

Финогенов Н.А.

студент магистратуры

2 курс, институт Геологии и Нефтегазодобычи

Тюменский индустриальный университет

Россия, г. Тюмень

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ И РЕШАТЕЛЕЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ
РЕЖИМОВ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ**

***Аннотация:** В данной статье рассматриваются и сравниваются достоинства и недостатки различных методов решения и решателей для симуляции потока на базе программного обеспечения Ansys Fluent. В этой статье также обсуждается применимость и критерии оптимального выбора методов решения и решателей для различных режимов многофазных течений.*

***Ключевые слова:** математическое моделирование, многофазное течение, решатель на основе давления, решатель на основе плотности, Ansys Fluent.*

***Abstract:** This article examines and compares the advantages and disadvantages of various flow simulation solutions and solvers based on Ansys Fluent software. This article also discusses the applicability and criteria for the optimal choice of solution methods and solvers for various modes of multiphase flows.*

***Keywords:** mathematical modeling, multiphase flow, pressure-based solver, density-based solver, Ansys Fluent.*

Ansys Fluent позволяет выбрать один из двух численных методов:

- решатель на основе давления
- решатель на основе плотности

Исторически сложилось так, что подход, основанный на давлении, был разработан для низкоскоростных несжимаемых потоков, в то время как подход на основе плотности в основном использовался для высокоскоростных сжимаемых потоков. Однако недавно оба метода были расширены и переформулированы для решения и работы в широком диапазоне условий потока, выходящих за рамки их традиционного или первоначального предназначения.

В обоих методах поле скорости получается из уравнений количества движения. В подходе, основанном на плотности, уравнение неразрывности используется для получения поля плотности, в то время как поле давления определяется из уравнения состояния.

С другой стороны, в подходе, основанном на давлении, поле давления извлекается путем решения уравнения давления или поправки на давление, которое получается путем манипулирования уравнениями неразрывности и импульса.

Используя любой из этих методов, Ansys Fluent решит основные интегральные уравнения для сохранения массы и импульса, а также (при необходимости) для энергии и других скаляров, таких как турбулентность и химические соединения. В обоих случаях используется метод на основе контрольного объема, который состоит из:

- Разделения области на дискретные контрольные объемы с помощью расчетной сетки.
- Интегрирования управляющих уравнений на отдельные контрольные объемы для построения алгебраических уравнений для дискретных зависимых переменных («неизвестных»), таких как скорости, давление, температура и сохраняющиеся скаляры.

- Линеаризации дискретизированных уравнений и решение полученной системы линейных уравнений для получения обновленных значений зависимых переменных.

Два численных метода используют аналогичный процесс дискретизации (конечный объем), но подход, используемый для линеаризации и решения дискретизированных уравнений, отличается.

Решатель на основе давления

Решатель на основе давления использует алгоритм, который принадлежит к общему классу методов, называемых методом проекции [54]. В методе проецирования, в котором ограничение сохранения массы (непрерывности) поля скорости достигается путем решения уравнения давления (или поправки на давление). Уравнение давления выводится из уравнений неразрывности и импульса таким образом, что поле скорости, скорректированное давлением, удовлетворяет непрерывности. Поскольку основные уравнения нелинейны и связаны друг с другом, процесс решения включает итерации, в которых весь набор основных уравнений решается многократно до тех пор, пока решение не сойдется.

В Ansys Fluent доступны два алгоритма решения на основе давления. Сегрегированный алгоритм и связанный алгоритм.

Решающая программа на основе давления использует алгоритм решения, в котором основные уравнения решаются последовательно (т.е. отдельно друг от друга). Поскольку основные уравнения нелинейны и связаны, цикл решения должен выполняться итеративно, чтобы получить сходящееся численное решение.

В сегрегированном алгоритме решаются отдельные управляющие уравнения для переменных решения один за другим. Каждое основное уравнение при решении «отделено» или «отделено» от других уравнений, отсюда и его название. Сегрегированный алгоритм эффективен с точки зрения памяти, поскольку дискретизированные уравнения нужно сохранять в памяти

только по одному. Однако сходимость решения относительно медленная, поскольку уравнения решаются независимо друг от друга.

В сегрегированном алгоритме каждая итерация состоит из шагов, описанных ниже:

1. Обновление свойства жидкости (например, плотность, вязкость, удельную теплоемкость), включая турбулентную вязкость (коэффициент диффузии), на основе текущего решения.

2. Решение одного за другим уравнения количества движения, используя недавно обновленные значения давления и потоков массы на поверхности.

3. Решение уравнения поправки на давление, используя недавно полученное поле скорости и поток массы.

4. Корректировка потоков массы, давления и поля скоростей, используя поправку на давление, полученную на шаге 3.

5. Решение уравнения для дополнительных скаляров, если таковые имеются, таких как турбулентные величины, энергия, виды и интенсивность излучения, используя текущие значения переменных решения.

6. Обновление исходных членов, возникающих из взаимодействий между различными фазами (например, исходные члены для несущей фазы из-за дискретных частиц).

7. Проверка сходимости уравнений.

Эти шаги продолжаются до тех пор, пока не будут выполнены критерии сходимости.

