### Лабораторная работа № 1

**Течение вязкой жидкости в прямом плоском канале**

### Постановка задачи

Задача состоит в моделировании плоского ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале, наблюдении за динамикой его установления и анализе установившегося течения (которое является аналогом известного течения Пуазейля в прямой круглой трубе).

**Условие задачи***.* Вязкая несжимаемая жидкость течет между двумя плоскостями, находящимися на расстоянии 2*h*. Течение принимает свою окончательную форму (установившейся, стационарный режим) не сразу: после определенного разгона на протяжении некоторого промежутка времени. В установившемся режиме профиль скорости становится параболическим лишь на некотором расстоянии от начала канала.

**Целью** работы является нахождение профиля скорости и границ применимости теоретического расчета (формула 1.). Полученный в численном эксперименте профиль необходимо сравнить с параболическим, а границы применимости ― с эмпирической оценкой [3].

 (1)

### Задание

1. Создать геометрическую основу задачи: плоский канал {смотри примечание 1}.

* Нарисовать плоский прямоугольник: С помощью кнопки «Линия» нарисовать прямоугольник так, чтобы начало координат istochka находилось в левом нижнем углу создаваемого прямоугольника. В приведенном ниже варианте размер канала задается равным 4×30 см: в силу симметрии строится только его половина.
* Задать границы. В данном примере различают четыре типа границы: верхняя, правая, левая грани и остальные {примечание 2}.
* Экспортировать/импортировать созданное тело {примечание 3}:

1. Выбрать расчетную модель. В данной задаче решаются уравнения Навье–Стокса для ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости ― воды.
2. Ввести физические параметры, плотность ― 1000 кг/м3 и вязкость («Молекулярная вязкость») ― 10–3 Па∙с.
3. Ввести граничные условия. На передней, задней и нижней грани ставится условие «Стенки с проскальзыванием», на верхней грани ― условие «Стенки» (без проскальзывания), на правой грани   
   (у выхода из канала) ― условие свободного вытекания с нулевым давлением (тип границы ― «Свободный выход», тип граничного условия ― «Нулевое давление/Выход»). На левой грани (у входа в канал) тип границы ― «Вход/Выход»; при этом сначала следует ставить граничное условие с заданным давлением (0.005 Па), а другой расчет можно провести с заданной скоростью (0.001 м/с) {примечание 4}.
4. Специальных начальных условий в данной задаче не ставится в связи с необходимостью проследить процесс установления течения. По умолчанию во всей расчетной области в начальный момент времени предполагается нулевая скорость и нулевое давление.
5. Создать расчетную сетку: в целях экономии машинных ресурсов. В рассматриваемой задаче рекомендуется создать следующую расчетную сетку: число ячеек в горизонтальном направлении — 30–100, в вертикальном — 20–60. Параметры численного метода в данной задаче изменять не требуется.
6. Настроить работу постпроцессора:

а) создать плоскость (плоскость расчета) {примечание 5},

б) создать горизонтальную линию на оси канала (у нижней границы: «Опорная точка»: *x*0 = 0.005, *y*0 = 0.001, *z*0 = 0.005) {примечание 6},

в) создать 3 вертикальных линии на разном расстоянии от входа в канал. Для варианта, приведенного ниже, линии находились на расстоянии 5, 15, 25 см от начала канала («Опорная точка»: *x*0 = 5, *y*0 = 0, *z*0 = 0.005),

г) на каждой линии {примечание 7} построить двумерный график (график давления на горизонтальной линии и график *X*-компоненты скорости на вертикальных линиях). Для каждого графика на вертикальных линиях нужно выбрать одинаковую длину оси 0.05 (в данном случае) и, возможно, изменить ориентацию плоскости на 90 или 270 градусов.

