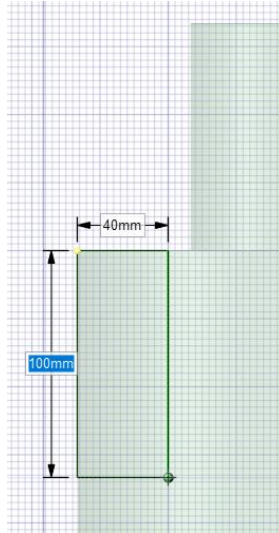


Рис 1.18. Создание прямоугольника для входного патрубка

Далее с помощью команды «Вытянуть» выберите созданный прямоугольник и укажите команду «До» до корпуса циклона (рис. 1.19).

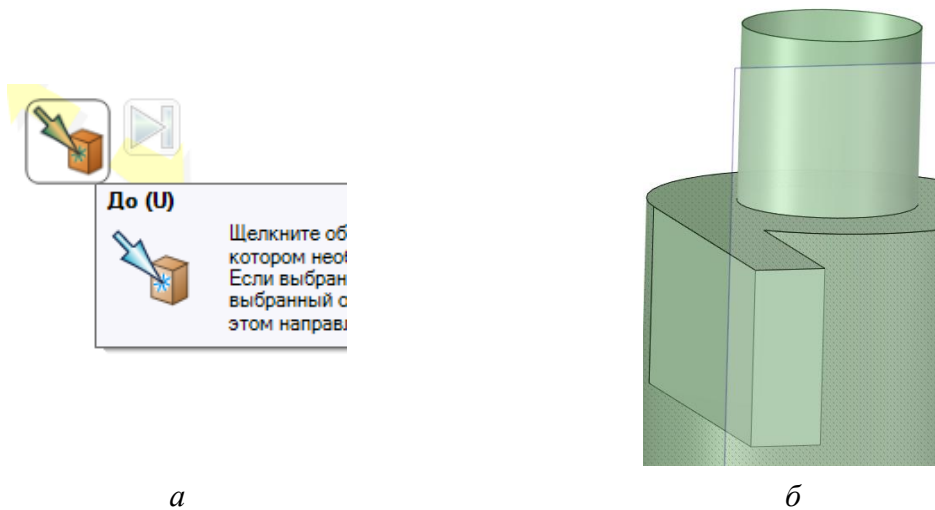


Рис. 1.19. Создание входного патрубка:  
*a* – выполнение команды «До»; *б* – корпус циклона

13. Деактивируйте плоскость в структуре проекта (рис. 1.20).

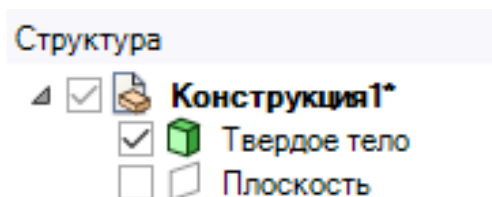


Рис. 1.20. Структура проекта



Далее выберите грань входного патрубка и нажмите «Режим сечения» (рис. 1.21).

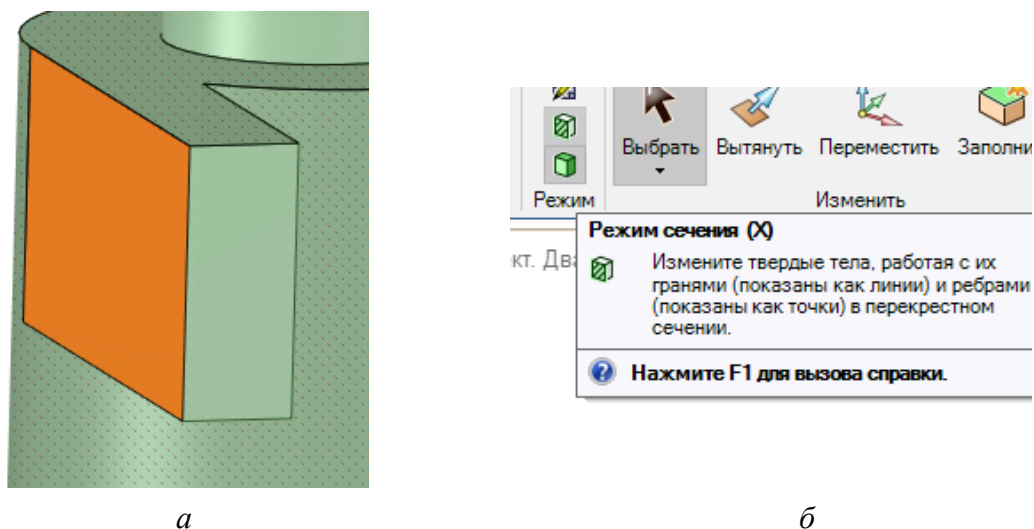


Рис. 1.21. Команда «Режим сечения»:  
*a* – грань входного патрубка; *б* – изменение грани твердого тела

После чего переместите сетку примерно на половину ширины патрубка (рис. 1.22).

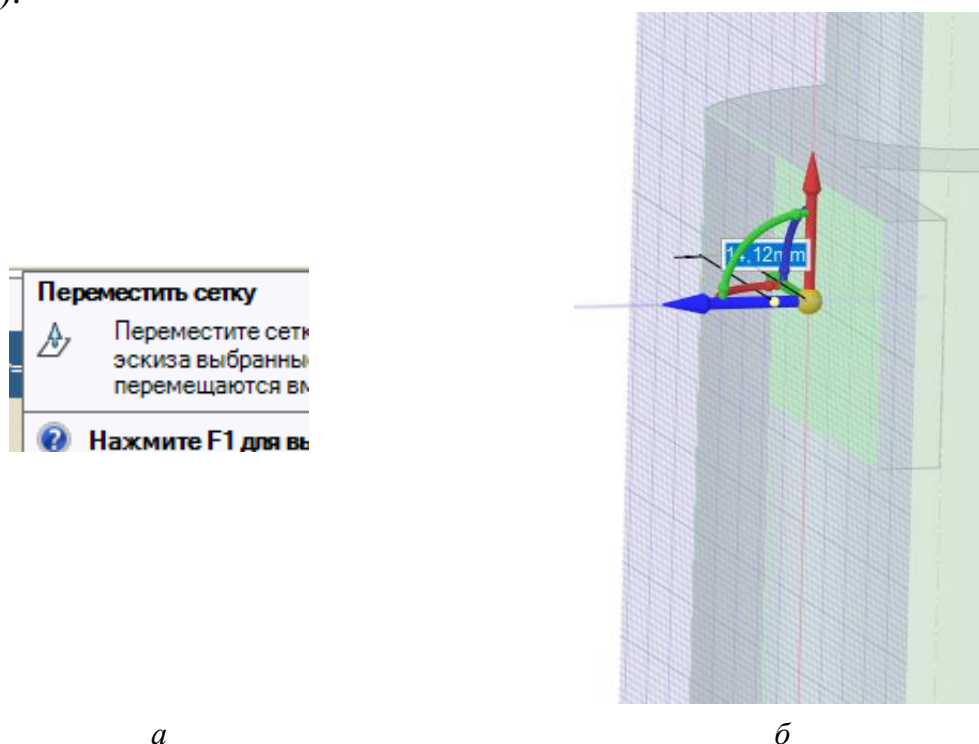
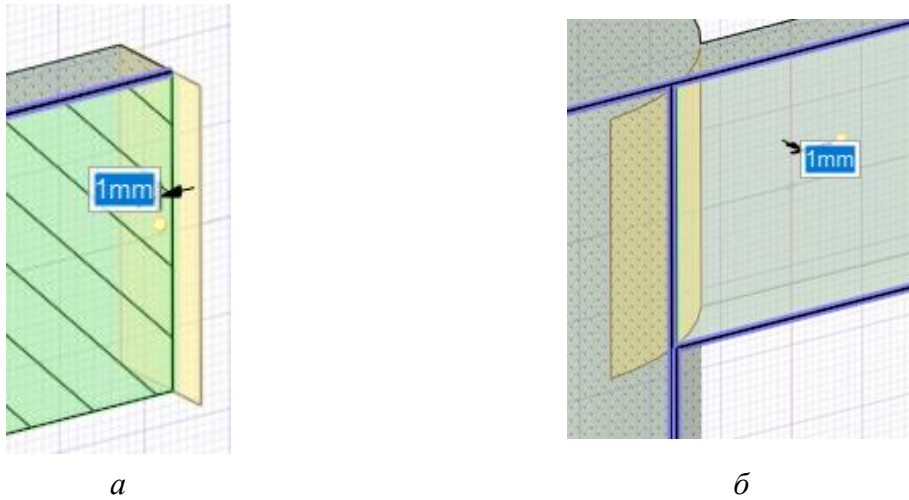


Рис. 1.22. Перемещение сетки:  
*a* – выполнение команды «Переместить сетку»; *б* – эскиз патрубка

14. Далее создайте толщину стенок входного патрубка 1 мм. Для этого воспользуйтесь командой «Оболочка» и выберите 2 грани (рис. 1.23).



*a*

*б*

Рис 1.23. Толщина стенок входного патрубка:  
*a* – выполнение команды «Оболочка»; *б* – создание толщины входного патрубка

15. Вернитесь в трехмерный режим (рис. 1.24).

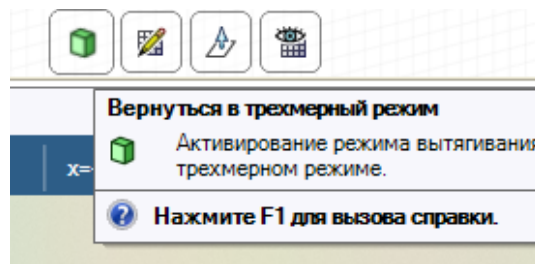


Рис. 1.24. Трехмерный режим

16. Завершите создание трехмерной модели циклонного сепаратора (рис. 1.25).

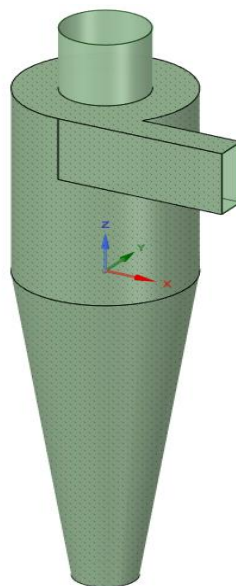


Рис. 1.25. Трехмерная модель циклонного сепаратора

## **Требования к отчету о проделанной работе**

Отчет о выполненной лабораторной работе должен содержать:

- краткое описание теоретической части;
- трехмерную модель детали;
- вывод по результатам проведенной работы.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение циклонным сепараторам. Какое преимущество они имеют для фильтров тонкой очистки? От чего зависит размер циклона?
2. Опишите принцип действия циклонных сепараторов. Для частиц каких размеров они применяются?
3. Перечислите преимущества и недостатки циклонных сепараторов.
4. Какой командой необходимо воспользоваться для перехода к трехмерной модели?
5. С помощью каких действий можно придать модели толщину?

## Лабораторная работа № 2

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ВНУТРИ ЦИКЛОННОГО СЕПАРАТОРА

**Цель работы** – создание проточного объема и расчетной сетки модели, настройка параметров решателя для численного моделирования, запуск численного расчета газодинамики циклонного сепаратора, построение поля скоростей и перепада давления внутри устройства.

#### Краткие теоретические сведения

Запуская в производство новый вариант конструкции продукта, инженеры должны доказать способность данной конструкции выдерживать ожидаемые (и незапланированные) нагрузки в течение всего срока службы. Для подтверждения жизнеспособности новых концепций создаются и испытываются физические образцы. Такой метод проверки является довольно затратным, а для экспериментальных или критически важных для безопасности конструкций он зачастую просто неприменим. Все чаще инженеры делают выбор в пользу численного моделирования (англ. *Numerical Simulation*) методом конечных элементов, позволяющего вносить коррективы и влиять на окончательный выбор конструкции.

В основе метода лежит разбиение больших сложных структур (моделей) на сетку, состоящую из дискретных элементов. Элементы связаны друг с другом в точках, называемых «узлами», и создают непрерывную поверхность. Модели присваиваются некоторые свойства материала; она находится под нагрузкой (для того, чтобы быть физически корректной); к ней применяется внешняя нестационарная нагрузка; а программное обеспечение создает наборы уравнений в соответствии с типами элементов и свойствами материала. Затем уравнения решаются численно и результаты решения представляются визуально. Конечно-элементные модели могут использоваться практически для любой комбинации типов нагрузки, включая сосредоточенные силы, моменты, давления и тепловые нагрузки. Модели могут быть сконструированы для применения линейных или нелинейных, статических или динамических нагрузок, а также сценариев, таких как удары, потоки жидкости и газа, изгибы, теплопередача и анализ собственной частоты [3].

Благодаря впечатляющему прогрессу в создании вычислительных систем и успехам в разработке методов численного решения нелинейных многомерных задач численное моделирование стало в настоящее время одним из основных методов изучения сложных газодинамических явлений [4].

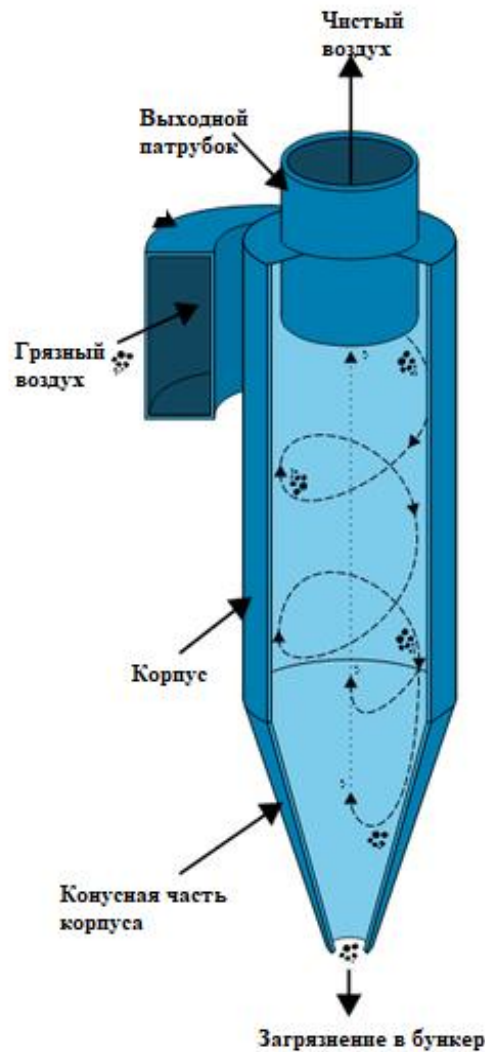


Рис. 2.1. Циклонный сепаратор [1]

### **Задание на выполнение лабораторной работы**

Выполните численное моделирование газодинамики внутри циклонного сепаратора. Постройте распределения полей скоростей и давления в плоскостях ( $YZ$ ,  $ZX$  и  $XY$ ). Входную скорость выберите в зависимости от варианта.

Таблица 2.1

## Входная скорость газового потока в циклонном сепараторе

№ варианта	$W$ , м/с (входная скорость)
1	5
2	6
3	7
4	8
5	9
6	10
7	11
8	12
9	13
10	14
11	15
12	16
13	17
14	18
15	19
16	20
17	21
18	22
19	23
20	24

## Методика выполнения лабораторной работы

1. Создайте проект. Для этого откройте Workbench. Выберите Fluid Flow (рис. 2.2).

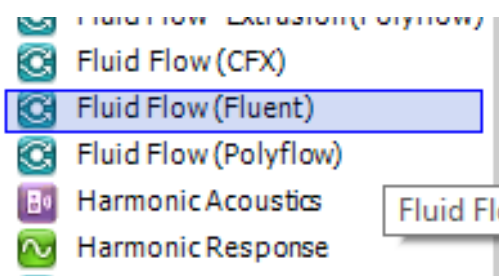


Рис. 2.2. Fluid Flow (Fluent)

В «Geometry» откройте New SpaceClaim Geometry (рис. 2.3).

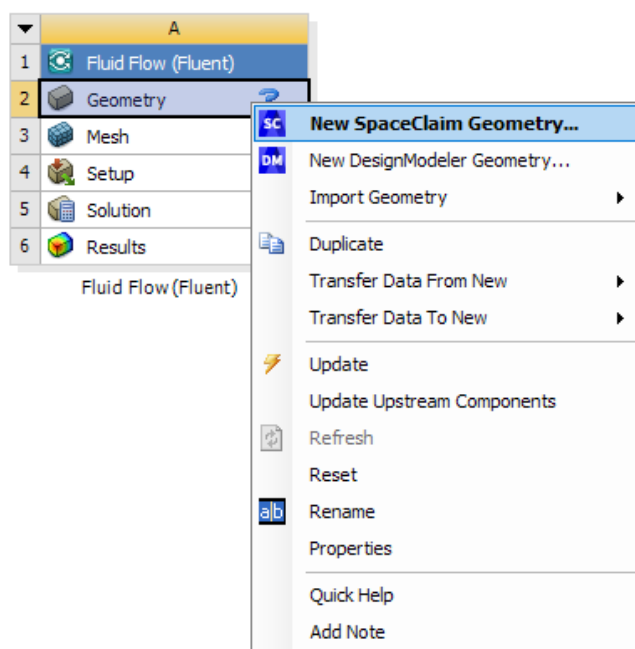


Рис. 2.3. Открытие SpaceClaim

После открытия программы запустите ранее созданную в лабораторной работе № 1 модель циклонного сепаратора (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Открытие ранее созданного циклона

2. Подготовьте модель циклона к численному моделированию. Создайте проточную область. Перейдите в верхней части программы во вкладку «Prepare» и выберите «Volume extract» (рис. 2.5).

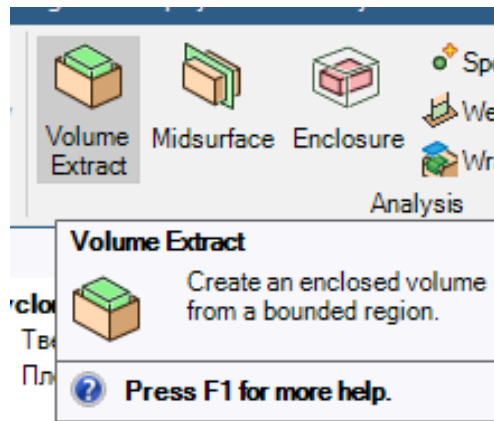


Рис. 2.5. Volume extract

Выберите кромки входного и выходных патрубков (рис. 2.6).

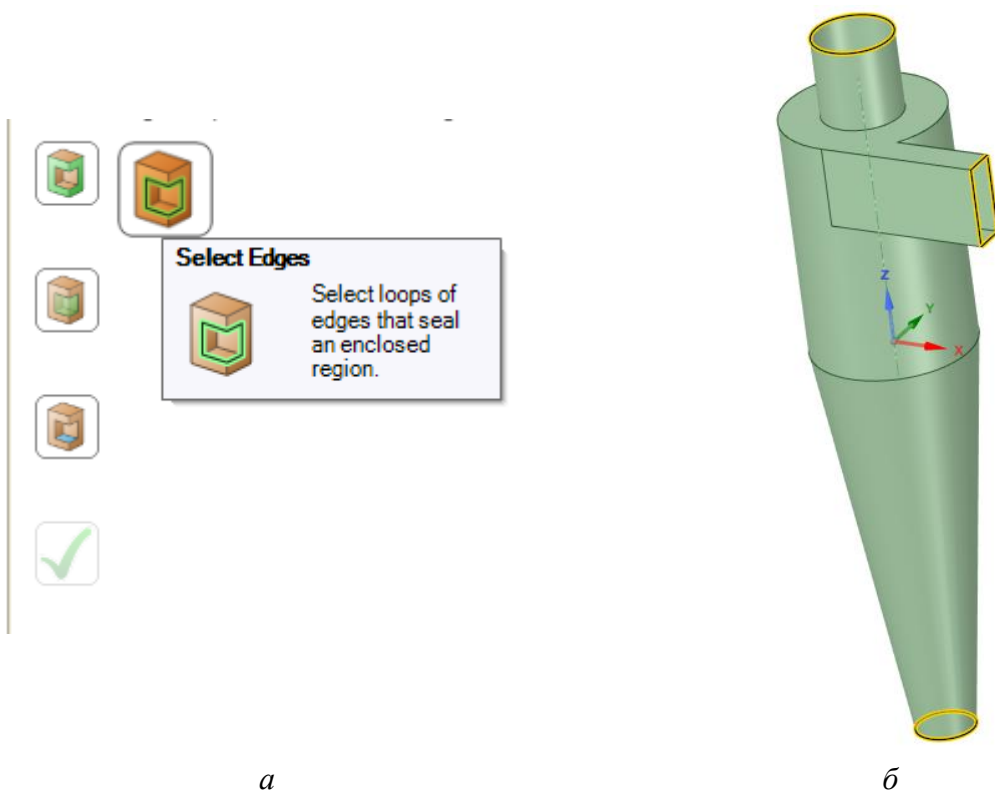


Рис. 2.6. Выбор кромок:  
*a* – выполнение команды «Select Edges»; *б* – выделение кромок

Далее нажмите зеленую галочку, и проточная область создастся. Следует отметить, что можно активировать и деактивировать твердотельную модель и проточную область в структуре (рис. 2.7).



