

А. А. Курбангалеев, Ф. Х. Тазюков, Г. Н. Лутфуллина

**ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ СЕТОЧНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ 3D – МОДЕЛИРОВАНИИ
МАЛОГАБАРИТНОГО ТРУБЧАТОГО АППАРАТА (МТА)
КАК СМЕСИТЕЛЯ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ FLUENT**

Ключевые слова: гидродинамика, турбулентность, малогабаритные трубчатые аппараты диффузор-конфузорного типа, симметрия, потоки, осесимметричные каналы, сеточные области при численном моделировании.

В статье отражена технология улучшения качества сеточной области с использованием её симметризации при численном моделировании трёхмерных (3D) турбулентных течений в малогабаритных трубчатых аппаратах (МТА). Произведена пошаговая техника улучшения сеточной области, продемонстрированная на примере 3D моделирования течения жидкости в трубчатом МТА - смесителе. Решения произведены в программном комплексе Fluent. В приведенном численном эксперименте получены результаты близкие к экспериментальным данным других авторов.

Key words: hydrodynamics, turbulence, small tubular mixers diffuser confused type, symmetry, streams, axisymmetric channels, grid field of numerical simulation.

The article reflects the technology of improving the quality of the grid area with its symmetrization in numerical modeling of three-dimensional (3D) turbulent flow in small tubular apparatus (MTA). Performed step by step technique to improve the grid area, demonstrated by the example of 3D modeling of fluid flow in the pipe MTA - mixer. Decisions made in the software package Fluent. In the numerical experiment, the results obtained are close to the experimental data of other authors.

При численном 3D моделировании течений смешивающихся жидких или газообразных компонентов в МТА – малогабаритных трубчатых аппаратах, нужно учитывать, что на движение смешивающихся потоков могут влиять многие факторы: такие как - геометрические формы элементов проточной части аппарата, флуктуации профилей и величин скоростей компонентов в подводящих каналах, воздействие массовых сил (гравитация, магнитные поля, вибрации и т.п.). Влияние всех этих факторов может приводить к нарушению симметрии полей гидродинамических параметров в осесимметричных каналах. В той или иной степени это можно учитывать при математическом моделировании турбулентных течений [1]. Однако при численном 3D моделировании с использованием персональных компьютеров возникает ещё один фактор, который может привести к нарушению симметрии потока – качество сеточной области (сетки), заменяющей физическую область. В статье [2] был приведён численный эксперимент по устранению данной проблемы и была дана рекомендация как при 3D моделировании течений в МТА применять для сеточной области - **симметризацию и соблюдать условие сеточной независимости решения**. Последняя устанавливается с помощью последовательного измельчения сетки до прекращения существенного изменения какого-либо параметра (локальной или интегральной его характеристики), удовлетворяющего пользователя, то есть, необходимо, чтобы решение имело т. н. сеточную независимость, (параметры сеточной области (минимальный и максимальный размеры ячейки) должны быть такими, при которых решение устойчиво к их изменению). С недавних пор, в наше время, с появлением мощных компьютеров и вычислительных станций возможности для

изучения турбулентных струй значительно расширились. В практику исследований и проектирования происходит интенсивное внедрение методов вычислительной гидродинамики. Появились такие мощные инструменты исследования как коммерческие программные продукты (пакеты) как Fluent, PHOENICS, STAR.CD и др., позволяющие моделировать трёхмерные турбулентные течения. Произошёл революционный прорыв в технологии создания новых аппаратов во всех отраслях промышленности. Теперь полученные ранее результаты изучения турбулентных струй чаще используются для тестирования алгоритмов [3], основанных на использовании упомянутых пакетов, из которых наибольшей популярностью пользуется Fluent. Его использование позволяет не только изучить особенности течения и смешения, но и построить алгоритмы оптимизации конструктивных и управляющих его параметров.

Одной из важных возможностей пакета Fluent является способность хорошо моделировать любой физический процесс и объект – строить мат. модель его и формировать математическую область этого объекта, используя разные вариации сетки и гибкое её построение.

В пакете Fluent сеточная область может использовать неструктурированные сетки, её можно масштабировать, адаптировать и оптимизировать к получаемому решению. Благодаря перечисленным возможностям пакет Fluent позволяет осуществлять процедуру симметризации [2] математической области МТА.

Вместе с пакетом Fluent поставляются средства подготовки сеток для рассматриваемых задач – GAMBIT и TGrid. Данные подпрограммы осуществляют:

- Построение геометрии объекта;

- Декомпозиция расчетной области (разбивка области на подобласти);
- Построение сетки;
- Оптимизация сетки и её регуляризация;
- Постановка граничных условий.

С целью изучения влияния сеточной области на получаемое решение проводился численный эксперимент для МТА - моделирование течения в круглом цилиндрическом канале с подводом второго компонента через боковую струйную форсунку. Радиус канала 1 см., радиус отверстия подводящей форсунки 0.3 см. Компоненты - вода и этиловый спирт. Скорость 1-го компонента во входном сечении $u_1=0.5$ м/с, скорость 2-го в выходном сечении форсунки $u_2=1$ м/с. Для решения использована сетка типа Tet/Hybrid. Результаты приведены на рис. 1.

