

Улучшение сходимости и устойчивости

Контроль процесса решения в Ansys Fluent

- Настройка решателя

- Ключевые параметры сходимости

Проблемы со сходимостью / сбой после запуска решения

- Плохие начальные условия и виды инициализации

- Корректное размещение границ

- Проблемы с сеточной моделью

Плохая сходимость после сотен итераций

- Основные причины

- Способы ускорения сходимости

- Сходимость в нестационарных задачах

- Специфические проблемы

Контроль процесса решения в Ansys Fluent

Настройка решателя в Ansys Fluent

- ▶ Настройки решателя осуществляются во вкладках:
 - ▶ Solution Methods
 - ▶ Solution Controls
 - ▶ Solution Initialization
 - ▶ Run Calculation
- ▶ Вкладки содержат различные настройки, которые могут влиять на:
 - ▶ Сходимость решения.
 - ▶ Точность решения.
 - ▶ Стабильность решателя.
 - ▶ Продолжительность времени решения.
- ▶ Обычно стандартных настроек решателя достаточно для получения решения. Но бывают случаи, когда необходимо внести дополнительные настройки.

Типы решателей в Ansys Fluent

По давлению

- ▶ Расщеплённый: (Расчёт U-импульса, V-импульса, W-импульса), неразрывность -> обновление скорости.
- ▶ Сопряжённый (Расчёт массы и импульса).
- ▶ Расчёт энергии.
- ▶ Расчёт долей компонентов.

- ▶ Расчёт уравнений турбулентности.
- ▶ При необходимости расчёт других уравнений переноса.

По плотности

- ▶ Сопряжённый неявный (Расчёт массы, импульса, энергии, долей компонентов).
- ▶ Сопряжённый явный (Расчёт массы, импульса, энергии, долей компонентов).

Сопряжение давления и скорости

- ▶ **SIMPLE** - по умолчанию
 - ▶ Хорошо подходит для большинства задач с несжимаемыми течениями
- ▶ **Coupled** для сжимаемых течений
 - ▶ Часто упоминается как сопряжённый решатель по давлению или PBCS.
 - ▶ Применяется и для несжимаемых течений с учётом вращения или выталкивающей силы.
 - ▶ Можно использовать вместо SIMPLE для задач, в которых наблюдаются проблемы со сходимостью
- ▶ **PISO** применяется в нестационарных задачах и тетраэдных сетках.
- ▶ **SIMPLEC** - в основном для простых академических задач.

Методы интерполяции (градиенты)

- ▶ Метод Грина-Гаусса по ячейкам (Green-Gauss Cell Based)
- ▶ Метод Грина-Гаусса по узлам (Green-Gauss Node Based) - более точен и ресурсозатратен.
- ▶ Метод Наименьших квадратов по ячейкам (Least Squares Cell Based) - точность как у метода Грина-Гаусса по узлам, но меньше ресурсов.

Методы интерполяции давления

$$\nabla p = \frac{\sum_{face} p_{face} \cdot \hat{A}_{face}}{V_{cell}}$$

- ▶ **Standart.** Точность снижается, если имеются большие нормальные градиенты вблизи границ.
- ▶ **PRESTO!** - применение: закрученные потоки, большие нормальные градиенты.
- ▶ **Linear**
- ▶ **Second-Order** - применение: для сжимаемых потоков.
- ▶ **Body Force Weighted** - применение: большие значения массовых сил.

Схема адвекции

$$\phi_f = \phi_{C_0} + \beta \nabla \phi_{C_0} \cdot \overline{dr_0}$$

- ▶ Схема адвекции **1st-Order-Upwind**. $\beta = 0$
 - ▶ Надёжная, но первый порядок точности
 - ▶ Полезно использовать в начале расчёта.
- ▶ Схема адвекции **2nd-Order-Upwind**. $\beta = 1$
 - ▶ Должен быть добавлен дополнительный ограничитель, чтобы гарантировалось ограниченность решения ($\phi_{C_0} < \phi_f < \phi_{C_1}$)
- ▶ **MUSCL** (третий порядок точности) - для вихрей.
- ▶ **QUICK**
 - ▶ Максимизирует β по всему домену до получения окончательного решения.