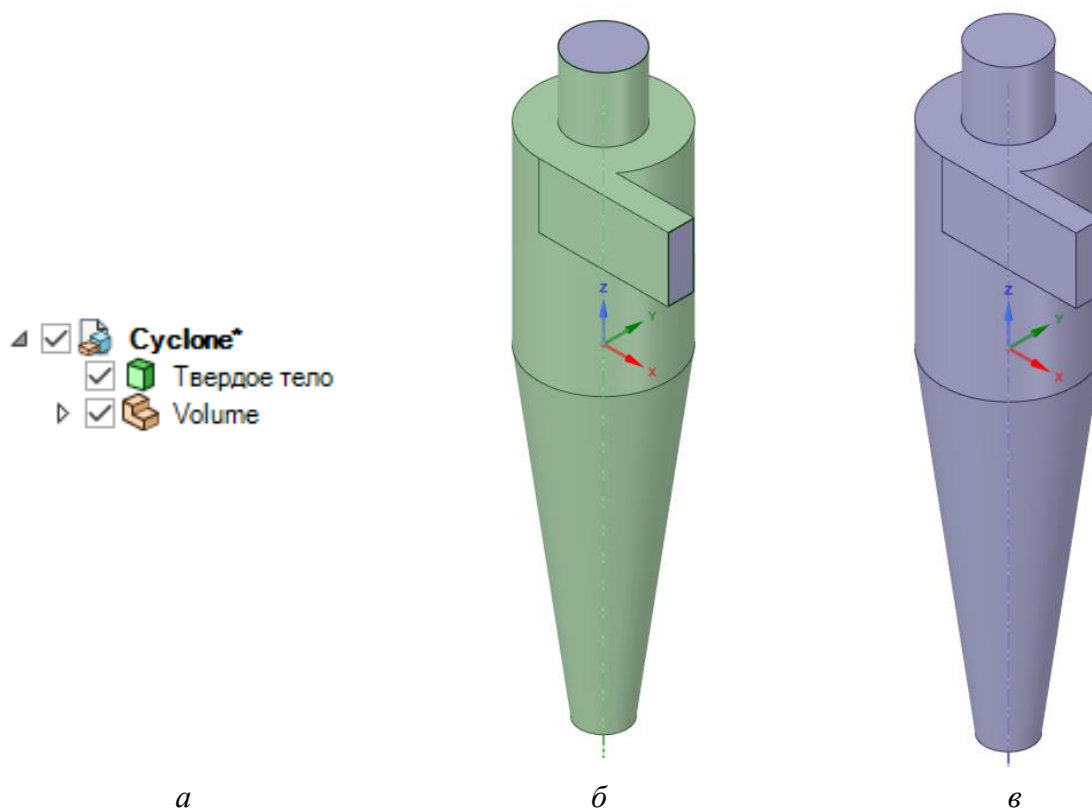


Рис. 2.7. Создание проточной области:  
*a* – вкладка «Cyclone»; *б* – твердотельная и проточная область;  
*в* – проточная область

3. Далее активируйте «Твердое тело» и «Volume» и закройте SpaceClaim. Перейдите к созданию сетки. Откройте «Mesh» (рис. 2.8).

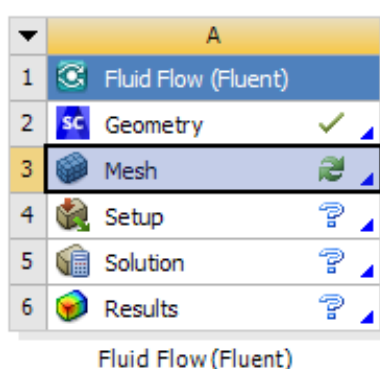


Рис. 2.8. Запуск «Mesh»

Скройте твердотельную модель циклона. Для этого выберите «Hide body» (рис. 2.9).

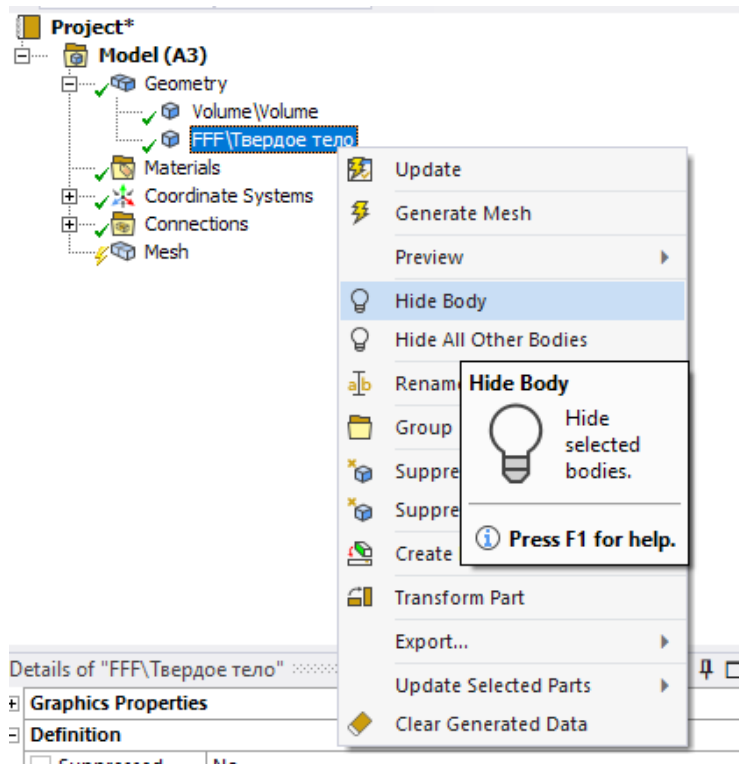


Рис. 2.9. Операция «Hide body»

Далее кликните на проточный объем детали и измените материал на «Fluid» (рис. 2.10).

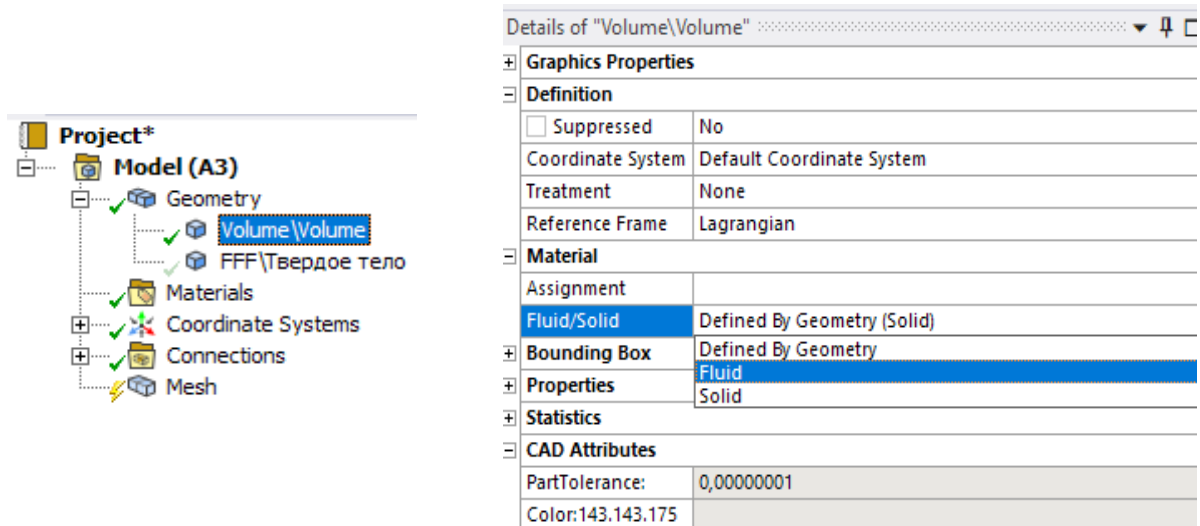
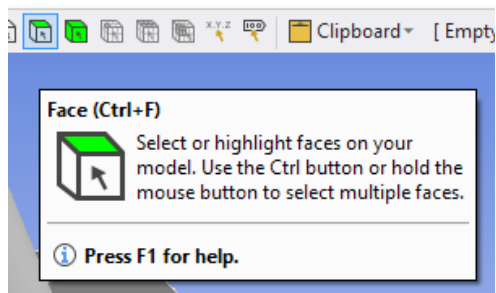
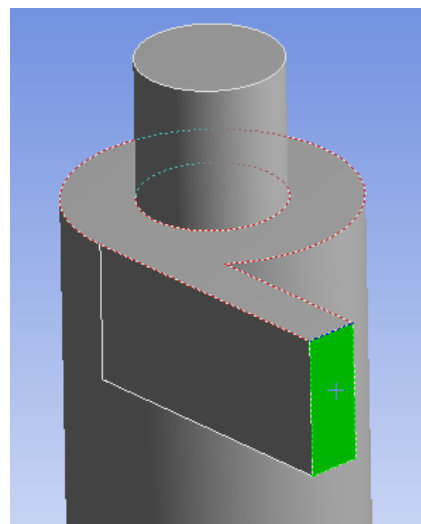


Рис. 2.10. Настройка проточного объема

4. Дайте названия входному и выходным патрубкам (рис. 2.11).



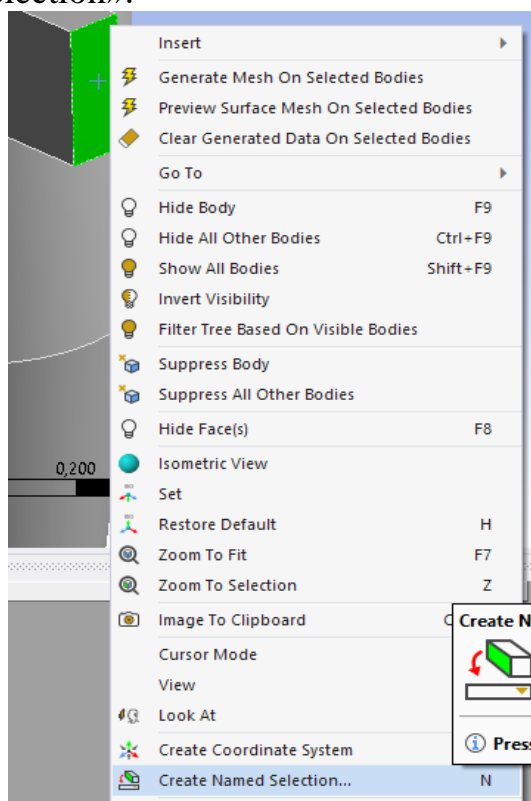
*a*



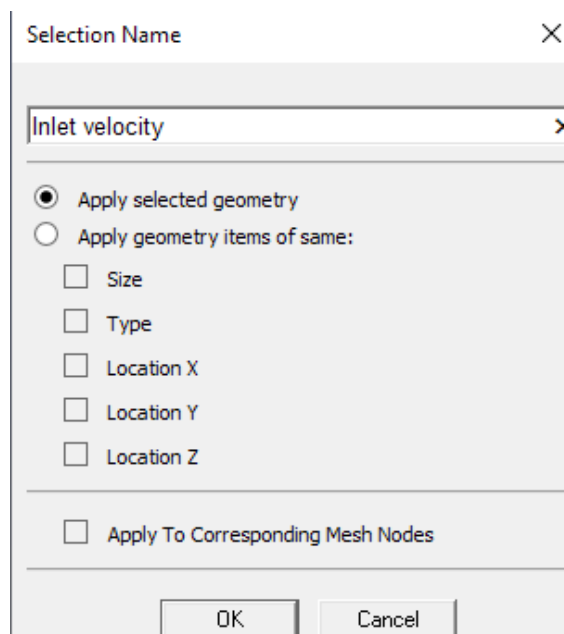
*б*

Рис. 2.11. Выделение входных и выходных патрубков:  
*a* – выполнение команды «Face»; *б* – выделение входа патрубка

5. Задайте названия выделенных граней (рис. 2.12–2.14). Для этого после выделения нажмите правую кнопку мыши и выберите «Create named selection».

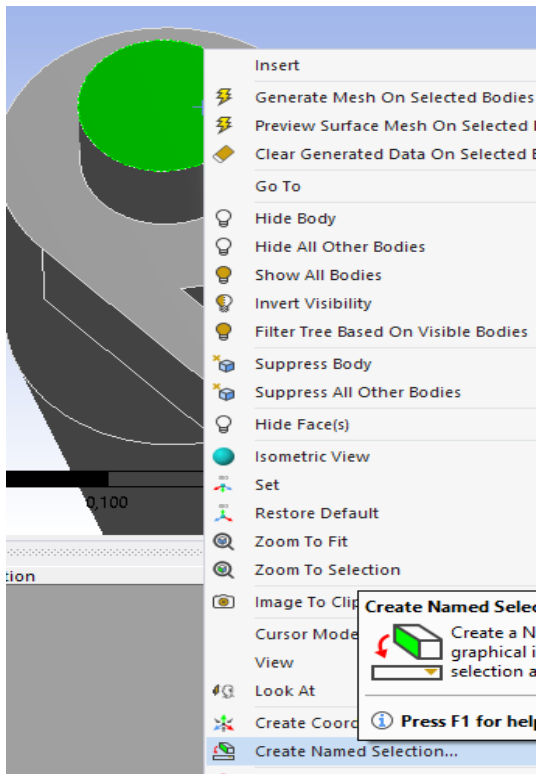


*a*

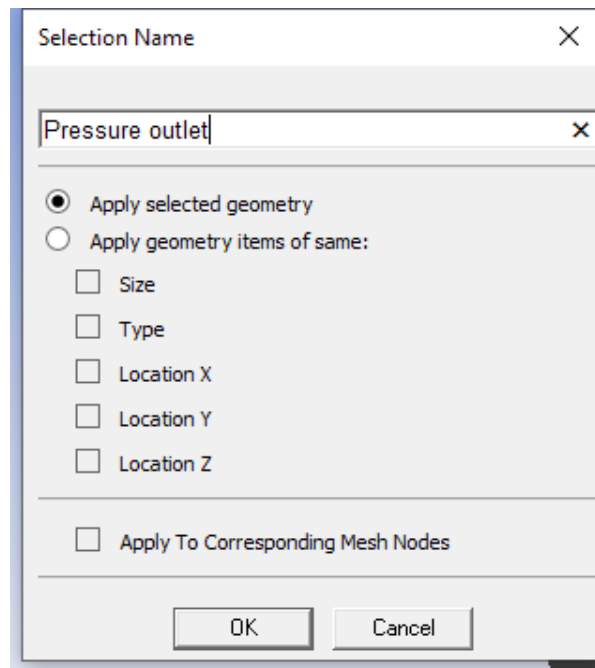


*б*

Рис. 2.12. Команда «Create Named Selection»:  
*a* – наименование выбранной области; *б* – обозначение входного патрубка «Inlet velocity»



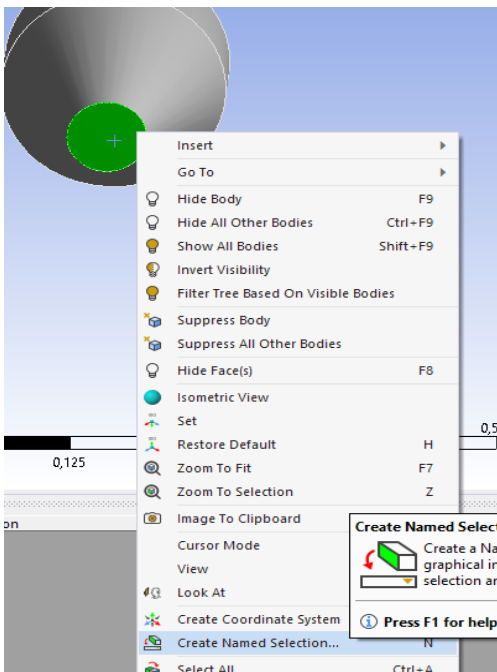
*a*



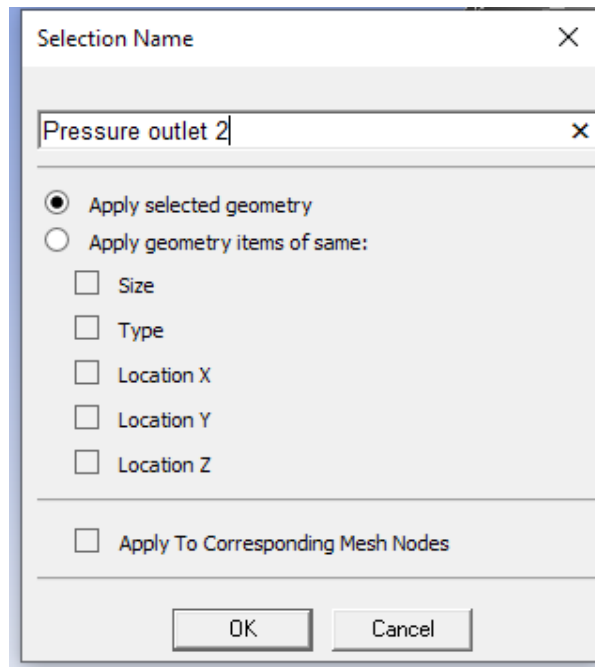
*б*

Рис. 2.13. Команда «Create Named Selection»:

*a* – наименование выбранной области; *б* – обозначение выходного патрубка «Pressure outlet»



*a*



*б*

Рис. 2.14. Команда «Create Named Selection»:

*a* – наименование выбранной области; *б* – обозначение выходного патрубка «Pressure outlet 2»

6. Далее создайте сетку. Для этого нажмите в верхней панели управления «Generate» (рис. 2.15).

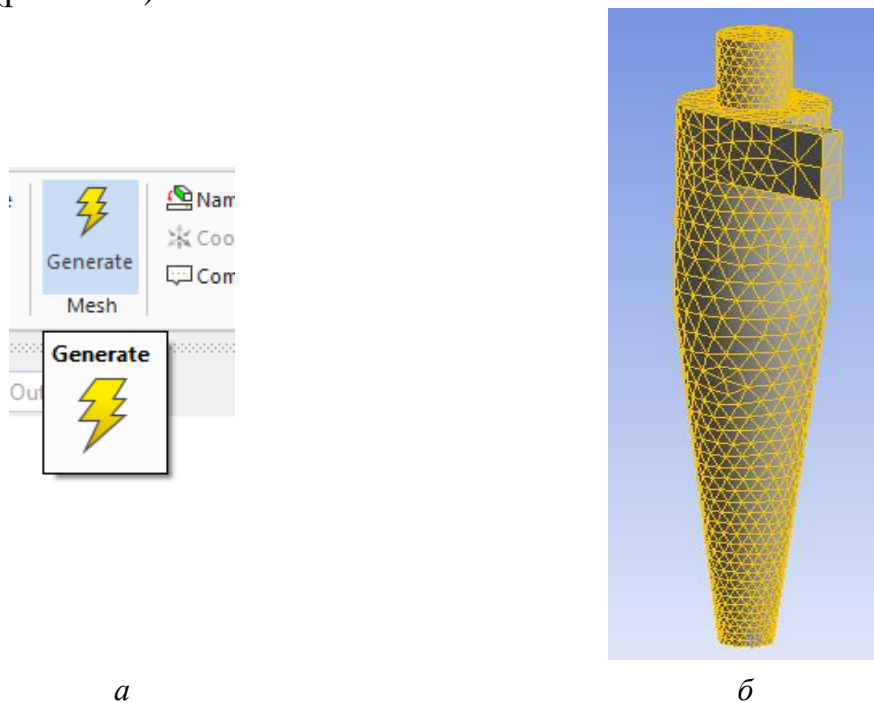


Рис. 2.15. Создание сетки: *a* – выполнение команды «Generate»; *б* – генерация ячеек

В случае, если программа выдает ошибку в связи с недостаточным количеством ячеек, необходимо их увеличить вручную (рис. 2.16).