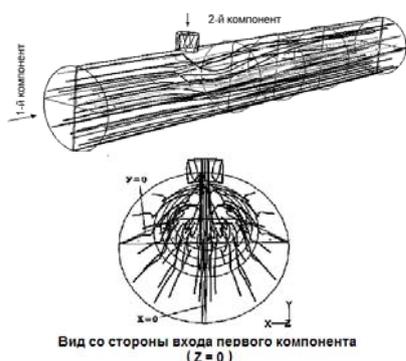


Рис. 1 - Линии тока в трубчатом аппарате с одной форсункой

Как видно, в аппарате течение симметрично относительно плоскости $X=0$. Изменение соотношения скоростей ввода компонентов u_2/u_1 от 1 до 6 не нарушало симметрии потока.

На рис. 2 показаны аналогичные результаты для того же аппарата, но с четырьмя форсунками. Форсунки имеют выходные отверстия с различными радиусами. 2-й компонент подаётся через верхнюю форсунку, а остальные заглушены. Однако сеточная область включает внутренние полости заглушенных форсунок. Таким образом, создана асимметрия области. Это приводит к нарушению симметрии потока и возникновению его закрутки.

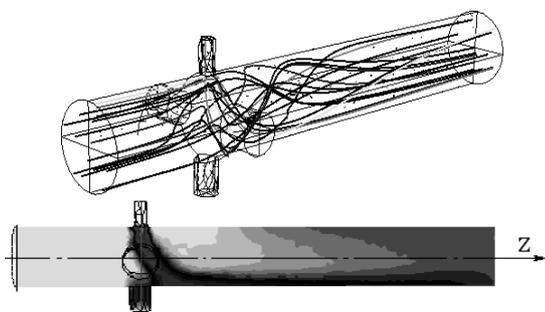


Рис. 2 - Линии тока и поле концентрации в меридиональном сечении в трубчатом аппарате с четырьмя форсунками, боковые и нижняя заглушены

Сравнивая на выходе из аппарата среднеобъёмное значение коэффициента перемешанности γ_a , характеризующего качество перемешивания, вычисляемое следующим образом:

$$\gamma_{cm}(z) = 1 - \frac{1}{F(z)} \iint_D |C(x, y, z) - C| (1/C) dF$$

$$\gamma_a = \frac{1}{L} \int_0^L \gamma_{cm}(z) dz$$

Здесь x, y, z - текущие координаты, D - область в поперечном сечении канала, $F(z)$ - площадь поперечного сечения.

Для первого и второго численного эксперимента разница коэффициента перемешанности составила значение более 5%, что не соответствует реальности. Проведя симметризацию сеточной области - то - есть, сделав сетку симметричной относительно координатных плоскостей за счёт включения опций зеркального отражения и поворота рис. 3, далее проводя измельчение сетки до тех пор, пока решение перестает изменяться, увеличивая порядок аппроксимации, и используя адаптивные сетки рис. 4 было получено решение с разницей менее 5%.

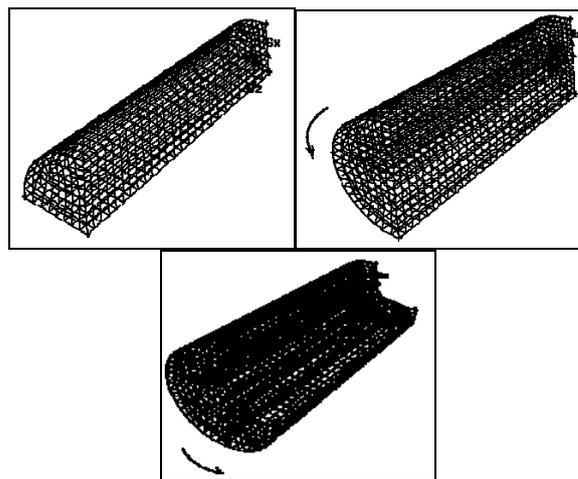


Рис. 3 - Симметризация сеточной области

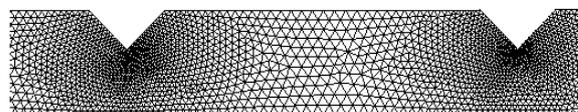


Рис. 4 - Адаптация сетки

На основе анализа методов математического моделирования можно заключить, что одной из решаемых задач при проектировании МТА (помимо других), является разумный выбор имеющихся в распоряжении вычислителя возможностей подбора сетки для математической сеточной области и правильная её адаптация, и оптимизация к получаемому решению. Целью является создание набора опций, содержащихся в меню программного продукта, который бы адекватно отражал особенности реального процесса.

Литература

1. Тахавутдинов Р.Г., Дьяконов Г.С., Дебердеев Р.Л., Мухаметзянова А.Г., Минскер К.С. Турбулентное смешение в малогабаритных трубчатых аппаратах // Теплообменные процессы и аппараты химической технологии. Межвуз. тем. сб. науч. трудов. Казань, КГТУ. 2000. С. 38-50.
2. Данилов Ю.М., Курбангалеев А.А. Уменьшение вычислительных погрешностей при численном 3D-моделировании смешения в осесимметричных каналах // Вестник Казанского технологического университета – 2012.- №12.- С 161-164.
3. Данилов Ю.М., Курбангалеев А.А. Влияние режима течения и некоторых конструктивных параметров трубчатого аппарата на параметры турбулентности при смешении компонентов. // Вестник Казанского технологического университета – 2012.- №21.- С 148-151.

© **А. А. Курбангалеев** - ст. препод. каф. теоретической механики и сопротивления материалов КНИТУ, gotanova_rg@mail.ru; **Ф. Х. Тазюков** – д-р техн. наук, проф. той же кафедры; **Г. Н. Лутфуллина** – канд. техн. наук, доц. АГНИ.