Коэффициенты релаксации

$$\phi_P = \phi_{P,ld} + \alpha \Delta \phi_P$$

- ▶ Во вкладке **Solution controls**.
- ▶ Коэффициенты неявной нижней релаксации применяются для схем **SIMPLE**, **SIMPLEC**, **PISO**.
- ▶ Если решение слишком занижено, то решение будет сходиться за большее количество итераций.

Псевдо-нестационарный метод

- ▶ Использование опции **Pseudo Transient** совместно с сопряжённым решателем по давлению может улучшить сходимость для сеток с большим "*aspect ratio*".

Решатель по плотности-Solution Steering

- ▶ Позволяет перейти от начального решения к сошедшему с минимальным вмешательством пользователя в настройки.
 - ▶ Задать настройки как обычно.
 - ▶ Выполнить инициализацию (обычно по входу).
 - ▶ Подключить **Solution Steering** во вкладке **Run**.
 - ▶ Выбрать режим течения:
 - ▶ несжимаемое
 - ▶ дозвуковое
 - ▶ трансзвуковое
 - ▶ суперзвуковое
 - ▶ гиперзвуковое
 - ▶ Запустить расчёт.

Критерии сходимости. Невязки.

- ▶ Решение считается сошедшимся, когда невязки по всем уравнениям достигли желаемой точности, задаваемой во вкладке **Monitors** и вышли на *палочку*, т.е. переменные перестают изменяться.
- ▶ А так же когда сохраняются балансы массы и других скалярных величин.
- ▶ Критерий сходимости определяет момент когда решение является сошедшимся и соответственно когда решение останавливается.

Критерии сходимости. Невязки.

- ▶ Невязки являются показателем того, насколько точно была решена система уравнений.
- ▶ Уравнения решаются итеративно \Rightarrow никогда не удастся достичь точного решения.
- ▶ Малые невязки = более точное решение.

$$[A][\Phi] = [b]$$

$[A]$ - матрица коэффициентов, Φ - вектор решения, $[b]$ - правая часть уравнения.

Уравнения решены точно: $[A][\Phi] - [b] = 0$

Итеративное решение: $[A][\Phi] - [b] = [R]$

Невязка: $R^n = b - A\Phi^n$ - ошибка численного решения.

Критерии сходимости. Дисбаланс. Мониторы. Анимация

- ▶ Дисбаланс измеряет общее сохранение количественных характеристик (масса, импульс, энергия) во всей области течения.
- ▶ В сошедшемся решении входящий поток должен быть равен выходящему с приемлемой точностью.
- ▶ Reports → Fluxes Options → Compute.
- ▶ Полезно в мониторах отображать конкретную интересующую нас величину: коэффициент подъёмной силы, температура поверхности и т.д.
- ▶ Полезно сохранять анимацию и визуализировать поля. Вкладка **Autosave**.

Проблемы со сходимостью / сбой после запуска решения

Как улучшить плохие начальные условия?

- ▶ Проверить правильность постановки задачи.
- ▶ Вычислить начальное решение с помощью схемы дискретизации первого порядка.
- ▶ Использовать предыдущее сошедшееся решение без использования сложных физических моделей.
- ▶ Изменить способ инициализации.

Виды инициализации

- ▶ Стандартная инициализация: во всех ячейках одинаковые значения. При помощи инструментов **Adapt** и **Patch** можно задать значения величин на отдельных границах или в отдельных областях.
- ▶ Гибридная инициализация: более реалистичное неравномерное распределение. Решаются уравнения Лапласа для получения полей скорости и давления. Остальные переменные получаются осреднением.
- ▶ FMG (многосеточная) инициализация: наиболее реалистичное неравномерное распределение полей.
 - ▶ `/solve/init/fmg-initialization`
- ▶ Чем ближе начальное приближение к окончательному решению, тем меньше требуется итераций для достижения целевого уровня сходимости.