Messages			
	Text	Association	Timestamp
Error	Patch-conforming tetrahedron mesh failed because of an edge intersection in the bound	Project>Model>Geometry>FFF Bodies>FFFТвердое тело	Sunday, January 3, 2021 2:16:55 AM
Error	Patch-conforming tetrahedron mesh failed because of an edge intersection in the bound	Project>Model>Geometry>Volume Bodies>Volume\Volume	Sunday, January 3, 2021 2:16:55 AM
Error	A mesh could not be generated using the current meshing options and settings.	Project>Model>Mesh	Sunday, January 3, 2021 2:16:55 AM

Рис. 2.16. Список ошибок

Перейдите в настройки сетки и в поле «Element size» укажите меньшее числовое значение (рис. 2.17).

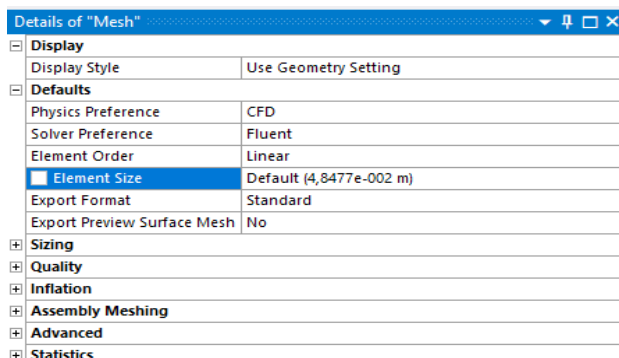


Рис. 2.17. Настройка сетки

Укажите числовое значение – 0,0048, т. е. уменьшите значение в 10 раз, и нажмите «Generate» (рис. 2.18).

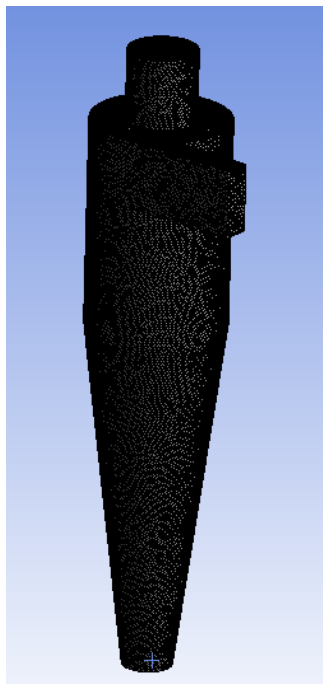


Рис. 2.18. Создание расчетной сетки

7. Далее закройте программу и в окне управления проектом нажмите «Update» для Mesh (рис. 2.19).

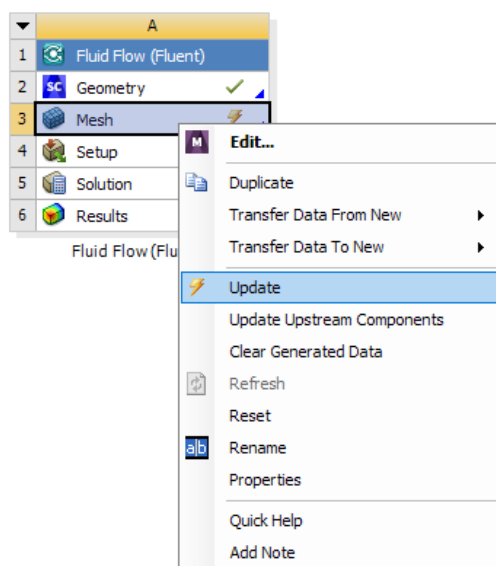


Рис. 2.19. Обновление расчетной сетки

8. Перейдите в блок «Setup» (рис. 2.20).

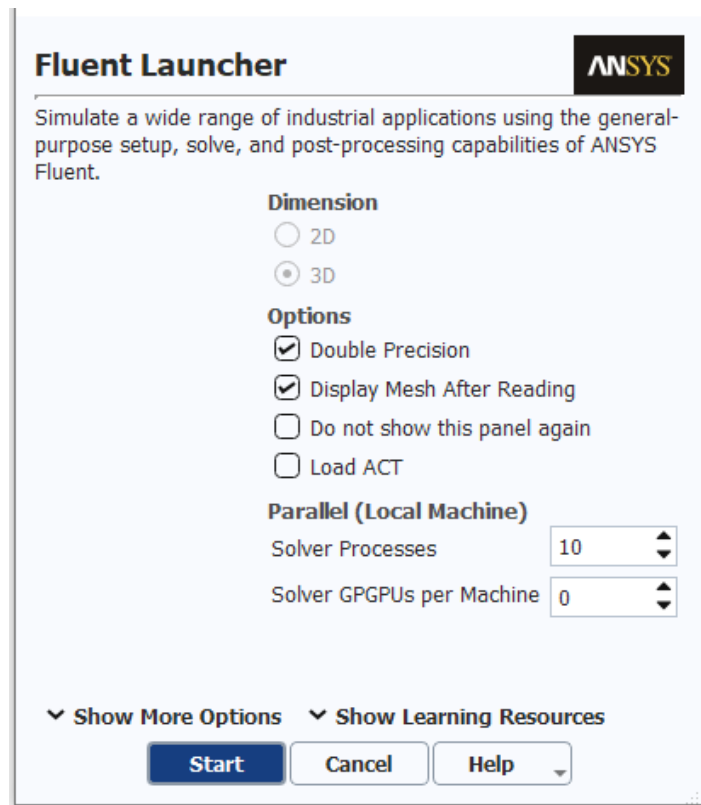


Рис. 2.20. Запуск блока «Setup»

Сперва выберите модель турбулентности «Transition SST» (рис. 2.21).

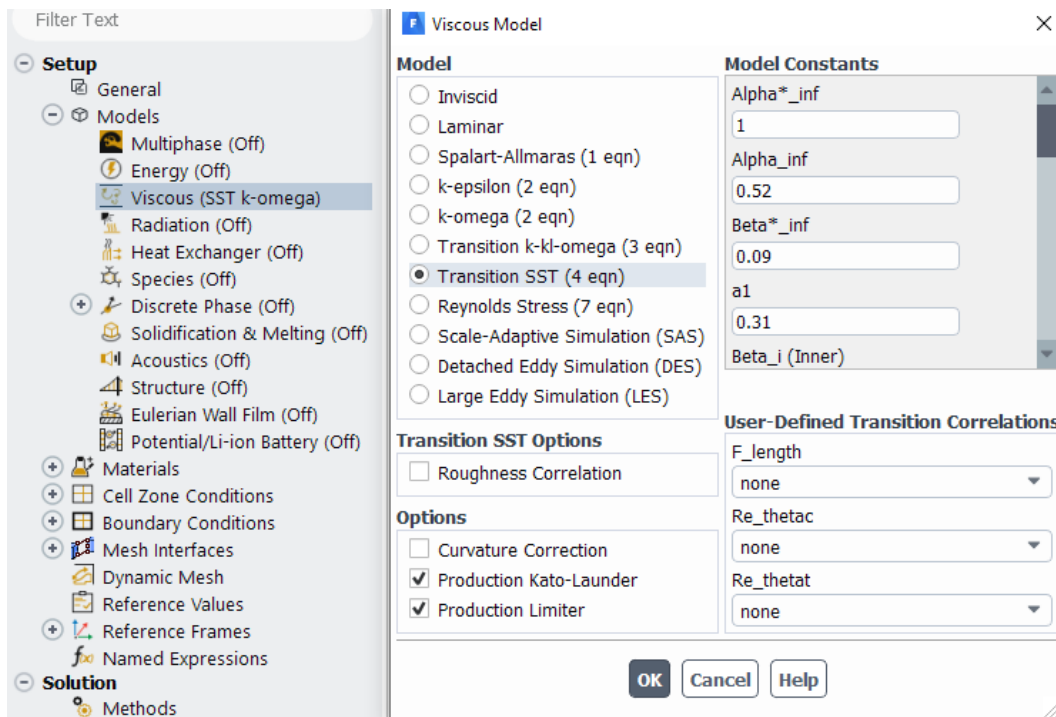


Рис. 2.21. Выбор модели турбулентности

Задайте значение скорости на входном патрубке – 7 м/с (рис. 2.22).

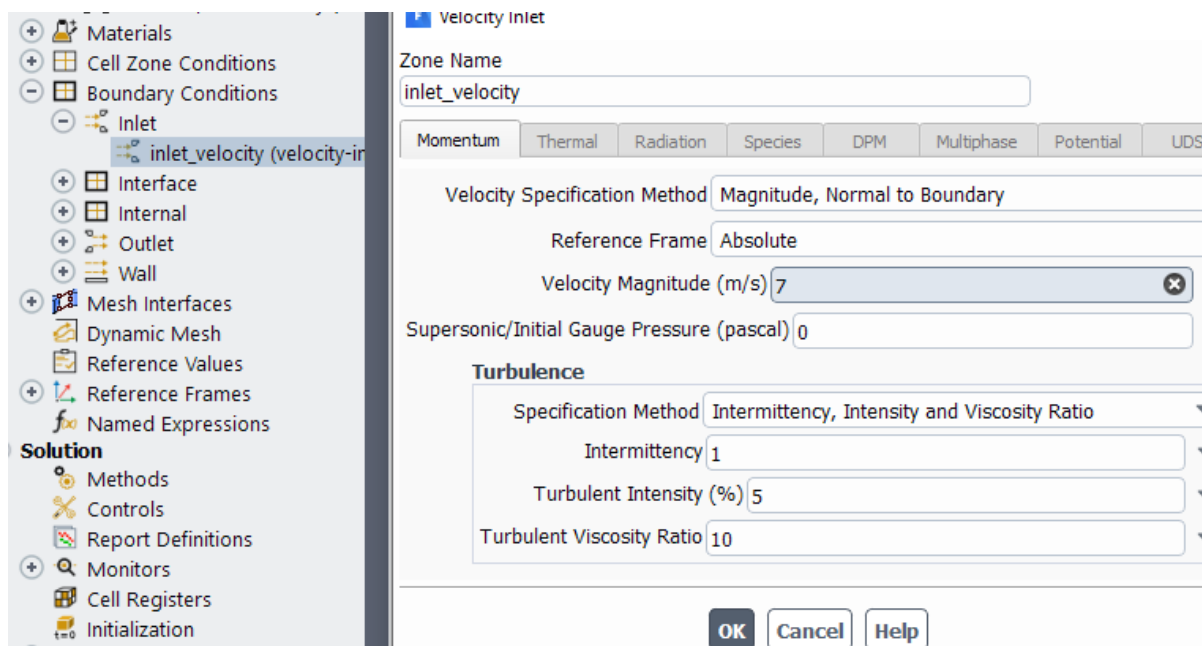


Рис. 2.22. Редактирование значения скорости на входе в устройство

В методах решения выберите «SIMPLE» (рис. 2.23).

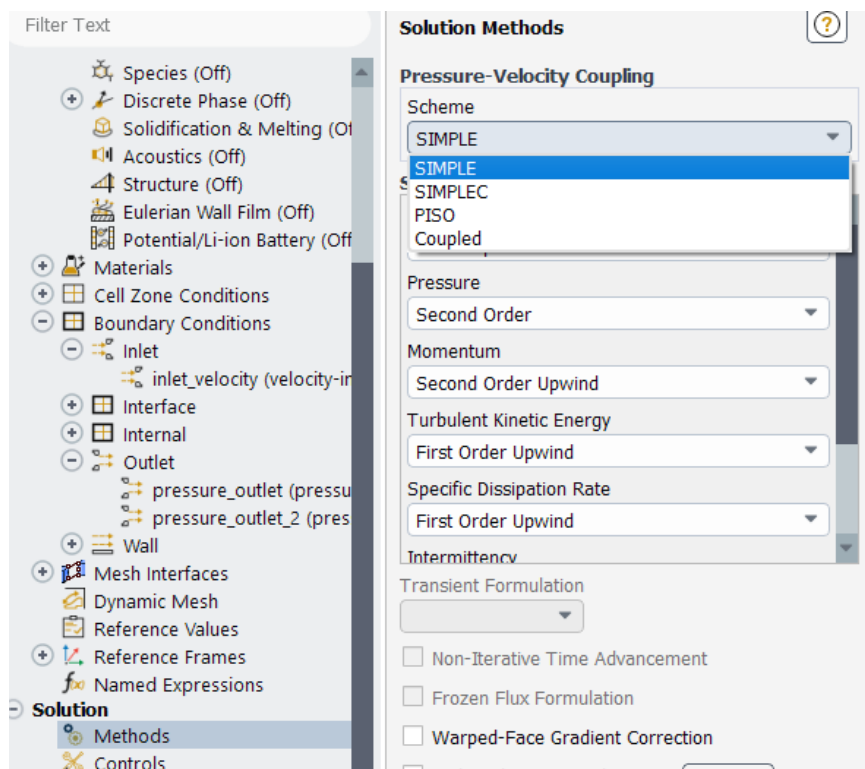


Рис. 2.23. Выбор метода решения



9. Настройте инициализацию решения. Для этого поставьте «Standard Initialization». При выборе «Compute from» выберите «inlet\_velocity». В конце нажмите «Initialize» (рис. 2.24).

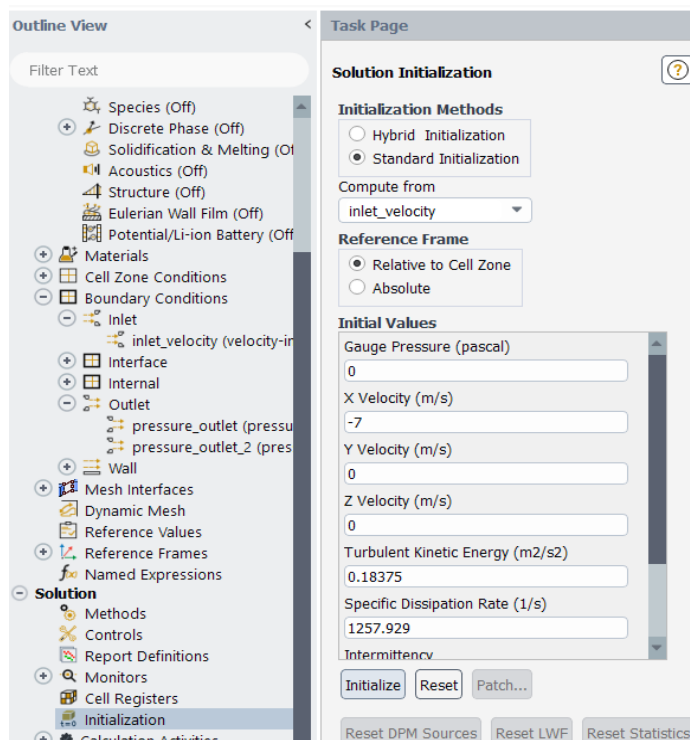


Рис. 2.24. Настройка инициализации решения

Далее перейдите к запуску вычислений и задайте необходимое количество итераций. Укажите – 400 и нажмите «Calculate».

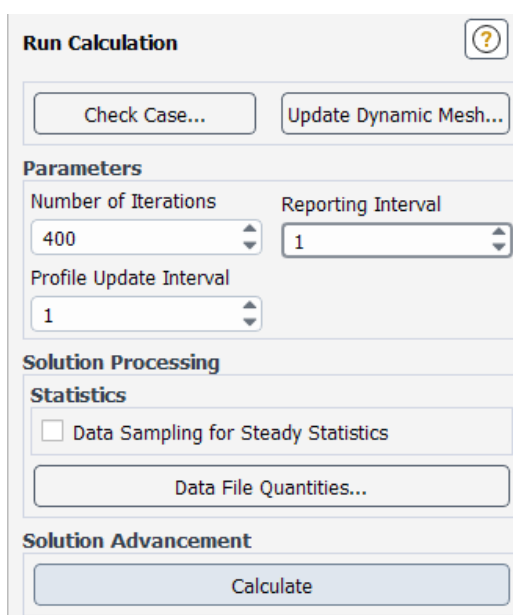


Рис. 2.25. Запуск расчета

Протекание расчета проиллюстрировано на рис. 2.26.

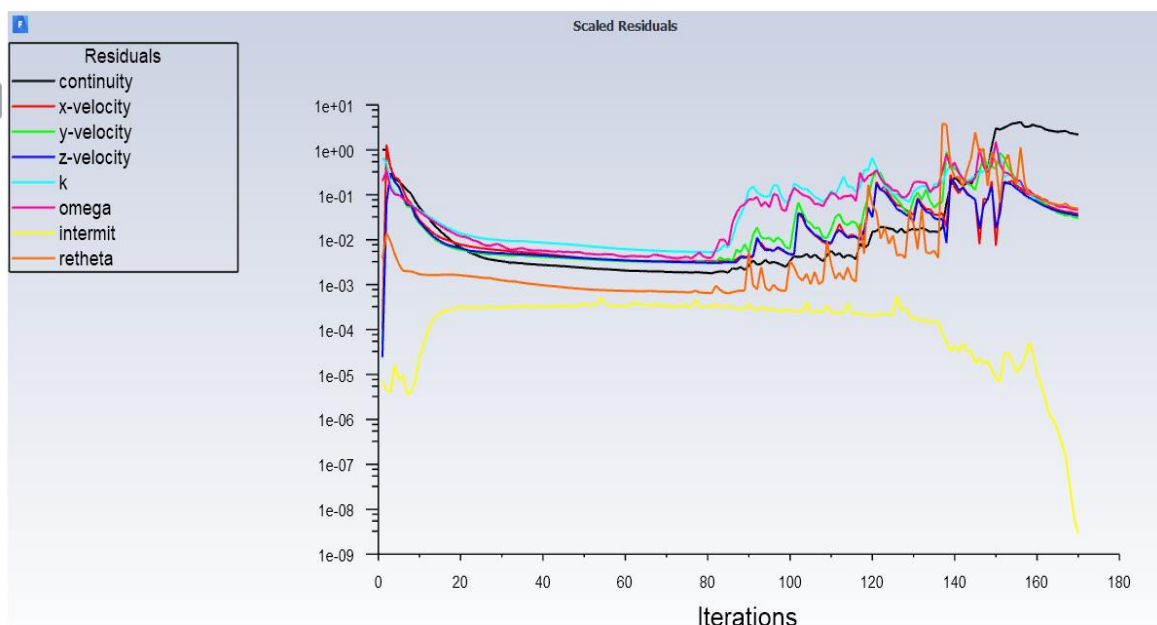


Рис. 2.26. Процесс расчета

10. После проведения расчетов перейдите к их анализу. Откройте «Display» и выберите пункты, показанные на рис. 2.27.

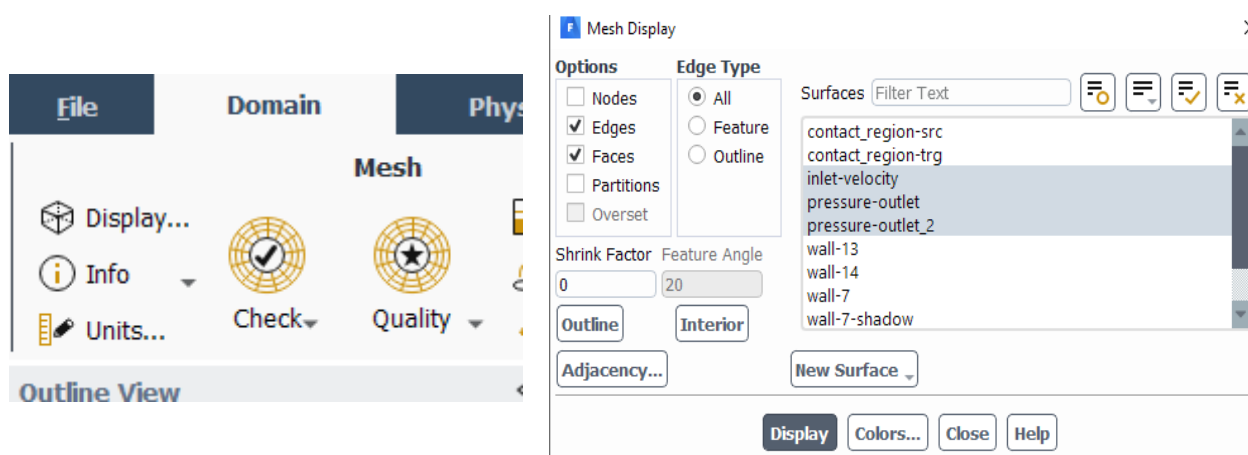


Рис. 2.27. Настройка отображения модели

11. Создайте плоскость для построения распределения скоростей и перепада давления внутри устройства. Для этого зайдите в «Graphics» и «Contours», далее – «New surface» и «YZ Plane», далее – «Create» (рис. 2.28).

