



ХАРАКТЕРИСТИКА ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.Ж.Муродов ¹

А.Ш.Адилова ²

А.С.Абдуллаев ³

¹ Gulistan state university Guliston shahri, 4-mavze

^{2,3} Tashkent Institute of Textile and Light Industry

Shoxjaxon st.5, 100000, Tashkent city, Republic of Uzbekistan

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13846052>

Аннотация: в статье предлагается метод определения масштаба турбулентности при расчете турбулентной вязкости. Этот метод базируется на аналитических соотношениях из известных источников. Уравнение пограничного слоя, записанное стационарно в физических координатах, используется для математического моделирования. Эти уравнения решаются с помощью известных численных методов.

Ключевые слова: турбулентность, закрученного поток, осевой скорость, тангенциальной скорость, диаметра отсечки, перепад давления

Annotation: The article suggests using an equation for turbulent viscosity and analytical relationships from reliable sources to determine the size of turbulence. The boundary layer equation was utilized for mathematical modeling; it was expressed in stationary form in physical coordinates. Known from sources numerical methods are applied to solve these equations.

Keywords: turbulence, swirling flow, axial velocity, tangential velocity, cutoff diameter, pressure drop

Annotatsiya: Ushbu maqolada bir parametrli turbulentslik modelidagi noma'lum turbulentslik masshtabini oqim kengayishni analitik tenglamalarga asoslanib modellashtirish metodikasi taklif etilgan. Oqim jarayonini modellashtirish uchun barqaror holda fizik o'zgaruvchilarda yozilgan chegaraviy qatlam tenglamalaridan foydalanilgan. Ushbu tenglamalarni yechish uchun adabiyotlarda ma'lum bo'lgan sonli usullardan foydalanilgan. Oqim ko'ndalang kesimi uzunligining turbulentslik kattaligiga, shuningdek oqim parametrlariga ta'siri o'rganilgan. Ushbu masshtabning ochiq sohadagi jarayonlarni modellashtirishda ta'siri kamligi aniqlangan.

Kalit so'zlar: turbulentslik, aylanma oqim, eksenel tezlik, tangensial tezlik, kesish diametri, bosim tushishi

Турбулентность трудно описать точными словами, но легче описать турбулентное течение и движение по его характеристикам (Hinze, 1975) [1,2].

Во-первых, турбулентный поток имеет вариации во времени и пространстве, что называется однородностью. Турбулентный поток имеет три измерения и движется хаотически, в котором давление или скорость быстро изменяются стохастически. Преобразование кинетической энергии в тепло во всех турбулентных течениях, независимо от того, считается ли среднее течение одномерным или двумерным, называется диссипативным из-за вязких эффектов. В большинстве случаев для простоты турбулентные потоки считаются средними потоками, которые не точно отражают истинное турбулентное течение. Таким образом, для решения уравнений

Навье-Стокса вместо аналитического решения можно использовать численную модель [2]. Эти модели турбулентности используют некоторые предположения, чтобы добавить некоторые уравнения и решить все необходимые переменные.

Итак, скорость состоит из двух частей; одна часть представляет собой установившуюся среднюю скорость, а другая часть представляет собой переменную, которая может быть описана уравнениями Навье-Стокса $u'(t)$.

$$u(t) = U + u'(t) \quad (1)$$

Также в турбулентных течениях пограничные слои распространяются с большой скоростью, то есть увеличивается диффузия. Превращение кинетической энергии мельчайших вихрей во внутреннюю энергию или диссипацию (превращение части энергии упорядоченных процессов в энергию неупорядоченных процессов и, как следствие, в теплоту) происходит во всех турбулентных течениях, вызванных трением или вязкие силы. Самые большие вихреобразования получают энергию от среднего потока, а затем передают кинетическую энергию более мелким вихреобразованиям или размерам.

Уровень или интенсивность турбулентности представляет собой отношение между среднеквадратичным значением флуктуации скорости u' и средней скоростью U .

$$I = \frac{u'}{U} \quad (2)$$

Интенсивность турбулентности также может быть получена из кинетической энергии турбулентности по следующей формуле:

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} \quad (3)$$

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (4)$$

Вдоль этого направления потока имеется только одна составляющая средней скорости, остальные считаются равными нулю, но флуктуирующие составляющие скорости предполагаются равными, поскольку турбулентность предполагается изотропной. Поэтому формулу (2.3) можно записать следующим образом.

$$I = \frac{u'}{U} = \frac{\sqrt{\frac{2k}{3}}}{\sqrt{U_x^2}} = \frac{\sqrt{2k}}{U_x} \quad (5)$$

Понимание турбулентного потока в циклонах имеет решающее значение для успеха вычислительной гидродинамики. В SOLIDWORKS (CFD) есть несколько моделей турбулентности для моделирования закрученного турбулентного потока в циклонном сепараторе. Они варьируются от стандартной k-ε модели до более сложной модели Рейнольдса турбулентности напряжений. В качестве альтернативы усредненному подходу Навье-Стокса, разработанному Рейнольдсом, также доступна методология моделирования больших вихрей [3].