Использование предыдущего решения в качестве начальных условий

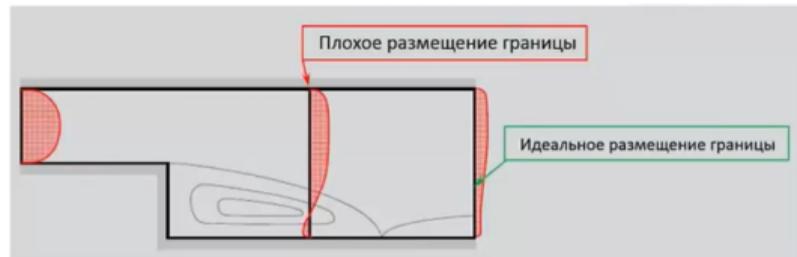
- ▶ Скорость сходимости решения зависит от выбора отправной точки.
- ▶ Если есть аналогичное решение из другого расчёта, можно сэкономить время, интерполировав решение в новый расчёт.
- ▶ **Write** на предыдущей модели для сохранения данных.
- ▶ **Read and Interpolate** на новой модели.

Корректное размещение границ

Если имеется один вход и один выход

- ▶ **Самый надёжный подход:** скорость на входе и статическое давление на выходе (**Velocity inlet-Pressure outlet**). Полное давление на входе будет результатом решения.
- ▶ **Надёжный подход:** массовый расход на входе и статическое давление на выходе (**Mass-flow inlet-Pressure outlet**). Полное давление на входе определяется массовым расходом.
- ▶ **Чувствителен к начальному приближению:** полное давление на входе и статическое давление на выходе (**Pressure Inlet - Pressure outlet**). Массовый расход определяется в результате решения.
- ▶ **Не надёжные подходы:**
 - ▶ Полное давление или массовый расход на входе и отток (**outflow**) на выходе. Не рекомендуется использовать, т.к. уровень статического давления не является фиксированным.
 - ▶ **Mass-flow inlet-Outlet** приемлем, если плотность постоянна.
 - ▶ Скорость на входе и скорость на выходе - система является численно не устойчивой.

Возвратное течение на выходной границе



- ▶ **Плохое размещение:** сложно указать правильные условия турбулентности, температуры, переноса компонентов и т.д., если граничное условие "**pressure outlet**" будет располагаться как на рисунке.
- ▶ **Идеальное размещение:** течение хорошо развито в результате чего возможно точнее задать граничные условия.

Возвратное течение на выходной границе

- ▶ Область с возвратным течением могут появляться на начальных этапах расчёта - это нормально.
- ▶ Если сообщение о возвратном течении не исчезает в течение всего расчёта, то необходимо сдвигать границу выше по потоку.
 - ▶ Вернуться в пре-процессор (повторное создание сетки.)
 - ▶ Во Fluent продвинуть выходную границу выше по потоку.
 - ▶ `/mesh/modify-zones/extrude-face-zone-delta` specify the face zone id/name (имя зоны или id)
 - ▶ `distance delta 1 0.2` (обычно задаётся характерное значение размера ячейки вблизи выхода).
 - ▶ `distance delta 2` (нажмите Enter, если достаточно).
 - ▶ Будет создана новая жидкостная зона и выдавленная граница будет иметь другое имя, например **pressure-outlet:12** или похожее. Можно переименовать.

Замечания по продвижению выходной границы

- ▶ Протяжка границ работает только с сеточными файлами и case-файлами в 3D.
- ▶ Если загружен файл .dat, то будет ошибка.
- ▶ Если нужно воспользоваться данными с предыдущего расчёта:
 1. Записать интерполяционный файл.
 2. Закрыть сессию Fluent.
 3. Открыть новую сессию Fluent и загрузить только .cas файл.
 4. Выполнить протяжку границы.
 5. Проверить правильность задания граничных условий новых зон.
 6. Инициализировать задачу.
 7. Загрузить интерполяционный файл.
 8. Запустить расчёт.

Проблемы с сеточной моделью

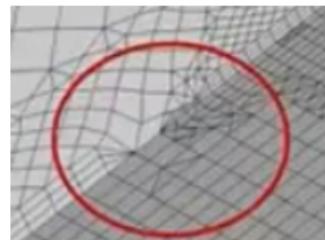
- ▶ Улучшение качества сетки:
 - ▶ /mesh/repair-improve/improve-quality
 - ▶ /mesh/smooth "quality based"- предпочтительно для сеток большой размерности.
- ▶ Данные методы действуют как операция "Auto-node-move" во Fluent Meshing, с возможностью запуска в параллельном режиме. Применяя данный способ несколько раз, можно добиться улучшения качества сетки.
- ▶ По умолчанию узлы на границах остаются неподвижными. Чтобы узлы перемещались можно воспользоваться командой:
 - ▶ /mesh/repair-improve/allow-repair-at-boundary yes
- ▶ /mesh/repair-improve/repair - исправление вырожденных ячеек.