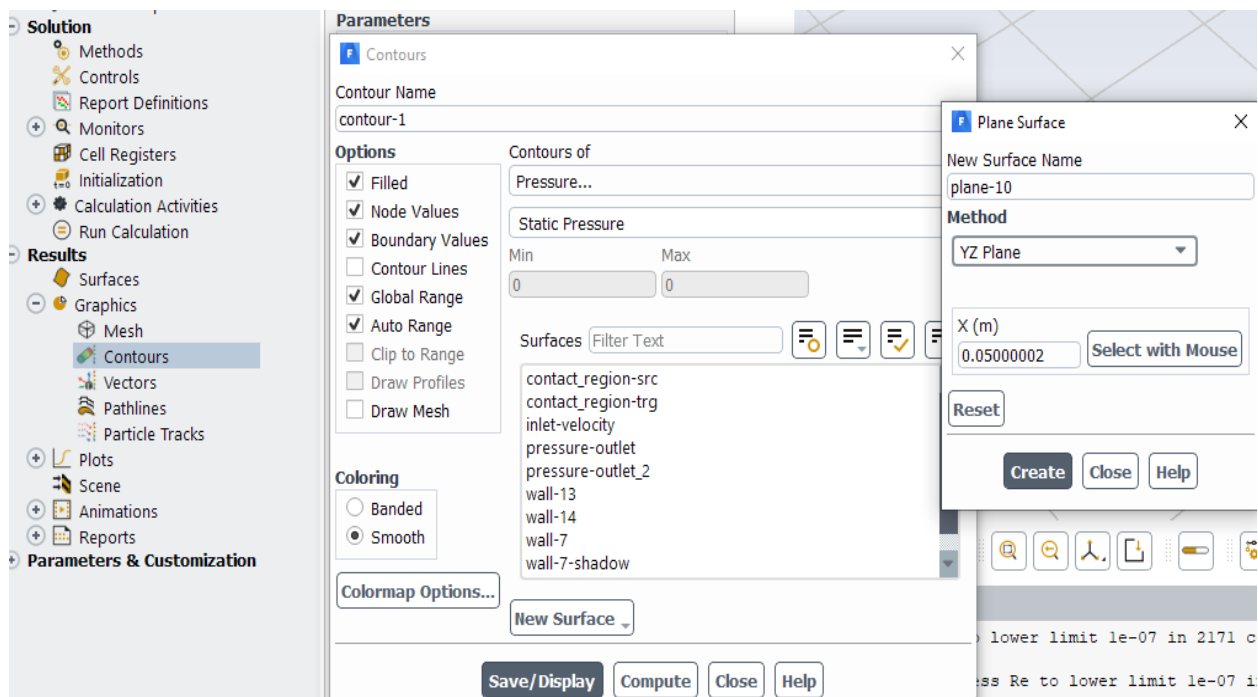


Рис. 2.28. Создание плоскости

В итоге должна отобразиться следующая плоскость (рис. 2.29).

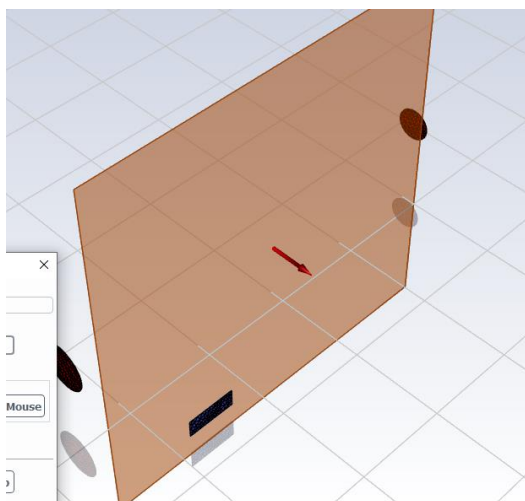


Рис. 2.29. Построение плоскости

12. Затем выберите в окне созданную плоскость «plane-10». Для построения поля скоростей в «Contours of» выберите «Velocity...». Следует отметить, что при необходимости построения поля давления нужно выбрать «Pressure...». Далее нажмите «Save/Display» (рис. 2.30). Также при выборе давления можно выбрать необходимый параметр.

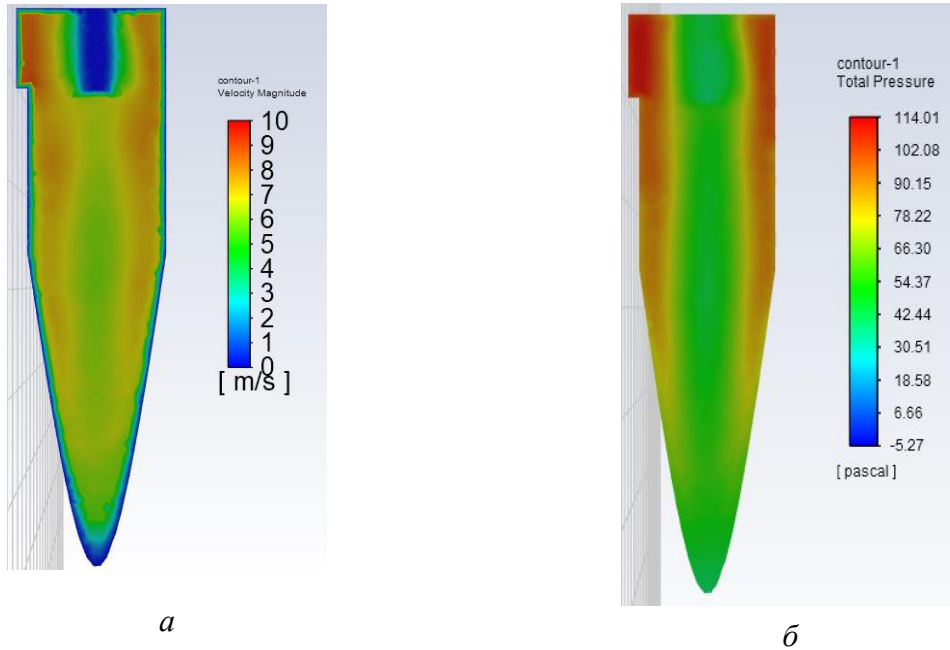


Рис. 2.30. Поле: *a* – поле скоростей; *б* – поле давления

Аналогичным образом можно отобразить вектора, линии тока и т. д. в настройках «Results». Для того чтобы отобразить значения скорости или давления на входном патрубке или выходном патрубке, необходимо открыть в верхней панели управления «Results», после чего выбрать «Surface integrals» (рис. 2.31).

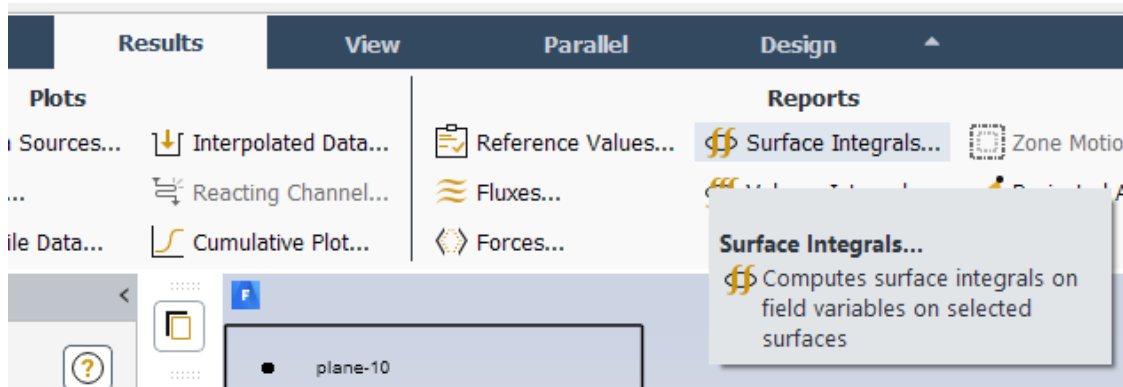


Рис. 2.31. Surface Integrals

13. Отобразите значения скоростей (рис. 2.32).

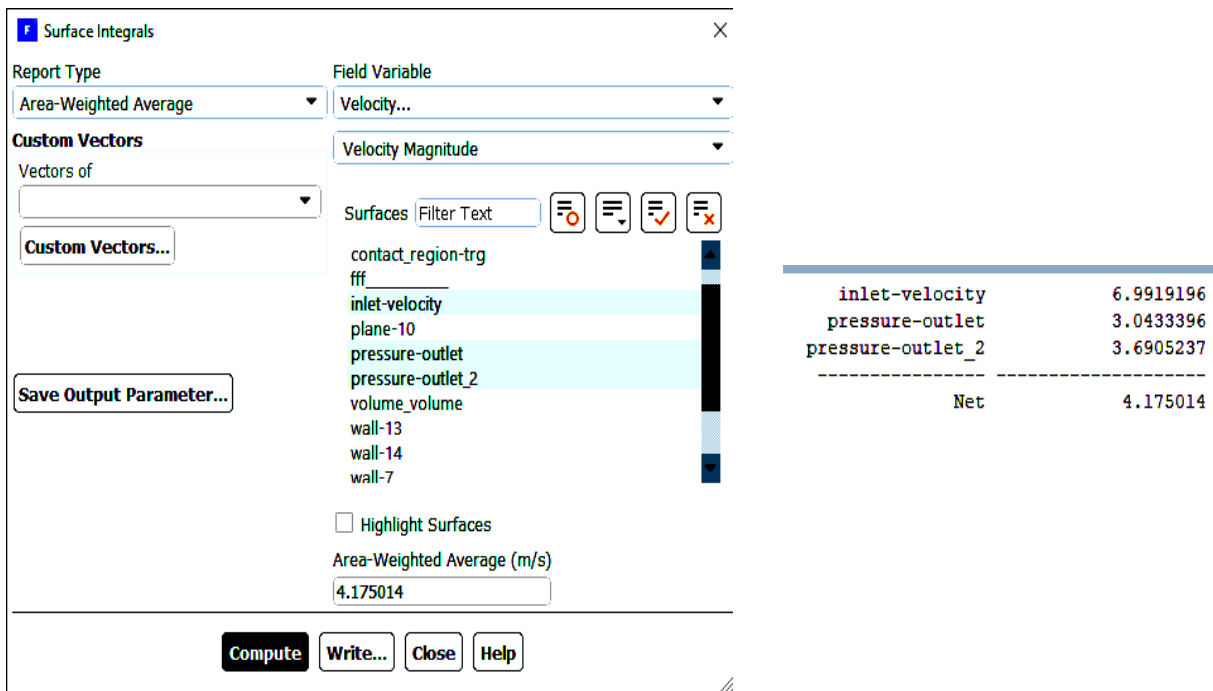


Рис. 2.32. Значения скоростей

14. Отобразите значения давлений (рис. 2.33).

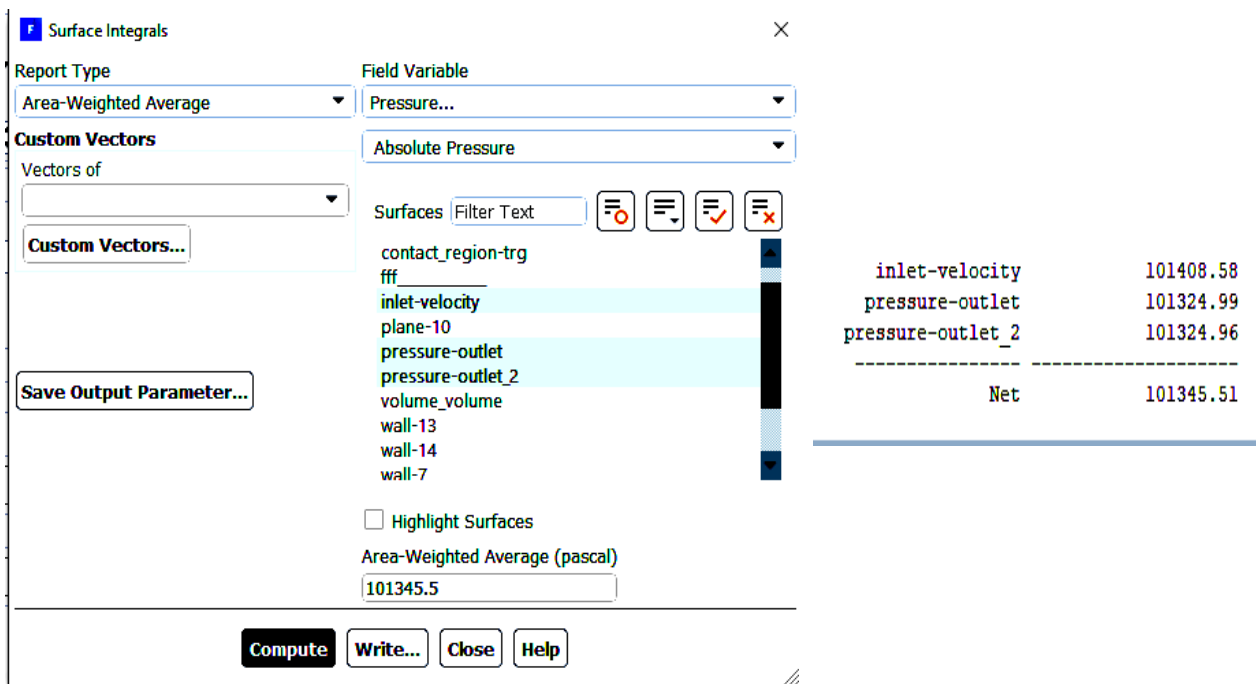


Рис. 2.33. Значения давлений

15. Повторите действия, проделанные на рис. 2.27, но выберите также «wall-ff...» (рис. 2.34).

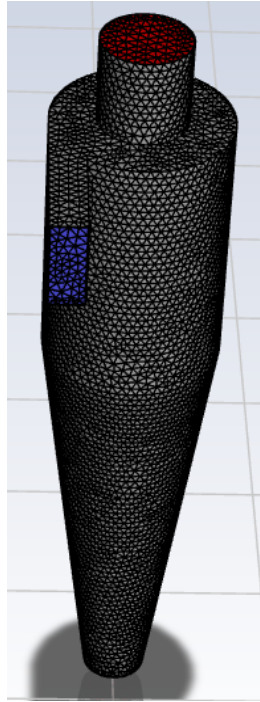


Рис. 2.34. Отображение циклона

16. Создайте новую плоскость XY для построения поля скоростей (рис. 2.35).

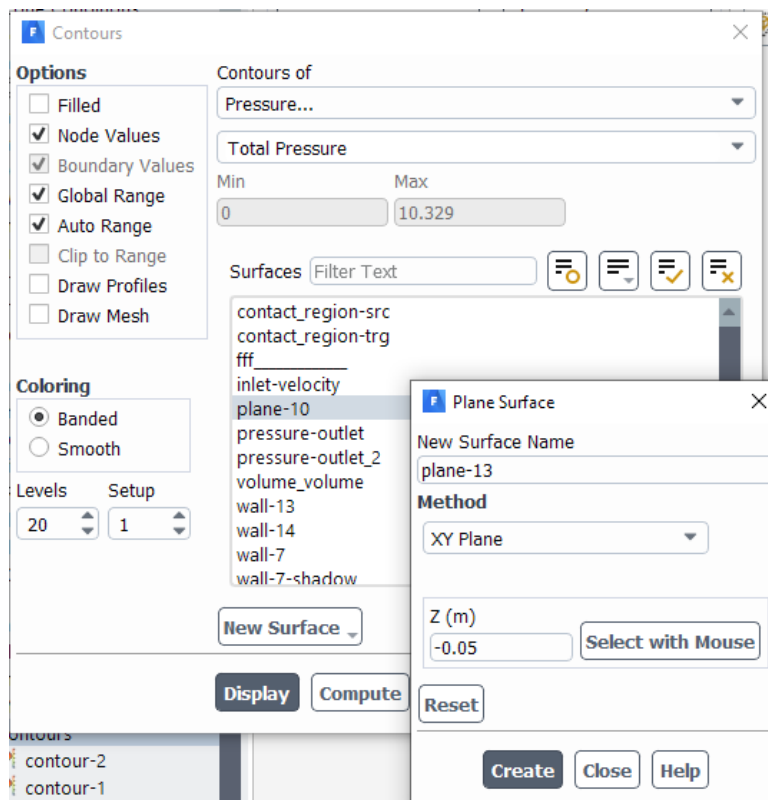


Рис. 2.35. Создание новой плоскости

Передвиньте плоскость на уровень входного патрубка, потянув левой кнопкой мыши стрелку (рис. 2.36).

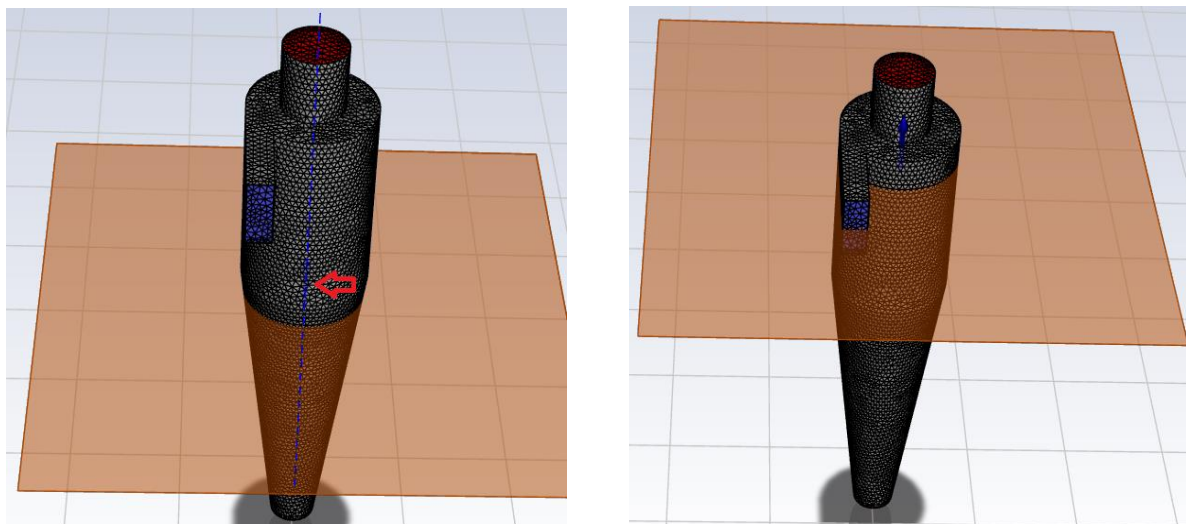


Рис. 2.36. Перемещение плоскости

Отобразите поле скоростей в данной плоскости (рис. 2.37).

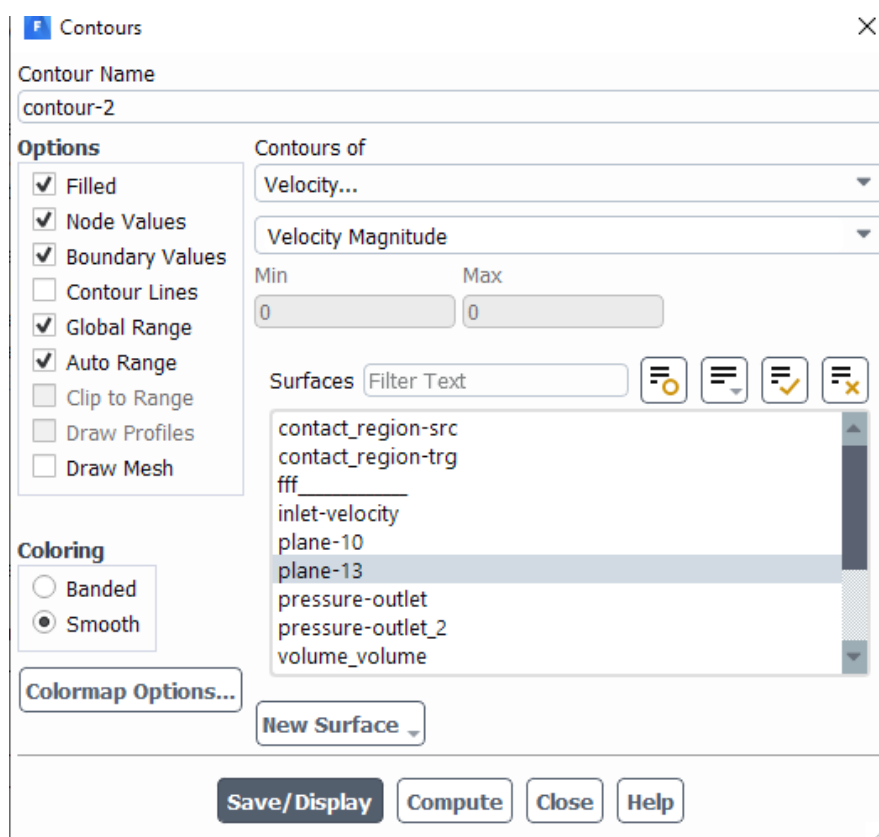


Рис. 2.37. Выбор плоскости «Plane-13»

17. С помощью вспомогательного инструмента отобразите вид сверху (рис. 2.38).

