

УДК 532.5.013

Е.В. Весков, начальник группы ГП «КБ «Южное»
ГП «КБ «Южное», г.Днепропетровск, Украина

Оценка эйлеровых моделей многофазных течений для расчета течений с погруженными струями

Анотация: целью работы являлось сравнение эйлеровых моделей многофазных течений multi-fluid VOF+IATE и GENTOP, реализованных в ANSYS Fluent на примере течения ограниченной погруженной струи: определение глубины проникновения и концентрации газа при проникновении струи. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, рассмотрены достоинства и недостатки методов.

Ключевые слова: ограниченная погруженная струя, confined plunging jet, multi-fluid VOF, IATE, GENTOP, ANSYS Fluent, Volume of Fluid, Interface Area density Transport Equation.

При проектировании барботажных колонн, гидротехнических сооружений и топливных систем летательных аппаратов часто возникает необходимость решения задачи проникновения струи жидкости в покоящуюся жидкость, ограниченную цилиндрической трубой.

Течения с погруженными струями характеризуются течением с непрерывной свободной поверхностью в зоне свободной струи и пузырьковым течением в зонах перемешивания и зонах однородного двухфазного течения [1]. Наличие в одной расчетной области свободной поверхности и пузырей газа, размеры которых изменяются в диапазоне 0,1-5 мм затрудняет решение задачи методом VOlume of Fluid, потому что необходимо строить сетку с размерами ячеек меньше диаметра наименьшего пузыря газа.

Для снижения вычислительных затрат в настоящее время применяются методы, учитывающие разные масштабы поверхности раздела фаз путем комбинации уравнений неразрывности и движения с уравнением баланса популяций, и таким образом учесть проникновение газа в масштабах меньшей ячейки сетки.

Уравнение неразрывности для фазы q запишется в виде [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (1)$$

где \vec{v}_q – скорость фазы q , \dot{m}_{pq} характеризует перенос массы от фазы p к фазе q и \dot{m}_{qp} характеризует перенос массы от фазы q к фазе p . S_q – источник массы для каждой фазы.

Уравнения сохранения количества движения для фазы q [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} \\ & + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) \\ & + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}) \end{aligned} \quad (2)$$

где $\bar{\tau}_q$ – тензор вязких сил для фазы q .

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q \left(\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T \right) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{I} \quad (3)$$

где μ_q – динамическая вязкость; λ_q – вторая вязкость.

\vec{F}_q – зовнішня об’ємна сила; $\vec{F}_{lift,q}$ – підйомна сила; $\vec{F}_{wl,q}$ – сила відштовхування від стінки; $\vec{F}_{vm,q}$ – сила приєднаної маси; $\vec{F}_{td,q}$ – сила турбулентної дисперсії; \vec{R}_{pq} – сила взаємодії між фазами і p – тиск, загальний для всіх фаз.

\vec{v}_{pq} – міжфазна швидкість, визначена наступним чином. Якщо $\dot{m}_{pq} > 0$ (т. є. відбувається перенос маси від фази p до фази q), $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p$; якщо $\dot{m}_{pq} < 0$ (т. є. відбувається перенос маси від фази q до фази p), $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_q$. Аналогічно, якщо $\dot{m}_{qp} > 0$ тоді $\vec{v}_{qp} = \vec{v}_q$, $\dot{m}_{qp} < 0$ тоді $\vec{v}_{qp} = \vec{v}_p$.

Рівняння (2.5) повинно бути замкнено відповідним вираженням для міжфазної сили \vec{R}_{pq} . Ця сила залежить від тертя, тиску і інших факторів і повинна задовольняти умови: $\vec{R}_{pq} = -\vec{R}_{qp}$ і $\vec{R}_{qq} = 0$.