Проблемы с сеточной моделью

- ▶ **Выбор решателя:**
 - ▶ Для сеток низкого качества предпочтительнее использовать сопряжённый решатель по давлению (PBCS).
 - ▶ Рекомендуются использовать схему **Pseudo-Transient**, которая выполняет неявную нижнюю релаксацию для стационарного решения.
- ▶ **Настройка псевдостационарной схемы:**
 - ▶ Рекомендуются использовать метод автоматического подбора временного шага с заданием масштаба длины.
 - ▶ Масштаб длины определяется как наибольший размер исследуемой модели.
 - ▶ Для задач внешней аэродинамики масштаб длины равен 10% от длины обтекаемого объекта.

Проблемы с сеточной моделью

- ▶ Схема дискретизации: Применение схемы **PRESTO!** на сетке, полученной методом **CutCell** может приводить к несходимости решения: проблемы со сходимостью возникают в местах ступенчатого распределения призматического слоя, т.е. где существует различие в количестве призматических слоёв.
- ▶ Можно перейти на схему второго порядка или стандартную схему дискретизации давления.
- ▶ Релаксация слагаемых второго порядка **High Order Term Relaxation** - применяется для стабилизации решения в схемах дискретизации по пространству высокого порядка, выше первого. Помогает добиться сходимости, когда схема второго порядка не даёт результата.



Проблемы с сеточной моделью

Численная процедура Poor Mesh Numerics (PMN)

- ▶ Во Fluent введён специальный метод, позволяющий получить сошедшееся решение на сетках низкого качества или с присутствием вырожденных ячеек.
- ▶ По умолчанию данная процедура работает только с ячейками:
 - ▶ Вырожденные элементы.
 - ▶ Ячейки, имеющие обратное направление нумерации узлов (Left Handed Faces).
- ▶ Данную опцию можно отключить или изменить через консоль:
 - ▶ `/solve/set/poor-mesh-numeric`
 - ▶ `corrected solution order (0, 1, 2):`
 - ▶ [0] - порядок корректировки решения - наиболее агрессивный способ улучшить сходимость на плохой сетке.
 - ▶ [2] - метод, позволяющий максимально сохранить точность решения и добиться лучшей сходимости.

Проблемы с сеточной моделью

Численная процедура Poor Mesh Numerics (PMN)

- ▶ При вводе команды **/solve/set/poor-mesh-numerics/cell-quality-based?/ yes** процедура будет работать для всех ячеек, имеющих значение критерия **Orthogonal Quality** меньше 0.05.
- ▶ Можно изменить минимальное значение качества командой:
 - ▶ **/solve/set/poor-mesh-numerics/set-quality-threshold**
- ▶ Процедура PMN также может использоваться для ячеек с вышедшими за пределы переменными (высокие U , T , μ_t).
- ▶ Для этого следует сначала создать регистр адаптации по выбранной переменной, затем используя TUI (консоль) прописать применение процедуры PMN для ячеек в этом регистре.
- ▶ Команда **print-poor-elements-count** определяет количество ячеек, в которых будет работать процедура PMN.

Поправка градиента для деформированных граней

- ▶ При сильно искривлённых гранях можно использовать **Warped-Face Gradient correction**.
 - ▶ Экономия памяти
 - ▶ Быстрота
- ▶ Результаты получаются, как если бы использовалась качественная сетка.

Сетка из полиэдров

▶ **Make Polyhedra.**

- ▶ Снижается время вычислений и требуемые ресурсы.
- ▶ Повышается устойчивость решения.
- ▶ Улучшается качество сеточной модели и соответственно сходимость расчёта.

Плохая сходимость после сотен итераций

Основные причины

- ▶ Неудовлетворительное качество сетки.
- ▶ Некорректные граничные условия.
- ▶ Неправильно выбранный временной масштаб.
- ▶ Не верно выбранные физические модели.
- ▶ Решение задачи в стационарной постановке, которая имеет нестационарную природу.