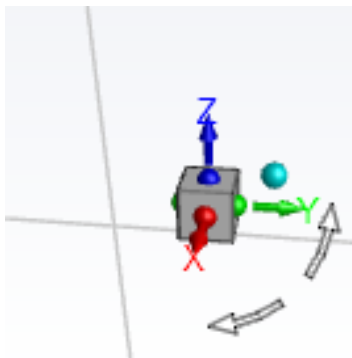


Рис. 2.38. Перемещение модели

В конечном итоге получите следующий вид (рис. 2.39).

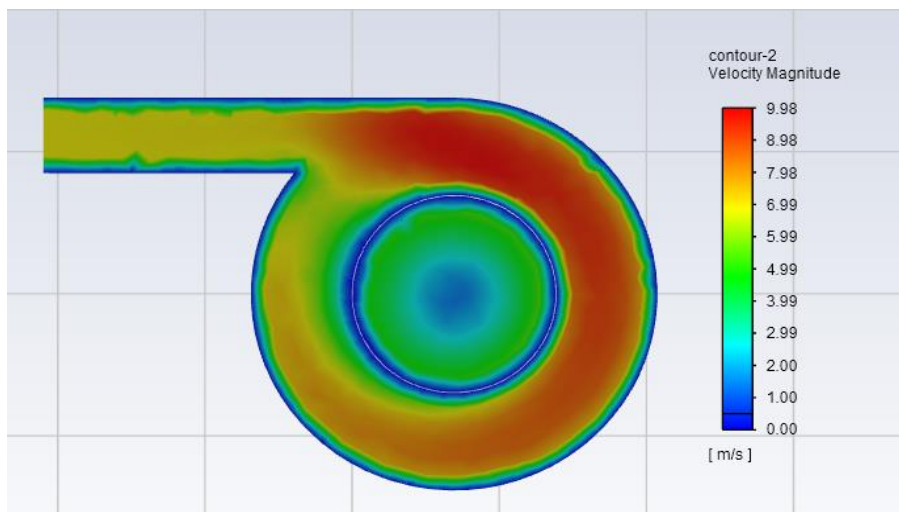


Рис. 2.39. Поле скоростей (вид сверху)

В данной работе нижнее отверстие циклонного сепаратора рассматривалось в качестве второго выходного патрубка. В действительности нижнее отверстие служит для ссыпания частиц в бункер.

### Требования к отчету о проделанной работе

Отчет о выполненной лабораторной работе должен содержать:

- краткое описание теоретической части;
- трехмерную модель детали;
- вывод по результатам проведенной работы.



## Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются инженерам при производстве новых конструкций?

2. Что такое численное моделирование?

3. Какой метод чаще всего используется в численном моделировании? Дайте характеристику данному методу.

4. С помощью какой функции задается название поверхностей модели?

5. Опишите процесс создания плоскости для построения распределения скорости, давления и т. д.

6. Опишите процесс построения поля скоростей, давления и т. д.

7. С помощью каких функций можно отобразить значения параметров?

## Лабораторная работа № 3

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ВНУТРИ ЦИКЛОННОГО СЕПАРАТОРА С БУНКЕРОМ

**Цель работы** – создание проточного объема и расчетной сетки модели, настройка параметров решателя для численного моделирования, запуск численного расчета газодинамики циклонного сепаратора с бункером, получение графической зависимости влияния входной скорости на изменение потери давления, построение поля скоростей внутри устройства.

#### Краткие теоретические сведения

Циклоны используются в качестве устройств для улавливания твердых частиц и капель во многих отраслях промышленности. Существует множество разнообразных конструкций, которые различаются эффективностью работы и энергетическими затратами на проведение процесса очистки.

Циклоны могут использоваться как сепараторы и как устройства для фракционирования мелкодисперсных твердых частиц. Конструкция циклонов существенно влияет на движение потока газа в их проточной части. Известно, что частицы перемещаются от центра к периферии проточной части циклона за счет центробежной силы. Она, в свою очередь, существенно зависит от профиля тангенциальной скорости потока газа.

Как правило, концентрация частиц в газовом потоке мала, и они не оказывают существенное влияние на его структуру, поэтому возможно численное моделирование однофазного потока. Это существенно сокращает время численных расчетов и позволяет уложиться по времени в период проведения лабораторных работ или практических занятий. Для численного исследования течений многофазных сред разработан оригинальный лагранжево-эйлеровский алгоритм, который позволяет проводить анализ каждой из фаз наиболее естественным образом: несущая (диспергирующая) фаза описывается при помощи континуальных моделей (Эйлера, Навье–Стокса и т. п.), а дисперсная фаза – дискретной моделью пробных частиц [4].

Важно отметить, что для большинства циклонов существует большое количество экспериментальных данных. Это позволяет провести верификацию результатов и подобрать наиболее подходящую модель турбулентности или количество элементов разбиения проточной части исследуемого циклона.

### Задание на выполнение лабораторной работы

Выполните численное моделирование газодинамики внутри циклонного сепаратора с бункером. Постройте графическую зависимость, представленную на рис. 3.26, при скоростях 4, 6, 8, 10, 14, 18 м/с. Размеры бункера в зависимости от варианта представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

#### Геометрические размеры бункера

№ варианта	$d \times h$ ( $d$ – диаметр бункера, мм; $h$ – высота бункера, мм)
1	150×180
2	160×190
3	170×170
4	180×200
5	210×220
6	180×180
7	220×200
8	220×220
9	250×250
10	270×270
11	270×300
12	250×400
13	250×450
14	200×400
15	200×450
16	300×350
17	300×400
18	270×270
19	190×270
20	180×260

#### Методика выполнения лабораторной работы

1. Создайте циклонный сепаратор с бункером (рис. 3.1). Откройте Workbench и создайте проект, после чего в «Geometry» загрузите наш циклон, созданный в лабораторной работе № 1 (рис. 3.2).

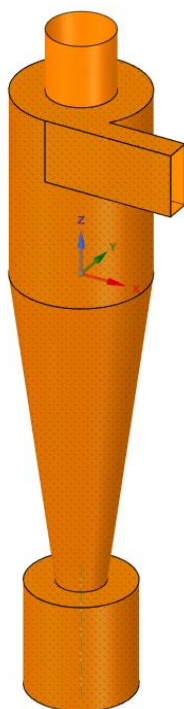


Рис. 3.1. Циклонный сепаратор с бункером

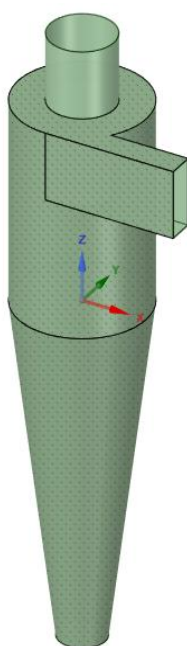


Рис. 3.2. Циклон

2. Постройте цилиндрический бункер диаметром 160 мм и высотой 170 мм. Для этого создайте вспомогательную плоскость на  $ZY$  или на  $ZX$ . Выберите  $ZY$  (рис. 3.3).

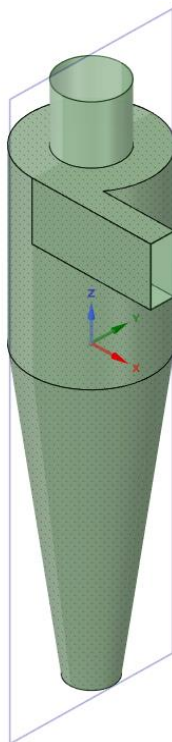


Рис. 3.3. Создание плоскости на  $ZY$

3. На вспомогательной плоскости в режиме эскиза создайте прямоугольник с шириной 80 мм и высотой 170 мм (рис. 3.4).

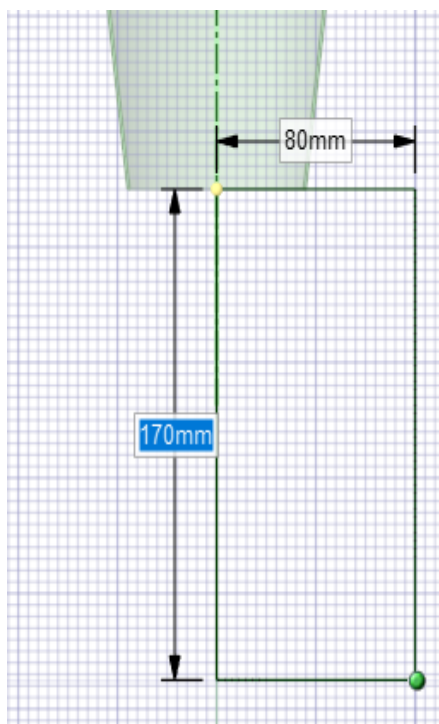


Рис. 3.4. Создание прямоугольника

С помощью команды «Вытянуть» и «Полное вытягивание» создайте цилиндрический бункер (рис. 3.5).

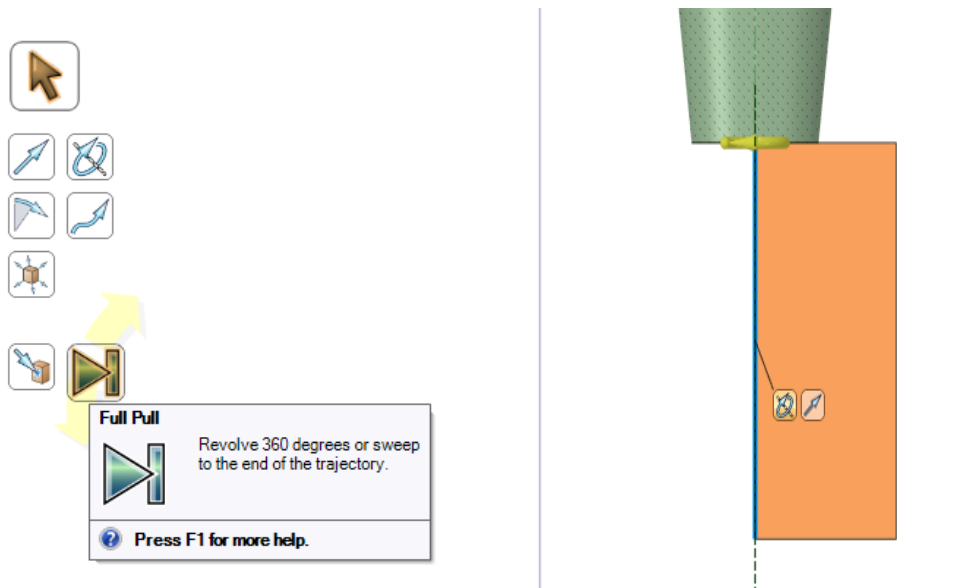


Рис. 3.5. Операция «Pull»

4. После того как получили модель циклона с бункером (рис. 3.6), задайте толщину 1 мм с помощью команды «Оболочка» (рис. 3.7).



Рис. 3.6. Циклон с бункером

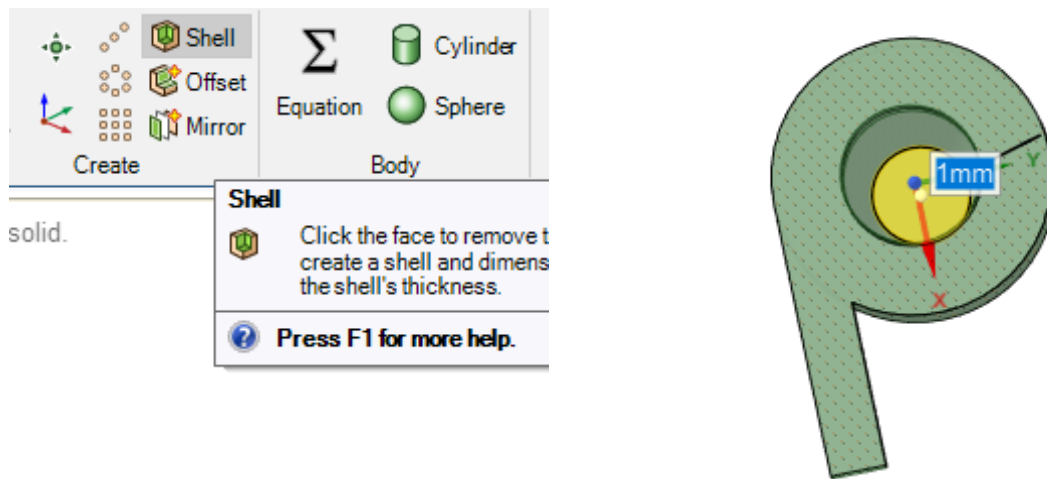


Рис. 3.7. Толщина стенок бункера 1 мм

Для проверки разрежьте деталь с помощью команды «Section mode» (рис. 3.8).

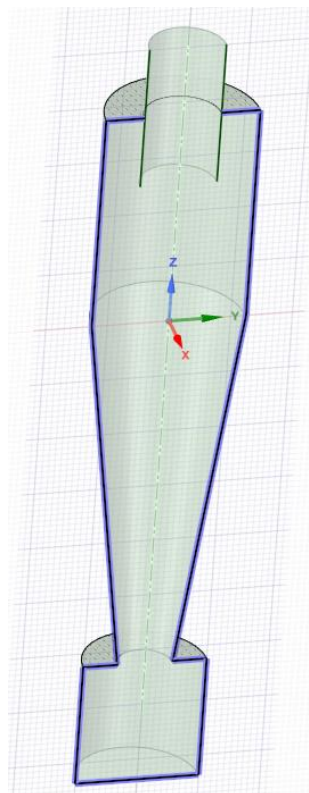


Рис. 3.8. Проверка 3D-модели

5. Теперь создайте проточную часть. Откройте вкладку «Prepare» и выберите «Volume extract». Далее «Select edges», после чего выберите кромки входного и выходного патрубка (рис. 3.9).

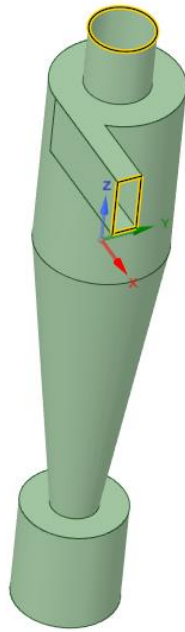


Рис. 3.9. Выделение кромок

Отключив в структуре «Твердое тело», получите модель, представленную на рис. 3.10.

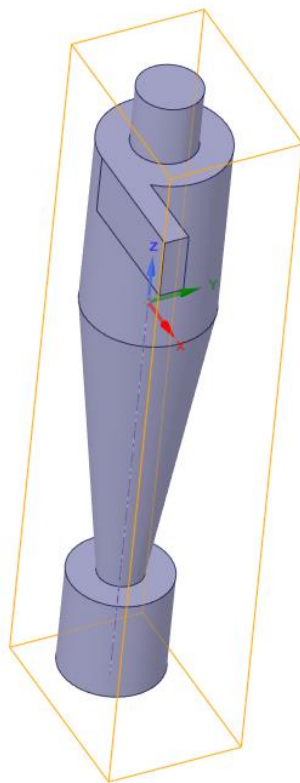


Рис. 3.10. Создание проточного объема



6. Верните галочку на «Твердое тело» в структуре и закройте программу, перейдите к следующему блоку – создание сетки «Mesh».

Для удобства скройте твердотельность детали «Hide body» (рис. 3.11).

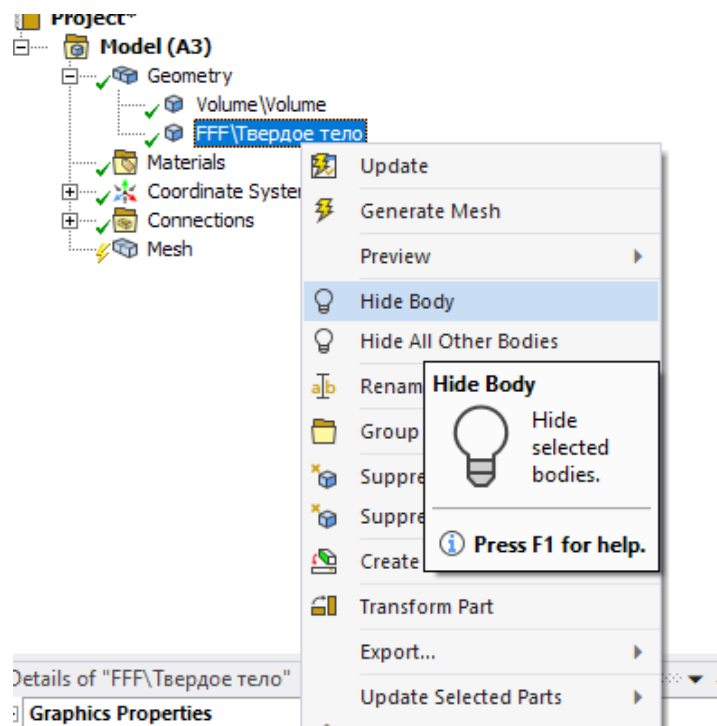


Рис. 3.11. Команда «Hide body»

7. Выделите проточную часть и задайте «Fluid» (рис. 3.12).

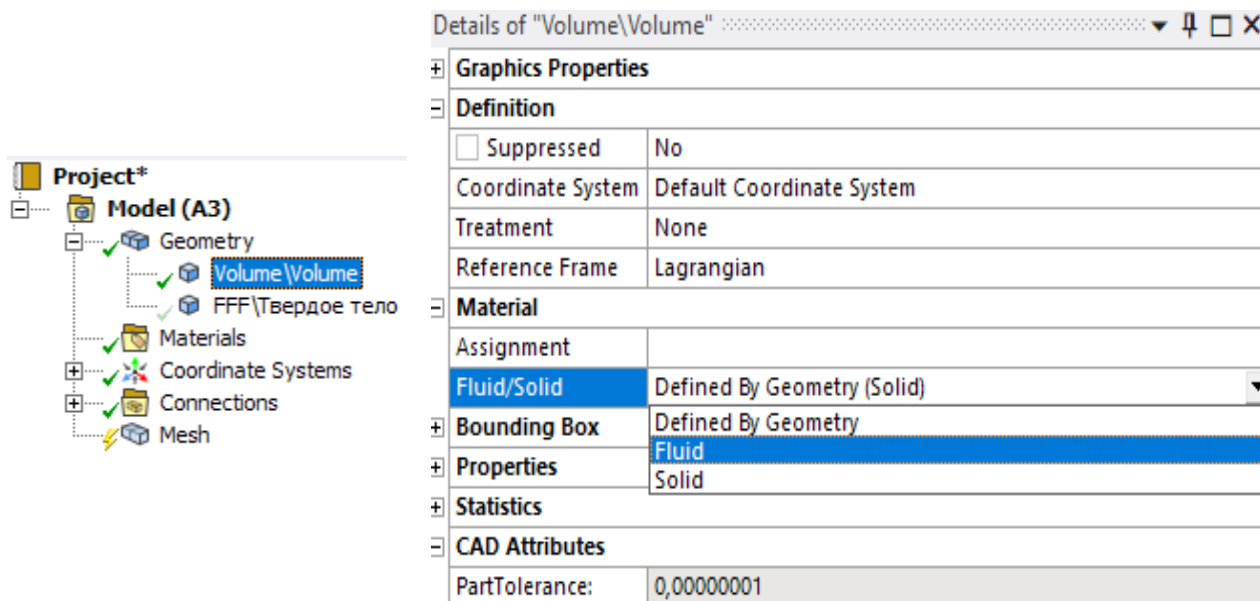


Рис. 3.12. Команда «Fluid»

На входном патрубке задайте «Velocity-inlet» (рис. 3.13).