1. Отобразить распределение скорости в канале {примечание 8}.
2. Для ускорения расчета в разделе «Общие параметры» во вкладке «Шаги» можно задать «Макс. шаг» = 10, CFL = 100.
3. Выполнить предварительный и окончательный расчет задачи.
4. Представить отчет о проделанной работе {примечание 9}, в который включить следующую таблицу:

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета скорости и длины установления течения

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *u*max*e* | *u*max*t* | *Le* | *Lt* |
|  |  |  |  |

Здесь введены следующие обозначения:

*u*maxe ― максимальная скорость, найденная в численном эксперименте; *u*maxt― максимальная скорость, рассчитанная по формуле (2);

 (2)

*Le* ― длина установления течения из численного эксперимента;

*Lt* ― длина установления, полученная из оценки 0.03 Re·2*h*.

### Представление и анализ результатов

1. Сравнить значения максимальной и средней скорости в различных сечениях с их теоретическими значениями при граничных условиях на скорость (равномерный профиль скорости на входе в канал). Объяснить расхождение.
2. Для определения границ применимости теоретического решения необходимо найти время и длину (расстояние от входа в канал до сечения канала, в котором профиль становится параболическим) установления. Если профиль все еще нельзя считать параболическим (на основании визуальной оценки) даже на выходе из канала, следует уменьшить скорость течения на входе в канал. Рекомендуется произвести качественное сравнение полученной таким образом *длины установления* с эмпирической оценкой 0.03∙Re*·2h* [3], где *h* — поперечный размер канала, а Re — число Рейнольдса: Re = ρ*uh*/ μ. Для более точного сравнения рассчитанного профиля с теоретическим (параболой) рекомендуется применить обработку и визуализацию выходных данных расчета в математическом пакете, например, в Mathcad (см. рис. 1.1, 1.2). Для этого необходимо предусмотреть, чтобы слои визуализации Flow Vision, соответствующие профилям скорости в нескольких сечениях канала, периодически сохранялись в текстовые файлы (см. {примечание 10}). Более простой альтернативой использованию внешней программы типа Mathcad при сравнении полученного профиля течения с теорией является построение графика квадратичной функции с помощью средств постпроцессора Flow Vision (см. {18} и рис. 1.3).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ValongR-ByR | ValongRByR | | ValongR+ByR |
| **Рис.** 1**.**1**.** Установившиеся профили скорости на расстоянии 5, 15 и 25 см от входа при заданной скорости на входе *u*ср = 1.5 мм/с | | | |
| Рис. 1.2. Динамика установления профиля скорости (в сечении *x* = 25 см) при заданной скорости на входе в канал *u*ср = 1.5 мм/с | | ValongR+! | |
| P=0_01long  **А** | | | |
| V=0_0004free  **Б** | | | |
| V=0_002free  **В** | | | |
| V=0_015free  **Г** | | | |
| Рис. 1.3. Распределение скорости по каналу в случае граничных условий на разность давлений (А) и на скорость (Б-Г: 0.4 мм/с, 2 мм/с, 1.5 см/с, равномерный профиль на входе). Белой линией показан расчетный профиль скорости, коричневой ― параболический профиль, черной линией ― давление на оси канала | | | |
|  | | | |

1. Cравнить с теорией значение средней скорости в каком-либо сечении, когда в качестве граничных условий используется разность давлений на входе и выходе из канала.