В ANSYS Fluent \vec{R}_{pq} використовується в наступній формі:

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \quad (4)$$

В багатфазних течіях з дискретною (газ) і неперервною (рідина) фазами розмір і розподіл бульбашок можуть швидко змінюватися внаслідок змін тиску, процесів розпаду і зливання бульбашок. Для урахування цих процесів застосовується модель концентрації площі поверхні розділу (interfacial area concentration), яка використовує рівняння переносу для вторичної фази (бульбашки газу в рідині). Рівняння переносу (Interface Area density Transport Equation) записується в вигляді [2]:

$$\frac{\partial(\rho_g \chi_p)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \vec{u}_g \chi_p) = \frac{1}{3} \frac{D\rho_g}{Dt} \chi_p + \frac{2}{3} \frac{\dot{m}_g}{\alpha_g} \chi_p + \rho_g (S_{RC} + S_{WE} + S_{TI}), \quad (5)$$

де χ_p – концентрація площі поверхні розділу, $\text{м}^2/\text{м}^3$ і α_g – відносний об’єм газу.

Перші два члени в правій частині рівняння (5) – розширення бульбашки внаслідок стиску і масоперенос (зміна фази). \dot{m}_g – відношення масового витрату газу до одиничного об’єму суміші, $\text{кг}/\text{м}^3/\text{с}$. S_{RC} і S_{WE} – джерельні члени зливання бульбашок внаслідок випадкових зіткнень і проникнення струї, відповідно. S_{TI} – джерельний член розпаду бульбашок під впливом турбулентності.

В методі General Two Phase Flow (GENTOP) [3] рівняння (5) не використовується. Газова фаза складається з неперервної газової фази і полідисперсної, що складається з кількох розмірних груп бульбашок, що рухаються з різною швидкістю. В межах групи швидкостей j рівняння нерозривності розраховується для кожної розмірної групи i ($i = 1, \dots, M_j$) включаючи джерельний член S_{ij} , який представляє локальний масоперенос газової фази, внаслідок розпаду і зливання бульбашок [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_i \alpha_i \rho_g) + \nabla \cdot (f_i \alpha_i \rho_g \vec{U}_j) = S_{ij}, \quad (6)$$

Перенос массы между полидисперсной и непрерывной газовой фазой определяется по формуле [3]:

$$\dot{m}_{dg \rightarrow cg} = (1 - \varphi_{fs}) \cdot \varphi_{morph} \cdot \rho_{dg} \cdot \alpha_{dg} \cdot 1 / \tau_{dg \rightarrow cg}, \quad (7)$$

где φ_{fs} - функция локализации поверхности раздела; φ_{morph} - функция перехода между дисперсным и непрерывным режимом; $\tau_{dg \rightarrow cg}$ - время массопереноса.



Рис. 1 – Схема расчетной области.

Использовалась двумерная расчетная область, изображенная на рисунке 1. F – точка пересечения погруженной струи со свободной поверхностью; вертикальная линия AB – ось симметрии; AG – радиус струи; GD – атмосфера; FE – свободная поверхность; DC – стенка; r – радиус струи; R – радиус трубы; L_j – длина струи, L – уровень жидкости.

Значения глубины проникновения газа, угла расширения струи, отношения расхода газа к расходу жидкости удовлетворительно совпадают с результатами эксперимента [1].

Список использованной литературы

1. Evans G. M. A study of a plunging jet bubble column: PhD Thesis 1990 [Электронный ресурс] / G. M. Evans. – The University of Newcastle. – Режим доступа: <https://nova.newcastle.edu.au/vital/access/manager/Repository/uon:722>
2. Ansys Fluent Theory Guide [Электронный ресурс] / ANSYS Inc, 2020. – Режим доступа: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/flu_th/flu_th.html?q=ansys%20fluent%20theory%20guide
3. A multi-field two-fluid concept for transitions between different scales of interfacial structures /S. Hansch, D. Lucas, E. Krepper, T. Hohne – International Journal of Multiphase Flow. – 2012. – Vol. 47. – p.171-182