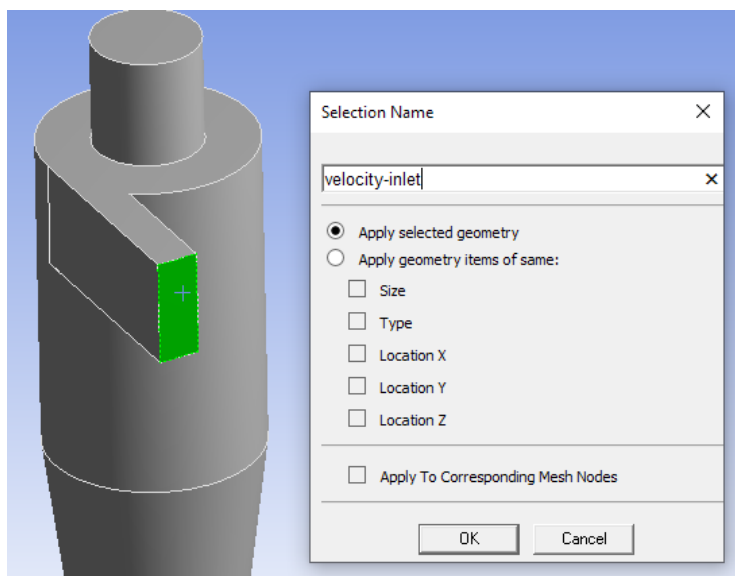


Рис. 3.13. Выполнение команды «Velocity-inlet»

На выходном патрубке задайте «Pressure-outlet» (рис. 3.14).

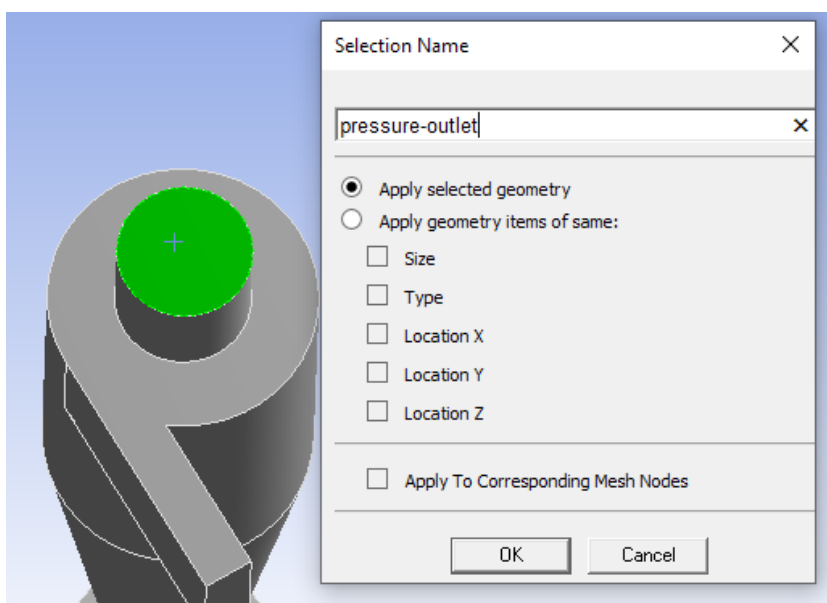


Рис. 3.14. Выполнение команды «Pressure-outlet»

8. Далее создайте сетку командой «Generate». В случае ошибки увеличьте количество ячеек. В базовом случае в качестве «Element size» было значение  $5,6456e-002\text{m}$ . Задайте  $0,01\text{ m}$  (рис. 3.15). Нажмите «Generate».

Details of "Mesh" <span style="float: right;">▼ 🔍 □ ×</span>	
[-] <b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] <b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input checked="" type="checkbox"/> Element Size	0.01
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
[+] <b>Sizing</b>	
[+] <b>Quality</b>	
[+] <b>Inflation</b>	
[+] <b>Assembly Meshing</b>	
[+] <b>Advanced</b>	
[+] <b>Statistics</b>	

Рис. 3.15. Увеличение количества ячеек

9. После успешно созданной сетки (рис. 3.16) закройте программу и нажмите на сетке «Update».

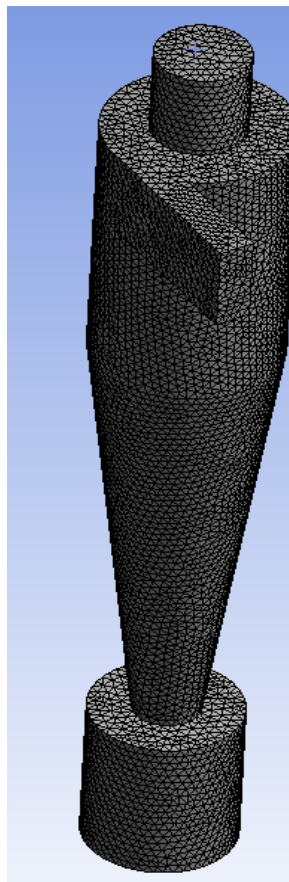


Рис. 3.16. Создание сетки

10. Откройте блок «Setup» (рис. 3.17).

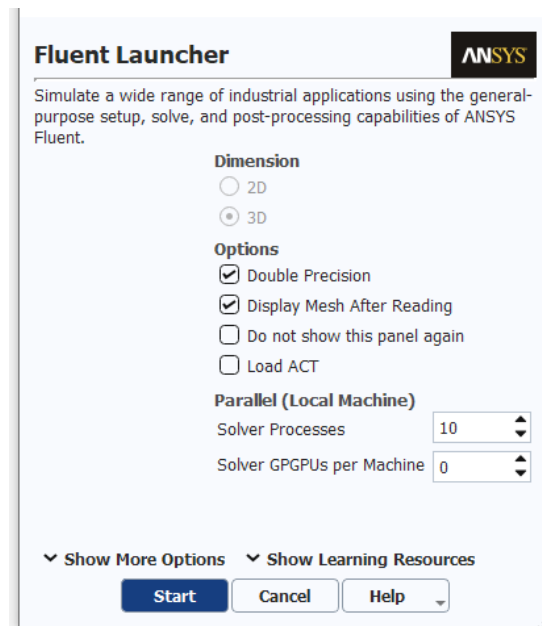


Рис. 3.17. Блок «Setup»

11. В общих настройках включите гравитацию и задайте значение величины по оси Z (рис. 3.18).

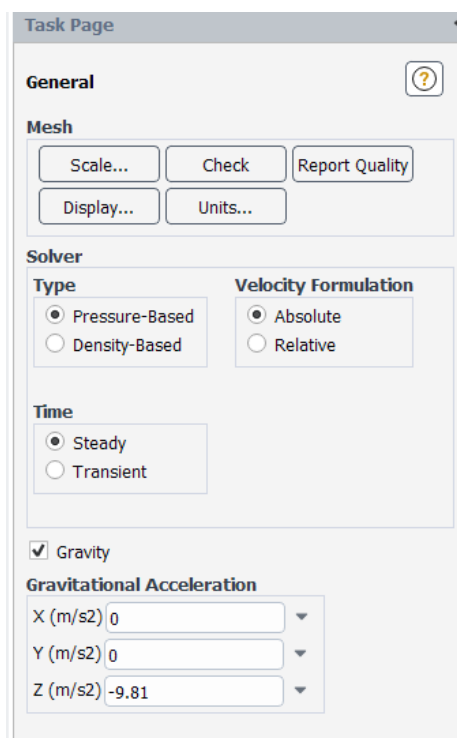


Рис. 3.18. Блок «Gravity»

12. Далее выберите модель турбулентности «Transition SST» (рис. 3.19).

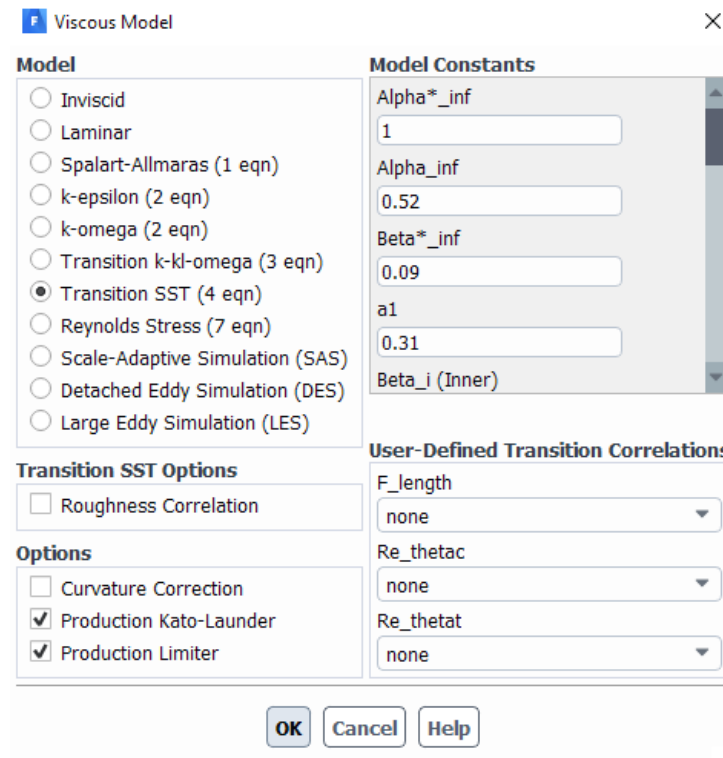


Рис. 3.19. Выбор модели турбулентности

Задайте значение скорости, равное 10 м/с (рис. 3.20).

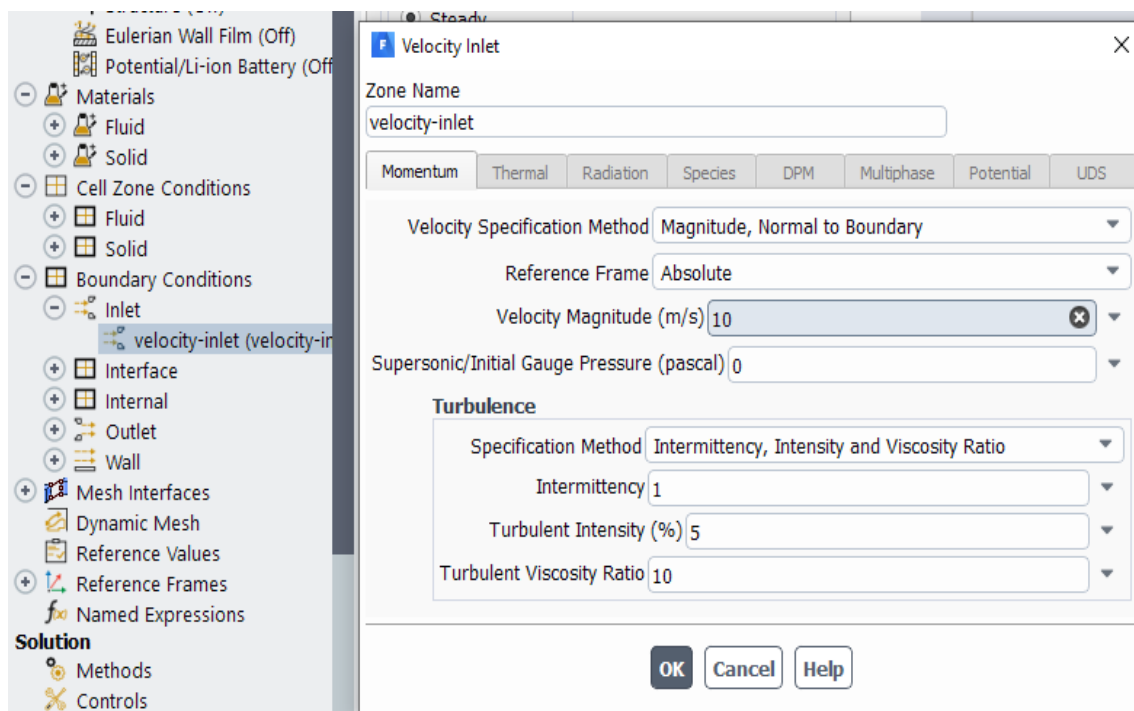


Рис. 3.20. Выбор значения скорости

13. В качестве схемы решения оставьте «Simple» и нажмите «Default» (рис. 3.21).

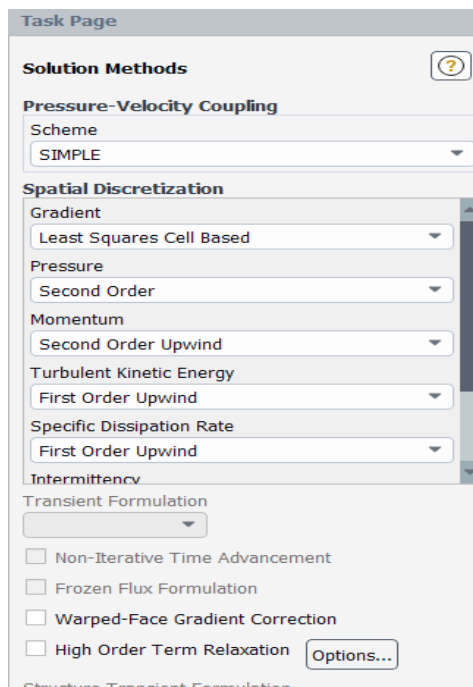


Рис. 3.21. Выбор «Solution Methods»

14. При выборе «Solution Initialization» укажите «Standard Initialization» (рис. 3.22).

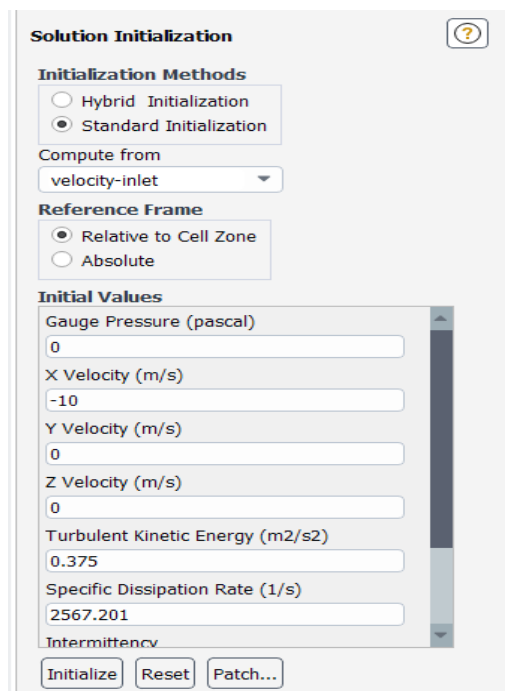


Рис. 3.22. Выбор «Solution Initialization»

15. Далее в «Run Calculation» задайте 500 итераций и нажмите «Calculate» (рис. 3.23).

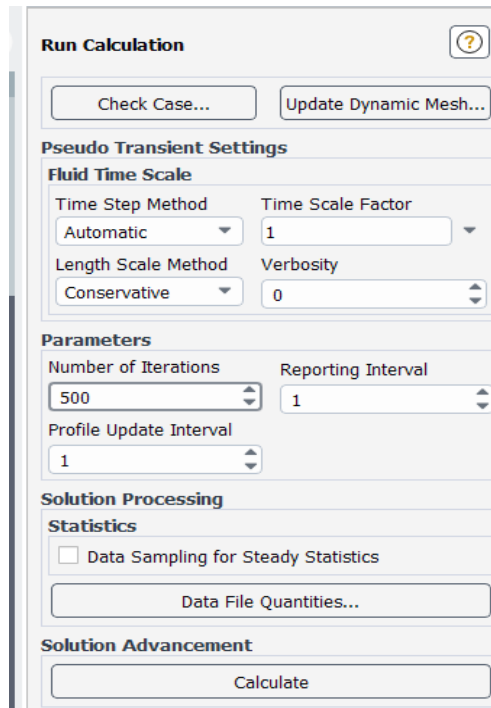


Рис. 3.23. Количество итераций и начало расчета

16. По завершению расчета перейдите во вкладку «Results» и откройте «Surface Integrals». Рассчитайте скорости на входном и выходном патрубках (рис. 3.24).

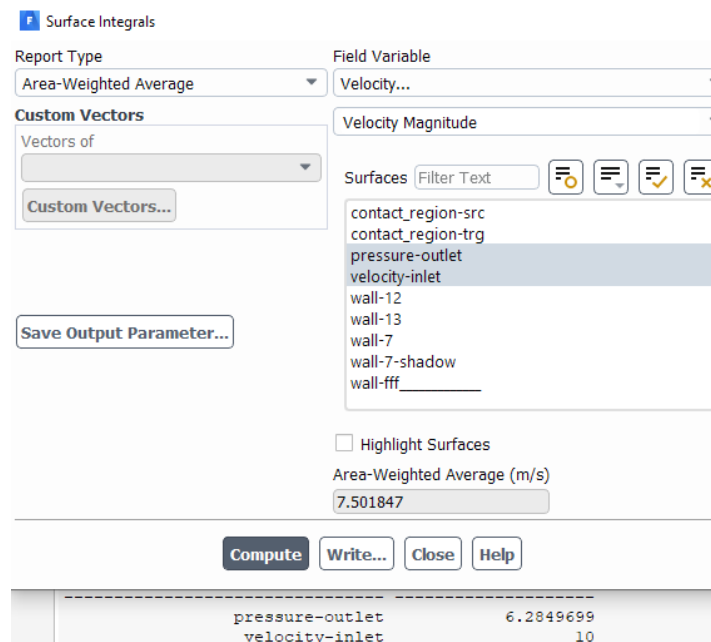


Рис. 3.24. Скорости на входе и выходе

17. Определите перепад давления (рис. 3.25). Как видно, он составляет около 187,58 Па.

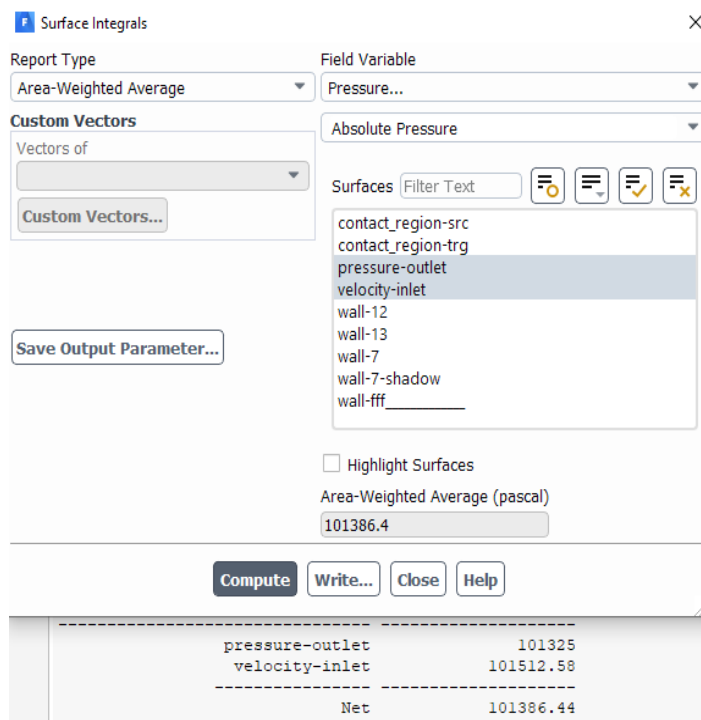


Рис. 3.25. Давление на входном и выходном патрубках

Следует отметить, что при изменении в настройках входной скорости «Velocity-inlet» на различные значения можно получить графическую зависимость влияния входной скорости на изменение потери давления (рис. 3.26).

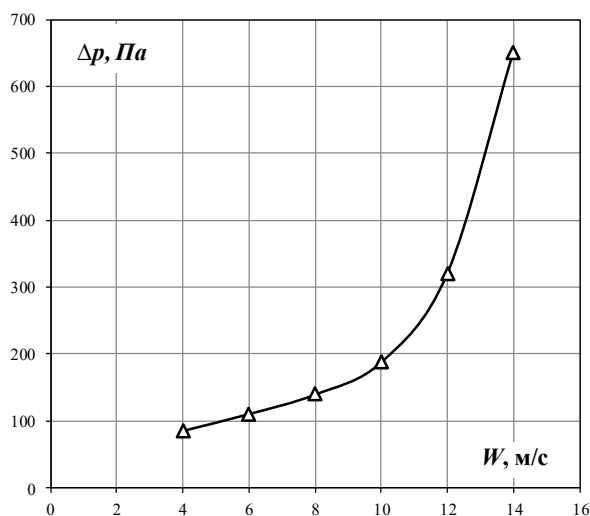


Рис. 3.26. Изменение потери давления в зависимости от входной скорости



18. Постройте поле скоростей в циклонном сепараторе. Для этого создайте вспомогательную плоскость и построьте на ней поле скоростей (рис. 3.27).