### Примечания

1. *Создание геометрии* (*расчетной области*). После запуска программы Solid Works следует нажать на кнопку **«Создать»** **** и выбрать **«Деталь»**. В левой части окна новой детали нужно выделить **«Плоскость 1»**, после чего нажать на третью сверху кнопку **«Эскиз»** eskiz на правой панели инструментов. Для удобства соблюдения нужных размеров целесообразно нанести масштабную сетку (0.1 м) между основными линиями посредством нажатия на вторую сверху кнопку **setka** той же панели c последующей установкой флажка «Отображать масштабную сетку». В качестве элементов расчетной области чаще всего используются прямоугольник, линия, окружность или ее часть; они создаются соответственно с помощью кнопок «**Прямоугольник**» pryamoug, **«Линия» liniya, «Окружность» , «Дуга через 3 точки» **, находящихся на правой панели инструментов. Чтобы нарисовать сложные фигуры типа эллипса (которого нет на панели инструментов), следует выбрать пункт из меню **«Инструменты/Объекты эскиза»**. Масштаб (размер изображения на экране) меняется либо с помощью колеса мыши, либо ― после нажатия кнопки **«Увеличить/уменьшить вид» vid** в верхней части экрана ― перемещением указателя мыши вверх или вниз при нажатой левой кнопке. С помощью пункта меню **«Вставка/Основание/Вытянуть…» ― «ОK»** начерченный замкнутый контур (прямоугольник) превращается в *трехмерное тело* (**внимание:** пакет Flow Vision работает только с трехмерной геометрией). Размер по третьей координате (0.01 м) здесь менять не нужно (в плоских задачах он несущественен).
2. *Разметка границ.* Следует несколько раз повторить следующую операцию: выделить какую-либо границу тела, щелкнув по ней (при этом она приобретает зеленоватый оттенок), затем нажать на кнопку **«Редактировать цвет»** kraska в середине верхней панели инструментов и выбрать один из цветов. Между этими операциями часто требуется вращать тело в пространстве, для чего используется кнопка **«Вращать вид»** vidrot в правой части верхней панели. Физически различные границы расчетной области должны быть помечены различными цветами; но все границы помечать цветом необязательно.
3. *Экспорт/импорт геометрии из Solid Works в Flow Vision*. Экспортировать созданное трехмерное тело и сохранить в формате VRML через пункт меню **«Файл/Сохранить как…»** (тип файла \*.WRL). Запустить программу Flow Vision и импортировать созданную геометрию, для чего нажать на кнопку **«Создать» **, затем указать путь к созданному в Solid Works файлу \*.WRL. После этого в правой части окна Flow Vision должно появиться изображение того же самого трехмерного тела, что и в Solid Works (только разделенное посередине плоскостью).
4. *Ввод граничных* *условий*. В ветви дерева **«Гр. условия»** выделить соответствующую границу в дереве (при этом в правой (основной) части окна помеченная граница окрашивается в цвет, заданный ранее). Далее открыть окно редактирования граничного условия, либо через пункт контекстного меню **«Редактировать»**, либо через кнопку «**Ed»** в окне свойств. Возможны следующие характерные комбинации типов граничных условий:

а) **«Тип границы»** ― «Стенка»; **«Тип граничного условия»**― «Стенка с проскальзыванием» (обращение в нуль нормальной компоненты скорости**)** или «Стенка»(обращение в нуль всех компонент скорости);

б) **«Тип границы»** ― «Вход/выход», **«Тип граничного условия»** ― «Нормальный вход/выход» или «Давление на входе»;

в) **«Тип границы»** ― «Свободный выход», **«Тип граничного условия»** ― «Нулевое давление/выход».

*Для облегчения дальнейшей работы границы желательно переименовать (назвав «Стенка», «Вход», «Выход» и т.п.) либо через пункт контекстного меню «Переименовать», либо через окно свойств граничного условия.*