Решатель на основе плотности

Основанный на плотности решатель решает основные уравнения непрерывности, количества движения и (где необходимо) переноса энергии и веществ одновременно (т.е. связанных вместе). Основные уравнения для дополнительных скаляров будут решаться впоследствии и последовательно (т.е. отдельно друг от друга и от связанного набора). Поскольку основные уравнения нелинейны (и связаны), необходимо выполнить несколько

итераций цикла решения, прежде чем будет получено сходящееся решение. Каждая итерация состоит из шагов, описанных ниже:

1. Обновление свойства жидкости на основе текущего решения. (Если расчет только начался, свойства жидкости будут обновлены на основе инициализированного решения.)
2. Решение уравнения неразрывности, импульса и (где необходимо) энергии и видов одновременно.
3. При необходимости решение уравнения для скаляров, таких как турбулентность и излучение, используя ранее обновленные значения других переменных.
4. Когда должна быть включена межфазная связь, обновление исходных членов в соответствующих уравнениях непрерывной фазы с расчетом дискретной фазовой траектории.
5. Проверка сходимости системы уравнений.

Эти шаги продолжаются до тех пор, пока не будут выполнены критерии сходимости.

В методе решения на основе плотности можно решить связанную систему уравнений (уравнения неразрывности, импульса, энергии и видов, если они доступны), используя либо явно связанную формулировку, либо формулировку неявной связи. Далее описывается основное различие между явными и неявными формулировками, основанными на плотности.

В методах решения на основе плотности дискретные нелинейные управляющие уравнения линеаризуются для получения системы уравнений для зависимых переменных в каждой вычислительной ячейке. Результирующая линейная система затем решается для получения обновленного решения для поля потока.

Способ линеаризации основных уравнений может принимать «неявную» или «явную» форму по отношению к интересующей зависимой переменной (или набору переменных). Под неявным или явным мы подразумеваем следующее:

- неявный: для данной переменной неизвестное значение в каждой ячейке вычисляется с использованием отношения, которое включает как существующие, так и неизвестные значения из соседних ячеек. Следовательно, каждое неизвестное появится в более чем одном уравнении в системе, и эти уравнения необходимо решать одновременно, чтобы получить неизвестные величины.

- явный: для данной переменной неизвестное значение в каждой ячейке вычисляется с использованием отношения, которое включает только существующие значения. Следовательно, каждое неизвестное будет присутствовать только в одном уравнении в системе, и уравнения для неизвестного значения в каждой ячейке могут быть решены по одному для получения неизвестных величин.

В методе решения на основе плотности есть выбор: использовать либо неявную, либо явную линеаризацию основных уравнений. Этот выбор применим только к связанному набору управляющих уравнений. Уравнения переноса для дополнительных скаляров решаются отдельно от связанного набора (например, турбулентности, излучения и т. Д.).

Если выбор падает на неявный вариант решателя на основе плотности, каждое уравнение в связанном наборе управляющих уравнений линеаризуется неявно по отношению ко всем зависимым переменным в наборе. Это приведет к системе линейных уравнений с N уравнениями для каждой ячейки в области, где N - количество связанных уравнений в наборе. Поскольку на ячейку приходится N уравнений, эту систему иногда называют «блочной».

Решатель точечных неявных линейных уравнений (схема факторизации неполных нижних-верхних или симметричный блок Гаусса-Зейделя) используется в сочетании с алгебраическим многосеточным методом для решения результирующей блочной системы уравнений для всех N зависимых переменных. в каждой ячейке. Например, линеаризация связанной непрерывности, x -, y -, z -импульса и системы уравнений энергии даст систему уравнений, в которой p , u , v , w и T - неизвестные. Одновременное решение этой

системы уравнений дает сразу обновленные поля давления, u -, v -, w -скорости и температуры.

Таким образом, связанный неявный подход решает для всех переменных во всех ячейках одновременно.

Если выбор падает на явную опцию решателя на основе плотности, каждое уравнение в связанном наборе управляющих уравнений будет явно линеаризовано. Как и в неявном варианте, это тоже приведет к системе уравнений с N уравнениями для каждой ячейки в домене, и, аналогично, все зависимые переменные в наборе будут обновлены сразу. Однако эта система уравнений является явной в отношении неизвестных зависимых переменных. Например, уравнение x -импульса записывается так, что обновленная скорость x является функцией существующих значений переменных поля. По этой причине не требуется программа для решения линейных уравнений. Вместо этого решение обновляется с помощью многоэтапного решателя (Рунге-Кутта). Здесь есть дополнительная опция использования многосеточной схемы с полным хранилищем приближений для ускорения многоступенчатого решателя.

Таким образом, явный подход, основанный на плотности, решает для всех переменных по одной ячейке за раз.

Список используемых источников и литературы:

1. ANSYS Fluent User's Guide: Electronic edition: сайт. – URL: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm (дата обращения: 27.11.2020). – Текст: электронный.
2. Kraichnan R. Diffusion by a Random Velocity Field / R. Kraichnan. - Текст: электронный // Physics of Fluids, – 1970. - №11. – С. 21-31.
3. Chorin A. J. Numerical solution of navier-stokes equations / A. J. Chorin. – Текст: электронный // Mathematics of Computation, – 1968. - №22. – С. 745-762

4. Kays. W. M. Turbulent Prandtl Number - Where Are We? / W. M. Kays. -
Текст: электронный // J. Heat Transfer, – 1994. - №116. – С. 284-295.