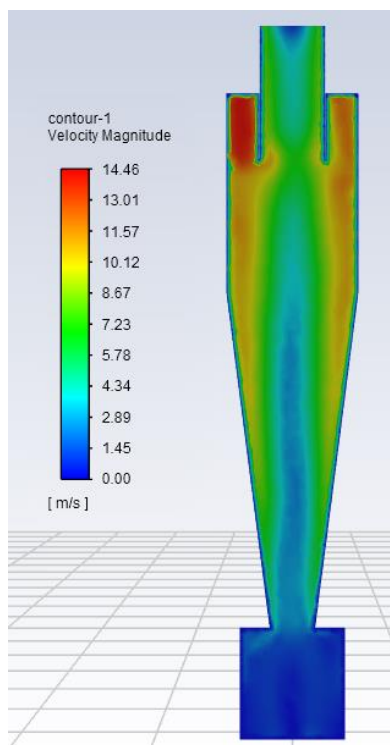


Рис. 3.27. Поле скоростей в циклонном сепараторе

Как видно, максимальная скорость достигается на входе в циклон и ближе к периферии в верхней части устройства.

### **Требования к отчету о проделанной работе**

Отчет о выполненной лабораторной работе должен содержать:

- краткое описание теоретической части;
- трехмерную модель детали;
- вывод по результатам проведенной работы.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните назначение циклонов.
2. Расскажите о возможностях циклонов. Как происходит перемещение частиц внутри устройств?
3. Опишите численное моделирование однофазного и многофазного потока.
4. С помощью какой функции можно скрыть твердость модели?

## Лабораторная работа № 4

### ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ЦИКЛОННОМ СЕПАРАТОРЕ С БУНКЕРОМ

**Цель работы** – запуск численного расчета движения частиц в циклонном сепараторе с бункером в соответствии с приведенными вариантами.

#### Краткие теоретические сведения

Очистке газовых потоков от мелкодисперсных частиц уделяется достаточно большое внимание. Однако существующие аппараты – фильтры тонкой очистки, достаточно быстро забиваются пылью и их эффективность существенно снижается. Поэтому проблема повышения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц из газовых потоков является актуальной.

Мелкие твердые частицы (с диаметром 2,5 мкм или менее) являются наиболее сильными загрязнителями воздуха и одной из наиболее серьезных экологических проблем в связи с быстрым ростом промышленности [5]. Мелкодисперсные частицы являются основной причиной тумана и дыма. Более того, эпидемиологические и токсикологические исследования показали, что мелкие частицы могут поглощать различные токсичные и вредные вещества из-за своей большой площади поверхности [6]. Эти опасные вещества могут растворяться в крови через бронхи и альвеолы легких, что легко приводит к респираторным и сердечно-сосудистым заболеваниям и наносит серьезный вред здоровью человека [7]. Согласно исследованию, проведенному «Глобальным бременем болезней», мелкие твердые частицы размером 2,5 мкм или менее стали причиной 1,1 млн смертей в Китае и 4,2 млн – во всем мире в 2015 году [8].

Выбросы пыли во время промышленных процессов являются одним из основных источников загрязнения мелкими твердыми частицами. Поэтому степень выбросов твердых частиц размером 2,5 мкм или менее зависит от технологического процесса промышленного производства. Таким образом, эффективная технология разделения играет важную роль в улавливании мелких твердых частиц из газовых потоков [9].

Основные методы улавливания частиц из промышленного газа включают электростатическую сепарацию [10], отстойную сепарацию [11], мешкообразные пылесборники [12] и вращающуюся центробежную сепарацию [13]. Однако электростатическое разделение имеет высокую

эксплуатационную стоимость и потенциальный риск безопасности; отстойное разделение требует длительного времени оседания и всегда демонстрирует низкую эффективность и большую площадь пола; пылеулавливание мешочного типа трудно поддерживать при стабильной работе в течение длительных периодов времени и имеет высокие затраты на техническое обслуживание. Циклон является важным элементом вращающегося центробежного сепарационного оборудования, которое имеет преимущества высокой эффективности сепарации, низкого энергопотребления, малого размера конструкции, большой перерабатывающей способности, лёгкой эксплуатации и технического обслуживания, и пригоден для непрерывной длительной работы [14]. Поэтому циклоны широко используются при улавливании частиц [15], сортировке частиц [16], отборе проб частиц, очистке газов [17], предотвращении и обработке атмосферных загрязнений [18] и оптимизации промышленного процесса [19]. Расчет циклонных сепараторов является важной составляющей для подбора определенной конструкции устройства под решение конкретных технологических задач. В лабораторной работе рассмотрен процесс расчета циклона в численном пакете.

### **Задание на выполнение лабораторной работы**

Выполните численный расчет движения частиц в циклонном сепараторе с бункером. Проанализируйте движение частиц в циклонном сепараторе в зависимости от варианта.

Таблица 4.1

#### Входная скорость газового потока в циклонном сепараторе

№ варианта	W, м/с (входная скорость)
1	5
2	6
3	7
4	8
5	9
6	10
7	11
8	12
9	13

Окончание табл. 4.1

№ варианта	$W$ , м/с (входная скорость)
10	14
11	15
12	16
13	17
14	18
15	19
16	20
17	21
18	22
19	23
20	24

### Методика выполнения лабораторной работы

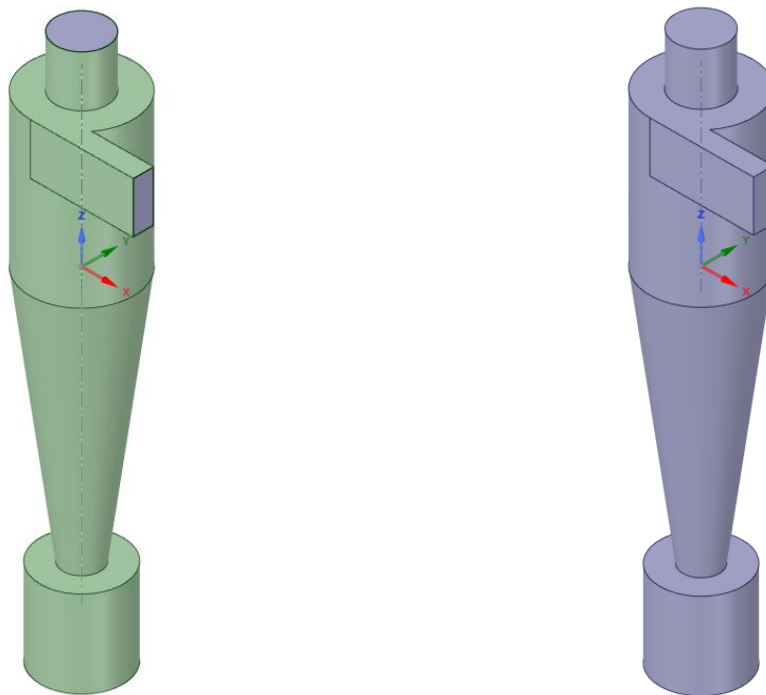


Рис. 4.1. Циклонный сепаратор с бункером

1. Откройте ранее созданный в лабораторной работе № 3 циклонный сепаратор с бункером (рис. 4.1). Перейдите в «Mesh», скройте твердотельную деталь «Hide body», в настройках проточной части установите «Fluid». Назовите входную грань «Velocity-inlet», выходную грань – «Pressure-outlet» (рис. 4.2).

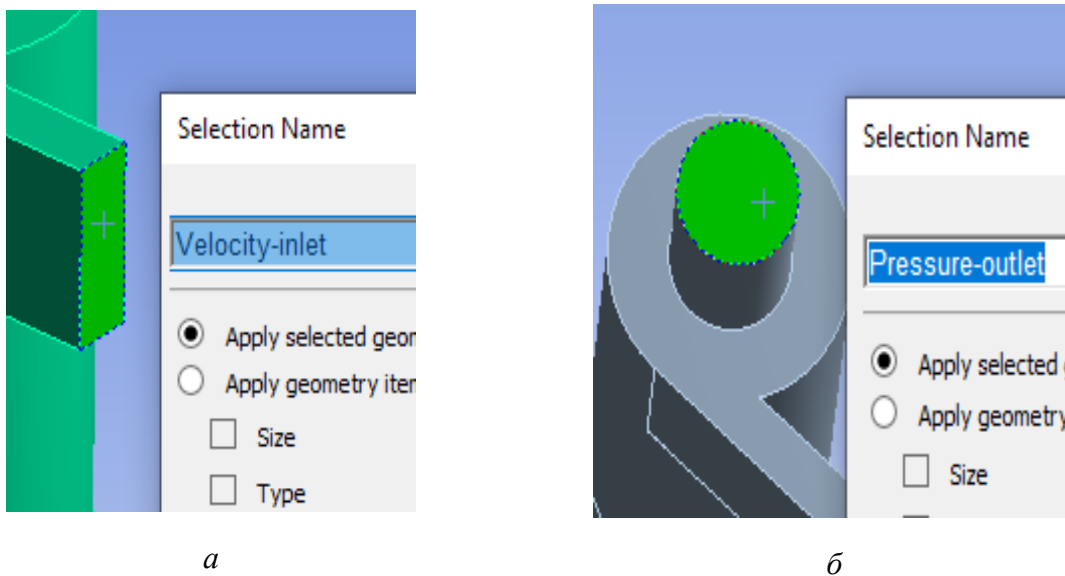


Рис. 4.2. Обозначение граней: *a* – вход; *б* – выход

2. Также дайте определение бункеру, выделите грани через CTRL и задайте «Wall-dustoutlet» (рис. 4.3).

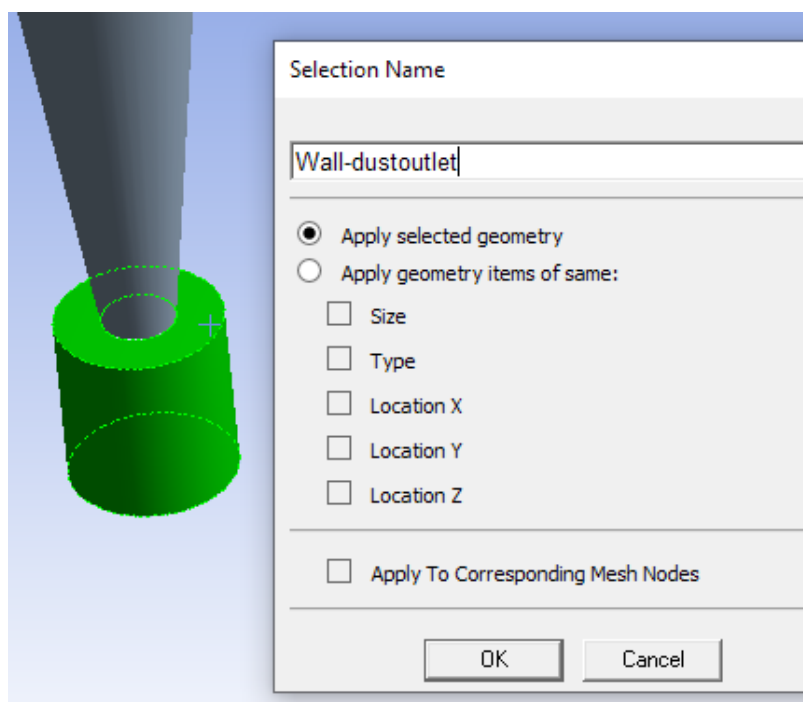


Рис. 4.3. Выполнение команды «Wall-dustoutlet»

3. Создайте сетку «Generate», в случае возникновения ошибки уменьшите ее, например до 0,0125 м. Далее перейдите к блоку «Setup». В общих настройках включите «Gravity» (рис. 4.4).

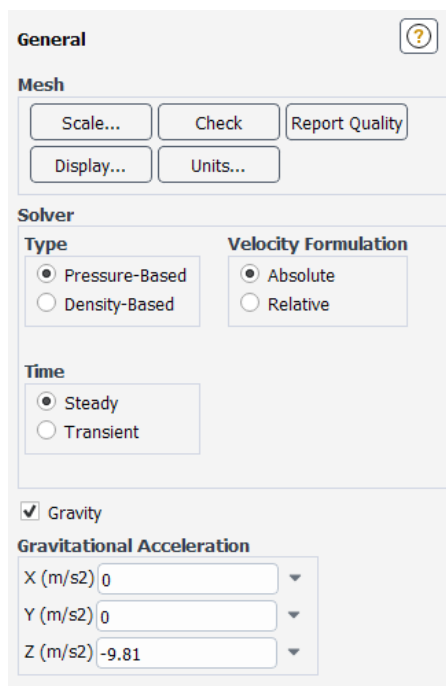


Рис. 4.4. Общие настройки

4. При выборе модели турбулентности активизируйте «Reynolds Stress» (рис. 4.5).

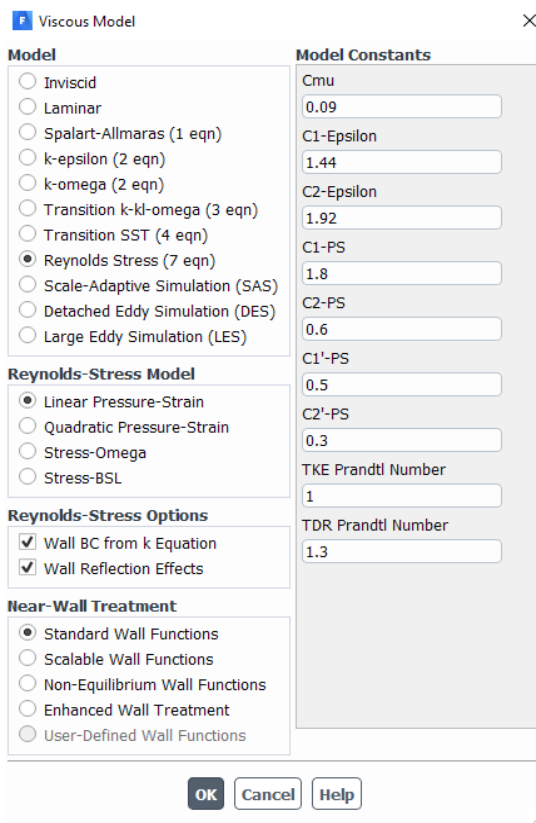


Рис. 4.5. Общие настройки «Viscous Model»

5. Активизируйте дискретную фазу и перейдите к ее настройке (рис. 4.6, 4.7).

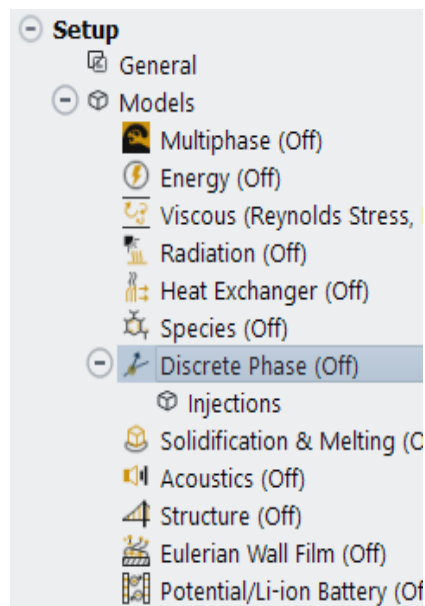


Рис. 4.6. Активация дискретной фазы

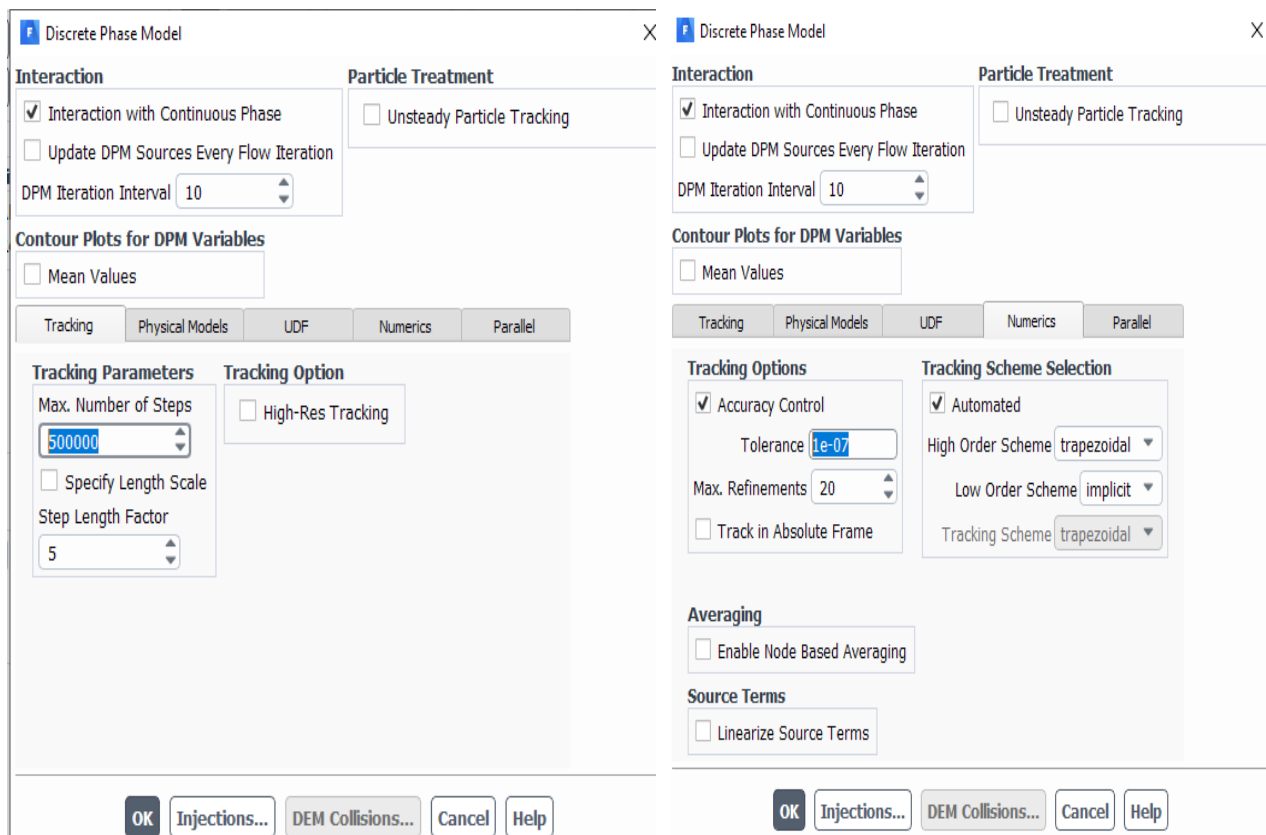


Рис. 4.7. Настройка дискретной фазы

6. Перейдите к настройке введения частиц «Injections» (рис. 4.8).

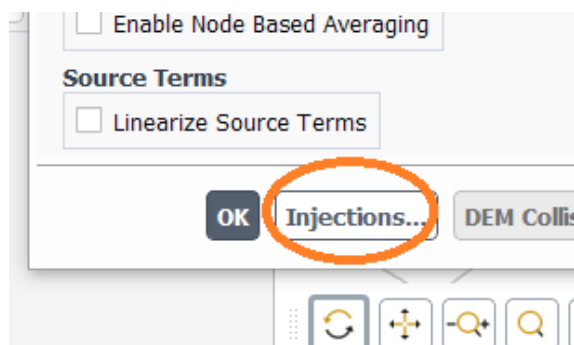


Рис. 4.8. Настройка «Injections»

7. Далее нажмите «Create» (рис. 4.9).