1. *Создание (объекта) плоскости*. В дереве постпроцессора из контекстного меню узла **«Объекты»** (или любого объекта, например, **«Шаблон плоскости»**) выбирается пункт **«Создать объект»**; в появившемся окне в качестве типа объекта задается **«Шаблон плоскости».** Если создается основная плоскость (совпадающая с плоскостью течения), то нормальный вектор к ней нужно задать как (0,0,1), а также выставить флажок **«Отсекающая плоскость»**.
2. *Создание (объекта) линии*. Из контекстного меню узла **«Объекты»** выбирается пункт **«Создать объект»**; далее в появившемся окне в качестве типа объекта необходимо выбрать **«Линия».** Для горизонтальных линий («нормальный») вектор, задающий направление линии, имеет компоненты (1, 0, 0), а для вертикальных ― (0, 1, 0); кроме того, положение линии определяется координатами точки «**Опорная точка**».
3. *Создание двумерного графика*. Из контекстного меню соответствующего объекта-линии (вдоль этой линии будет располагаться ось *x* графика), выбрать пункт **«Создать слой»**; в раскрывающемся списке выбрать тип слоя **«График вдоль прямой»** и объект, на котором будет построен этот график **«Линия»**. В созданном слое задать **«Переменная»** ― задать переменную для показа вдоль оси *y* (например, «Давление» или «Скорость»). Если после применения изменений (кнопка **Применить**) график не виден (или его ось *y* направлена не в ту сторону), то следует изменить угол ориентации графика с нуля на 90, 180 или 270 градусов. Если же ось *x* направлена в противоположную сторону, то нужно поменять на противоположное направление нормального вектора того объекта-линии, на котором построен график. Для того чтобы ось *x* графика занимала полностью отрезок пересечения этой линии с расчетной областью, нужно перенести начальную точку («Опорная точка») линии (начало координат графика совпадает с ней).
4. *Изображение распределения переменной в плоскости методом цветовой (тоновой) заливки*.Из контекстного меню основной плоскости задачи необходимо выбрать пункт **«Создать слой»**; выбрать тип слоя **«Цветовые контуры»** на объекте **Плоскость #0**, в раскрывающемся списке **«Переменная»** ― задать переменную для показа цветами (например, «Давление» или «Модуль Скорости»), в списке **«Метод»** ― «Цветовая заливка». Если необходимо изменить соответствие между цветами и значениями переменной, то это можно сделать во вкладке **«Палитра»**.
5. *Отчет о проделанной работе* рекомендуется оформлять с использованием текстового редактора Microsoft Word. По любой задаче, решенной с помощью пакета Flow Vision, в отчете представляется следующий набор результатов:

* Картина течения с распределением значений скорости или давления (слой визуализации «Цветовые контуры» ― рисунок в формате \*.bmp) и соответствующие комментарии. Рисунок в формате \*.bmp можно получить, не выходя из пакета Flow Vision (**Модуль просмотра результатов**), воспользовавшись кнопкой **«Захват одного изображения»** ****. Альтернативным вариантом может являться использование клавиши Print Screen или внешней программы, захватывающей изображение в выделенной части экрана; при этом картинки можно переносить в Word не через файлы, а через буфер обмена Windows.
* Картина течения с линиями тока (слой визуализации «Векторы» ― рисунок) и соответствующие пояснения.
* Полученные в результате расчета интегральные характеристики, например, сила сопротивления или потеря полного давления, которые должны быть представлены в сравнении с теорией (таблица, содержащая информацию о граничных, начальных условиях, результаты численного расчета и теории). Объяснения совпадения или расхождения численного эксперимента с теорией или экспериментом.
* Картина течения с двумерными графиками, полученными в ходе расчетов (слой визуализации «График вдоль прямой» ― рисунок), и соответствующие комментарии или график, построенный в другом математическом или графическом пакете на основе файлов, полученных в результате сохранения динамики изменения значений каких-либо переменных.

1. *Вычисление интегральных характеристик* (*осредненных по сечению значений переменных*).Из контекстного меню соответствующего объекта-плоскости (как правило, перпендикулярной течению) выбрать пункт **«Создать характеристики»**; в раскрывающемся списке **«Переменная»** задать переменную для показа (чаще всего, «Давление»). Для просмотра значений характеристик необходимо открыть  и «прикрепить» () информационное окно с таблицей, выделив слой в дереве. По умолчанию характеристики являются интегральными, то есть они получаются усреднением переменных по сечению плоскости, указанной при создании данного слоя*.* Чтобы записать таблицу характеристик в файл, во вкладке **«Сохранение в файл»** следует отметить флажок «**Записывать данные в файл**» и задать имя файла (можно также выбрать путь к нему). В процессе расчетов в файл будут записываться изменения характеристик во времени.
2. *Создание графика теоретической зависимости методом введения новой переменной*. Чтобы сравнить графики результатов расчета с теорией, рекомендуется построить на той же (прямой или кривой) линии график зависимости переменой от координат(ы). Для этого нужно из контекстного меню узла **«Переменные»** выбрать пункт **«Создать скаляр»**, и в появившемся окне ввести имя переменной и ее зависимость от *x* и/или *y* (используя скобки, арифметические операции и функции: их список называется **«Операции»** и расположен в нижней части окна). После введения такой переменной ее график строится точно так же, как и график расчетной переменной.