Определение областей с локальной несходимостью

- ▶ Сначала необходимо сохранить значения невязок для дальнейшей пост-обработки.
 - ▶ `solve/set/advanced/retain-cell-residuals`.
- ▶ Рассчитать дополнительную итерацию, чтобы невязки стали доступны для пост-обработке.
- ▶ Необходимо создать пользовательские функции:
 - ▶ `abs _ mass _ imbalance = abs(mass-imbalance)`.
 - ▶ `abs _ u _ residual = abs(x-velocity-residual)`.
 - ▶ и т.д.
- ▶ Переменные создаются во вкладке **User-Defined - Custom Field Functions**.
- ▶ Все CFFs необходимо сохранить в отдельном файле (Scheme).

Определение областей с локальной несходимостью

- ▶ Scheme файлы можно использовать повторно: **File-Read-Scheme...**
- ▶ Можно воспользоваться регистром адаптации:
 - ▶ Во вкладке **Setting Up Domain** выбрать **Mark/Adapt Cell - Iso-Value**.
 - ▶ Выбрать одну из функций.
 - ▶ Compute. Отобразится диапазон изменения переменной.
 - ▶ В поле Iso-Max указать максимальное значение, отображаемое в окне.
 - ▶ Iso-Min - значение равно 90-95% от максимального значения.
 - ▶ Iso-Value Adaptation - Manage - появится новое окно со списком доступных регистров.
 - ▶ Выбрать нужный регистр - Display. Отобразятся маркеры. Options откроется окно Adaptation Display Options, нажать Display в окне Manage Adaptation Registers.
 - ▶ Ячейки с высокими значениями локальных невязок отобразятся на экране.

Изменение числа Куранта и коэффициентов релаксации

- ▶ Число Куранта - основное средство управления устойчивостью для сопряжённых решателей.

$$\Delta t = \frac{C \Delta x}{U}$$

- ▶ Нестационарный член используется в решателе по плотности даже для стационарных задач.
- ▶ Число Куранта определяет величину шага по времени.
- ▶ Для явных решателей по плотности: показатели устойчивости накладывают ограничения на число Куранта - не может быть больше 2.
- ▶ Для неявных решателей по плотности: число Куранта не ограничено показателями устойчивости: начальное значение - 5.

Способы ускорения сходимости

- ▶ Задание более реалистичных начальных условий.
- ▶ Использование предыдущего сошедшегося решения (интерполяция результатов).
- ▶ Постепенное увеличение коэффициентов нижней релаксации или числа Куранта. Чрезмерно завышенные значения могут привести к неустойчивому поведению сходимости.

Сходимость в нестационарных задачах

- ▶ Графики невязок в нестационарных задачах не всегда являются достаточным показателем сходимости.
- ▶ Размер шага по времени нужно выбирать таким образом, чтобы в пределах одного шага по времени величина невязок уменьшалась примерно на три порядка.
 - ▶ Это будет признаком точности нестационарного решения.
 - ▶ При малом временном шаге, невязки могут опуститься только на два порядка. Необходимо добиваться монотонности убывания невязок в течение временного шага.

Выбор временного шага

Малый временной шага обычно улучшает сходимость

- ▶ Обычная задача: $\Delta t = \frac{1}{3} \frac{L}{V}$
- ▶ Турбомашины: $\Delta t = \frac{1}{10} \frac{\text{Количество лопаток}}{\text{Скорость вращения}}$
- ▶ Естественная конвекция: $\Delta t = \frac{L}{(g, \beta, \Delta T, L)^{1/2}}$
- ▶ Теплопроводность в твёрдом теле: $\Delta t = \frac{L^2}{\left(\frac{\lambda}{\rho C_p}\right)}$

Двойная точность (Double Precision)

- ▶ Используется в том случае, если имеется проблема с ошибкой округления, т.е. если важно учитывать “незначительные изменения” переменных. Под незначительными понимаются изменения, которые являются малыми по отношению к глобальному диапазону этой переменной.
 - ▶ Если рассматривать случай с динамической сеткой, то перемещения сетки часто бывает достаточно мало, по сравнению с размером расчётной области.
 - ▶ Если диапазон давлений велик и необходимо учитывать небольшие изменения давления.
- ▶ Недостаток: требуется в два раза больше памяти.