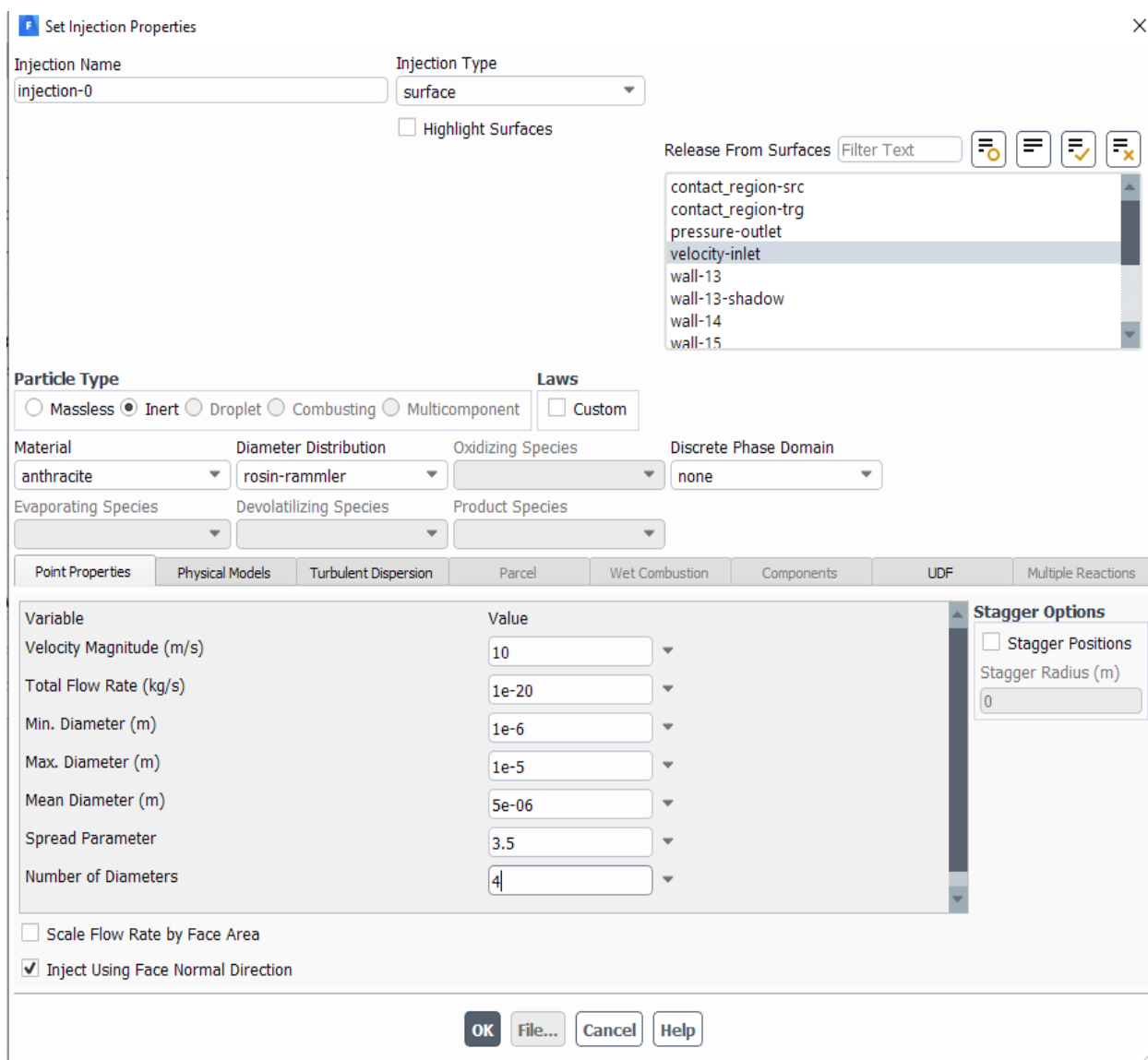


Рис. 4.9. Настройка введения частиц в устройство



8. В верхней вкладке «Physics» активируйте «Operating density» (рис. 4.10).

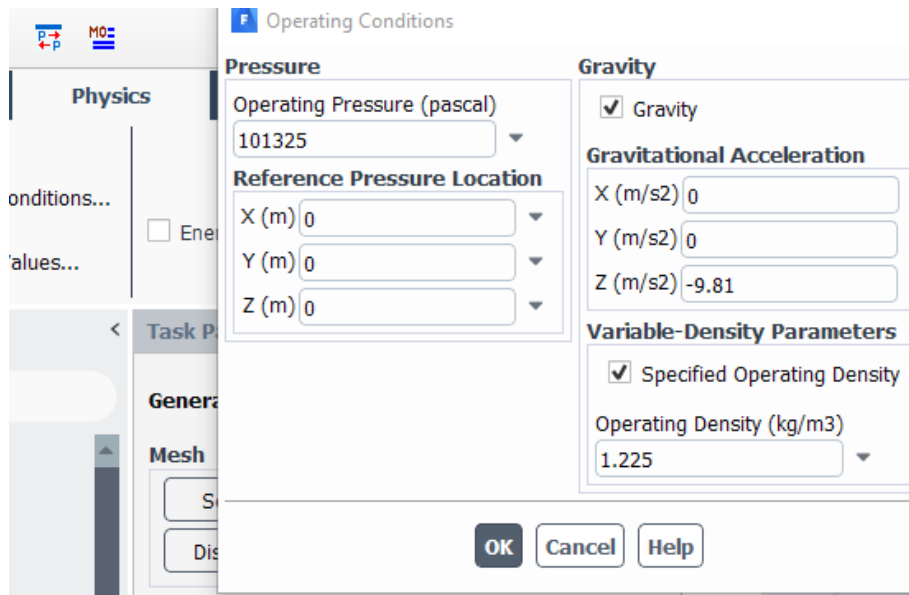


Рис. 4.10. Команда «Operating density»

9. Перейдите к настройке граничных условий. На входе задайте скорость 10 м/с (рис. 4.11).

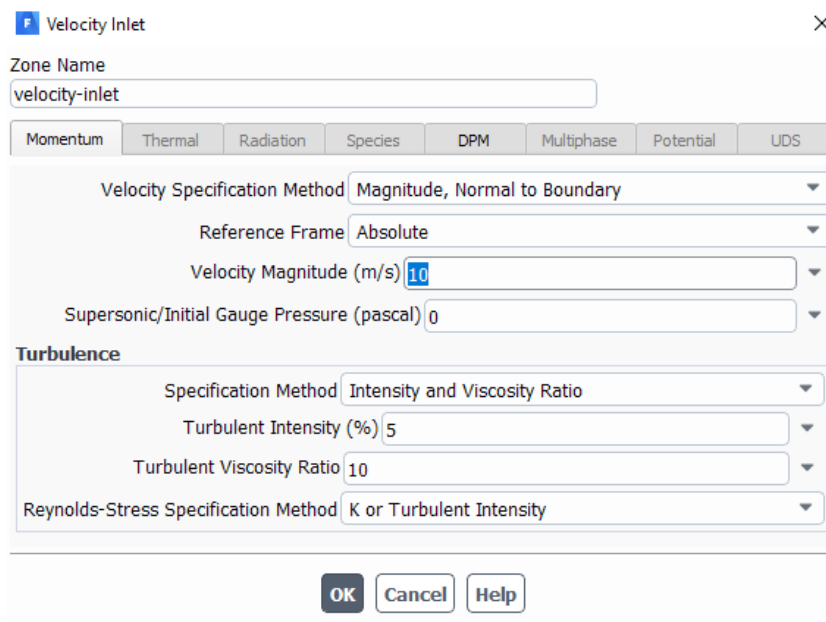


Рис. 4.11. Входная скорость 10 м/с

10. Далее выберите «Wall-dustoutlet-contact\_region-trg» и нажмите «Edit» (рис. 4.12).

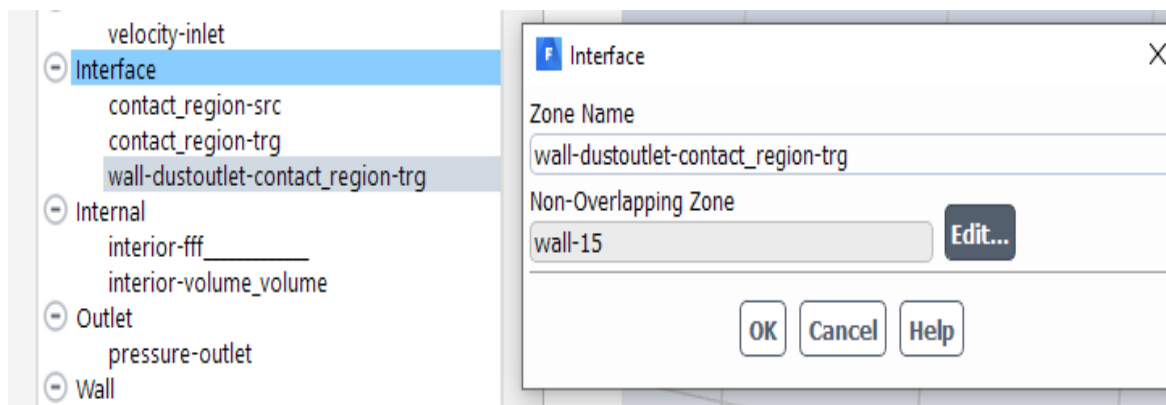


Рис. 4.12. Настройка бункера

11. В настройках выберите «Трап» (рис. 4.13).

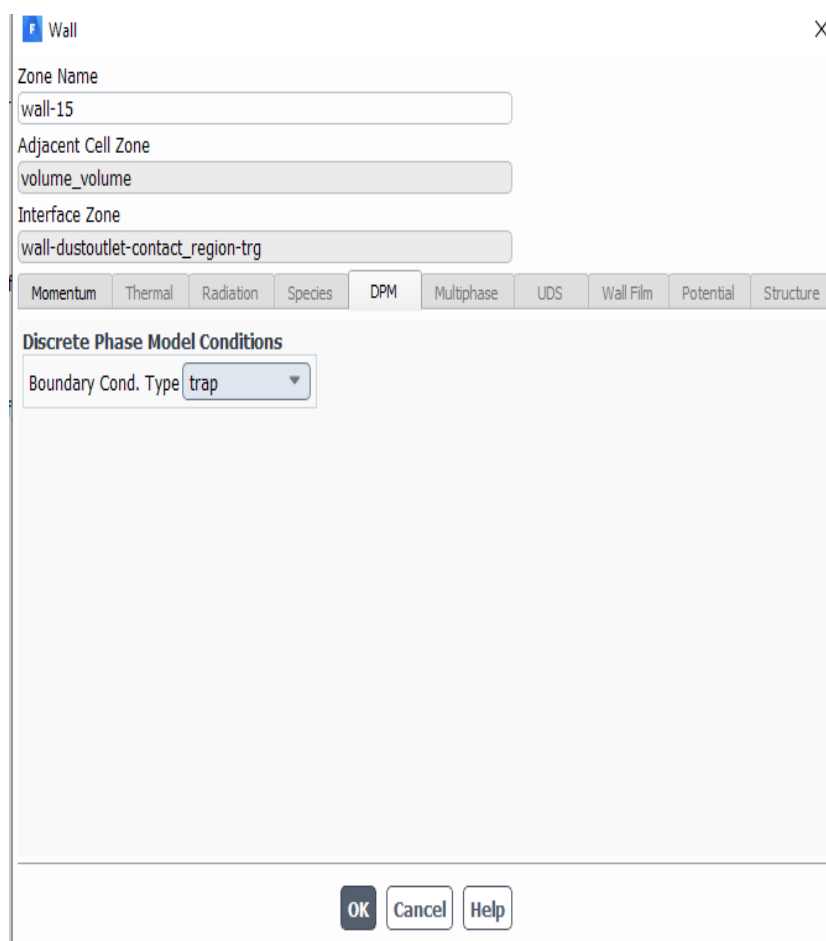


Рис. 4.13. Выбор «Трап»

12. Настройки в «Methods» оставьте базовыми. В настройках «Initialization» выберите «Standard Initialization» (рис. 4.14).

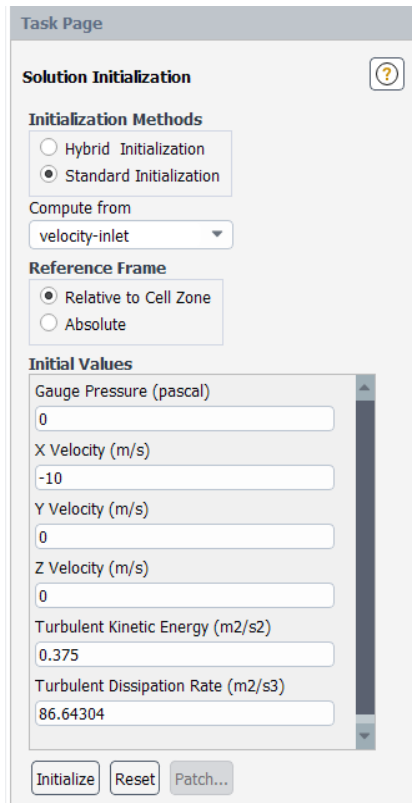


Рис. 4.14. Настройки «Initialization»

13. Далее задайте 1200 итераций и начните расчет (рис. 4.15).

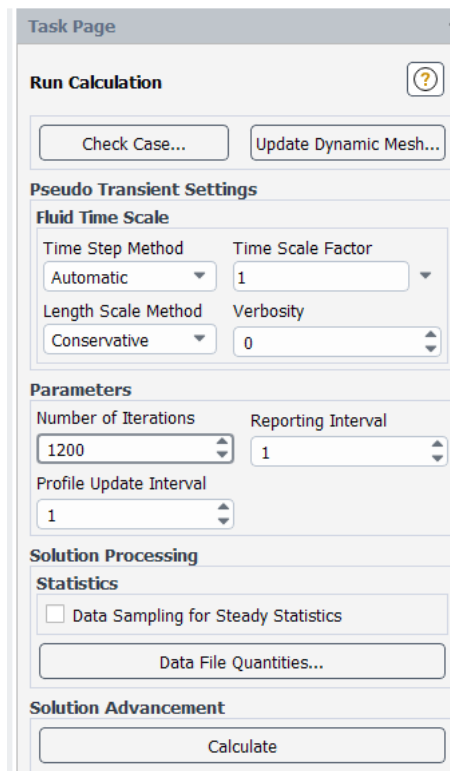


Рис. 4.15. Запуск расчета

14. После завершения расчета перейдите в блок «Results», в котором выберите «Default Transform». Настройте отображение движения частиц: в пункте «Injections» выберите частицы, в «Reduction Type» выберите «Maximum Number of Tracks», в пункте «Max Tracks» выберите 10 и нажмите «Apply» (рис. 4.16).

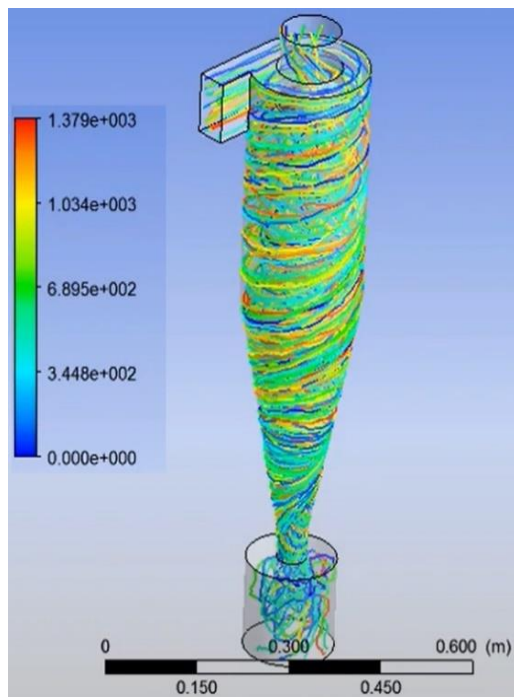


Рис. 4.16. Движение частиц

### **Требования к отчету о проделанной работе**

Отчет о выполненной лабораторной работе должен содержать:

- краткое описание теоретической части;
- трехмерную модель детали;
- визуализацию движения газовой среды;
- вывод по результатам проведенной работы.

### **Контрольные вопросы**

1. Какая проблема возникает при улавливании мелкодисперсных частиц фильтрами тонкой очистки?
2. Какую серьезную опасность несут в себе мелкие твердые частицы?
3. Каким образом происходит загрязнение твердыми частицами на производстве? От чего зависит степень их выбросов?

4. Перечислите основные методы улавливания частиц из промышленного газа. Расскажите об их преимуществах и недостатках.
5. Опишите настройку дискретной фазы.
6. Как осуществляется создание частиц в решателе?
7. Как происходит настройка отображения движения частиц?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Циклонные сепараторы. Особенности и принцип их работы. – Текст : электронный // CADFEM eLearning: сайт. – 2021. – URL: <https://abtechnologies.com.ua/poleznye-instrumenty/tsiklonnyye-separatory-osobennosti-i-printsip-ikh-raboty/> (дата обращения: 12.01.2021).
2. Elsaye, K. Modeling of the Gas and Particle Flow in the Cyclone Separator using LES, RANS and Mathematical Models / K. Elsaye, C. Lacor // The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering. – Military Technical College. – 2010. – Vol. 14. – № 14th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering. – P. 1–10.
3. Численное моделирование (numerical simulation). - Текст : электронный // АВ Technologies: сайт. – 2021. – URL: <https://elearning.cadfem-cis.ru/numerical-simulation/> (дата обращения: 15.01.2021).
4. Головачев, Ю. П. Численное моделирование газодинамических явлений / Ю. П. Головачев, А. И. Жмакин, А. А. Шмидт // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69. – №. 9. – С. 46–49.
5. Trends on PM<sub>2.5</sub> research, 1997 – 2016 : a bibliometric study / S. Yang, J. Sui, T. Liu [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – Vol. 25 (13). – P. 12284–12298.
6. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM<sub>2.5</sub> / C. S. Liang, F. K. Duan, K. B. He [et al.] // Environment International. – 2016. – Vol. 86. – P. 150–70.
7. On the elemental composition of PM<sub>2.5</sub> in central Cairo, Egypt / J. Boman, A. A. Shaltout, A. M. Abozied [et al.] // X-Ray Spectrometry. – 2013. – Vol. 42 (4). – P. 276–283.
8. Estimates and 25year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution : an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 / A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett [et al.] // Lancet. – 2017. – Vol. 389 (10082). – P. 1907–1918.
9. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM<sub>2.5</sub> / C. S. Liang, F. K. Duan, K. B. He [et al.] // Environment International. – 2016. – Vol. 86. – P. 150–70.
10. Linse, P. Electrostatic attraction and phase separation in solutions of like-charged colloidal particles / P. Linse, V. Lobaskin // Physical review letters. – 1999. – Vol. 83 (20). – P. 4208–4211.
11. Particle Shape Influences Settling and Sorting Behavior in Microfluidic Domains / H. Basagaoglu, S. Succi, D. Wyrick [et al.] // Scientific reports. – 2018. – Vol. 8 (1). – P. 8583.

12. Effects of temperature, dust concentration, and filtration superficial velocity on the loading behavior and dust cakes of ceramic candle filters during hot gas filtration / J. Lin, T. C. Hsiao, S. S. Hsiao [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2018. – Vol. 198. – P.146–154.

13. Effect of new blade of centrifugal separator on particle separation performance / T. Yamamoto, T. Kageyama, H. Yoshida [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2016. – Vol. 162. – P. 120–126.

14. Cyclonic gas stripping deoiling and gas flow acceleration classification for the resource utilization of spent catalysts in residue hydrotreating process / P. B. Fu, H. L. Wang, J. P. Li [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 190. – P. 689–702.

15. Enhancement of solid particle separation efficiency in gas cyclones using electro-hydrodynamic method / W. I. Mazyan, A. Ahmadi, H. Ahmed [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2017. – Vol. 182. – P. 29–35.

16. Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone / J. Jiao, Y. Zheng, G. Sun [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2006. – Vol. 49 (2). – P. 157–166.

17. Cena, L. G. A personal nanoparticle respiratory deposition (NRD) sampler / L. G. Cena, T. R. Anthony, T. M. Peters // *Environmental science & technology*. – 2011. – Vol. 45 (15). – P. 6483–90.

18. A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments / M. S. Shin, H. S. Kim, D. S. Jang [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2005. – Vol. 25 (11–12). – P. 1821–1835.

19. Efficient gas-liquid cyclone device for recycled hydrogen in a hydrogenation unit / L. Ma, Q. Shen, J. Li [et al.] // *Chemical Engineering & Technology*. – 2014. – Vol. 37 (6). – P. 1072–1078.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ .....	4
Лабораторная работа № 1. Построение трехмерной геометрии циклонного сепаратора .....	5
Лабораторная работа № 2. Численное моделирование газодинамики внутри циклонного сепаратора .....	20
Лабораторная работа № 3. Численное моделирование газодинамики внутри циклонного сепаратора с бункером .....	42
Лабораторная работа № 4. Численный расчет движения частиц в циклонном сепараторе с бункером .....	58
Библиографический список .....	70



*Учебное издание*

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Практикум

Составители: **Зинуров** Вадим Эдуардович,  
**Дмитриев** Андрей Владимирович,  
**Бадретдинова** Гузель Рамилевна

Кафедра теоретических основ теплотехники КГЭУ

Редактор *С. Н. Чемоданова*  
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченковой*

Подписано в печать 01.03.2022.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 4,24. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж экз. Заказ № 398/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51