Проблемы со сходимостью по уравнению энергии

- ▶ Рекомендуется многосеточный цикл.
 - ▶ Начиная с версии R15, по умолчанию в многосеточном алгоритме для уравнения энергии используется F-цикл.
 - ▶ Применение F-цикла с уменьшенным значением критерия остановки предпочтительнее использовать для случаев, в которых диффузия является определяющим эффектом, а также для случаев с резким изменением теплопроводности.
- ▶ Рассчитать задачу без уравнения энергии - потом его включить.

Проблемы со сходимостью задач сопряжённого теплообмена

- ▶ Если имеется неконформный интерфейс, убедиться, что размер сеточных элементов с каждой из соприкасающихся границ отличается незначительно.
- ▶ Сетка у стенки должна быть подробнее, чем в основном потоке.
- ▶ Сначала добиться схождения решения без использования уравнения энергии.
- ▶ Первый порядок точности. После схождения решения переключаемся на второй.
- ▶ На входной границе задать скорость вместо давления.
- ▶ Уменьшить коэффициент релаксации по уравнению энергии до 0.98, но не ниже 0.95.
- ▶ Использовать сопряжённый решатель по давлению и уменьшить число Куранта.
- ▶ Метод интерполяции градиентов - метод Грина-Гаусса по узлам.
- ▶ При использовании тетраэдрической сетки, отключить вторичные градиенты: (rpsetvar 'temperature/secondary-gradient?').
- ▶ Изменить настройки многосеточного алгоритма для уравнения энергии. Выбрать W-цикл и установить критерий прерывания = 0.01.
- ▶ Увеличить верхние границы изменения давления и температуры через **Solution Control-Limits**.

Естественная конвекция в замкнутом пространстве

- ▶ В закрытой расчётной области закон сохранения массы зависит от используемой модели плотности.
 - ▶ Это автоматически выполняется, когда используется приближение Буссинеска (плотность полагается постоянной).
 - ▶ В модели несжимаемого идеального газ плотность зависит только от температуры, т.к рабочее давление является постоянным (масса не сохраняется).

$$(\rho - \rho_0) g = -\rho_0 \beta (T - T_0) g$$

- ▶ В реальности давление в домене изменяется таким же образом как и масса.
 - ▶ Плотность является функцией локального давления (закон идеального газа).
 - ▶ Переменное рабочее давление (требуется UDF).

Периодические течения

- ▶ Сетка на периодических границах должна иметь одинаковое разрешение.
- ▶ Запустить расчёт с меньшими значениями коэффициентов нижней релаксации: density - 0.5, body force - 0.5, momentum - 0.3, турбулентные характеристики - 0.4.
- ▶ Указать нулевое значение градиента давления в начальный момент времени (rpsetvar 'periodic/pressure-derivative 0).
- ▶ Данная команда может выполняться в течении первых 30-50 итераций (Solve-Execute Commands).

Ошибка

Divergence detected in AMG solver: pressure correction

- ▶ Причины:
 - ▶ Завышенное значение коэффициентов релаксации по давлению.
 - ▶ Низкое качество сеточной модели, особенно в области сильных градиентов.
 - ▶ Не правильно заданные граничные условия.
- ▶ Пути решения:
 - ▶ Уменьшить значение коэффициентов релаксации на 10%.
 - ▶ Минимальное качество по критерию **Orthogonal Quality** должно быть больше 0.01.
 - ▶ Проверить правильность задания граничных условий.

Нестабильность при использовании VoF

Divergence detected in AMG solver: pressure correction

▶ Проблема

- ▶ Появление ошибки: Global courant number is greater than 250. The velocity field is probably diverging.

▶ Пути решения:

- ▶ Создание равномерной сетки.
- ▶ Использование сжимаемой фазы в качестве первичной фазы.
- ▶ Определение режима течения (ламинарное/турбулентное).
- ▶ В качестве рабочей плотности использовать плотность самой лёгкой фазы.
- ▶ Подключить опцию **Implicit body force**.
- ▶ Использование схем сопряжения скорости и давления SIMPLE/SIMPLEC.
- ▶ Уменьшить коэффициенты релаксации: по давлению -0.2, моменты-0.3, кинетическая энергия турбулентности-0.5, диссипация турбулентности-0.5.
- ▶ Уменьшить размер временного шага.