Выбор подходящей модели турбулентности для сильно закрученных потоков изучался многими исследователями [4,5]. Для сильно закрученных турбулентных потоков в циклонных сепараторах стандарты k-ε, URNS и реализуемые модели не были оптимизированы. Нереалистичное распределение профилей осевой скорости обеспечивается как стандартами k-ε, так и URNS k-ε модели турбулентности. В

соответствии с экспериментальными данными только модель турбулентности напряжений Рейнольдса способна предсказать комбинированный вихрь. Многие исследователи сообщили об успешном применении модели турбулентности напряжения Рейнольдса для различных исследований циклонных сепараторов [6-8]. Модель турбулентности напряжения Рейнольдса требует решения уравнений переноса для каждой из составляющих напряжения Рейнольдса. Это обеспечивает точную демонстрацию закрученного потока, осевой скорости, тангенциальной скорости, диаметра отсечки и перепада давления при моделировании циклона [8]. В этом исследовании он будет использоваться для определения того, как изменение размера входного отверстия циклона влияет на турбулентный поток в циклонном сепараторе. Уравнения неразрывности и баланса количества движения для потока несжимаемой жидкости следующие:

$$\frac{d\bar{u}_i}{dx_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{u}_i}{dt} + \bar{u}_j \frac{d\bar{u}_i}{dx_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \gamma \frac{d^2 \bar{u}_i}{dx_j dx_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} R_{ij} \quad (7)$$

где \bar{u}_i - средняя скорость, x_i - положение, \bar{P} - среднее давление, ρ - плотность, γ - кинематическая вязкость, $R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$ - тензор Рейнольдса. Здесь, $u'_i = u_i - \bar{u}_i$ - пульсирующая составляющая скорости. Модель Рейнольдса предоставляет дифференциальные уравнения переноса для оценки компонентов напряжения турбулентности.

$$\frac{\partial}{\partial t} R_{ij} + \bar{u}_k \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\gamma_t}{\sigma^k} \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} \right) - \left[R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} \left[R_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} K \right] - C_2 \left[P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \quad (8)$$

где условия производства турбулентности P_{ij} определяются как [1-5]:

$$P_{ij} = - \left[R_{ik} \frac{d\bar{u}_j}{dx_k} \right] + R_{ik} \frac{d\bar{u}_i}{dx_k}, \quad P = \frac{1}{2} P_{ij} \quad (9)$$

где P - переменная кинетическая энергия, μ - турбулентная вязкость; $b_k = 1$, $C_1 = 1,8$, $C_2 = 0,6$ - эмп. константы. Уравнение переноса для скорости диссипации турбулентности, ε , определяется как:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\gamma_t}{\sigma^\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (10)$$

В уравнении (10) $K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ - флуктуирующая кинетическая энергия, а ε - скорость диссипации турбулентности. Значения констант $\sigma^\varepsilon = 1,3$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ а также $C_{\varepsilon 2} = 1,92$.

Модели URNS занимают меньше времени и не требуют большого количества вычислительных методов. RANS-модели широко используются в практических задачах. Среднее время пребывания в циклоне определяется исходя из размеров циклона и расхода запыленности воздуха [10]. Время пребывания $t_{res} = \frac{V}{Q_{in}}$, где Q_{in} - расход воздуха, а V - объем циклона. Это значение используется для выбора временного шага. Шаг по времени для нестационарного моделирования должен составлять небольшую часть среднего времени пребывания $t_{res} \approx 0,08$ с (для всех протестированных циклонов). Таким образом, временной шаг 10^{-4} является приемлемым значением для текущего моделирования для получения точных результатов и получения масштабированных невязок менее 10^{-5} для всех переменных.

Крупномасштабное симуляция (LES) В этом типе моделирования уравнения потока усредняются в пространстве. При моделировании больших вихрей маленькие вихри имеют меньшую энергию, чем большие вихри, и моделируются малые вихри, а более крупные решаются численно и в зависимости от времени с использованием отфильтрованных уравнений Навье-Стокса. Модели LES и параметры моделей зависят от пространства и времени. LES требует много времени и вычислительных ресурсов, но обеспечивает более точное решение для больших водоворотов. LES эффективно используется во многих случаях и имеет свои собственные приложения. Прямое моделирование (DNS). В этих типах симуляции нет сходимости или усреднения. С помощью суперкомпьютеров они используются для решения трехмерных динамических и зависящих от времени уравнений Навье-Стокса течения жидкости. (DNS) является самым простым, поскольку в нем нет контролируемых допущений и ошибок. В LES учитываются и решаются все движения жидкости и диссипация кинетической энергии. Количество ячеек должно быть достаточно большим, а временной шаг должен быть достаточно мал, чтобы частицы жидкости не могли превышать размер одной ячейки. Самым трудоемким и вычислительно затратным подходом является DNS, но он имеет полное решение для турбулентности потока жидкости.

Список использованной литературы:

1. Муродов О.Ж, Адилова А.Ш , “Kanaldagi changning xarakat dinamikasi uchun Nav'e-Stoks tenglamasini yechish bo'yicha kompyuter dasturi” O'zRAVHIMA № DGU 12975. 13.11.2021;
2. Hinze, J., Turbulence. McGraw-Hill, USA. (1975).
3. Karimipannah, T., Turbulent jets in confined spaces. Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology, Sweden (1996)
4. Griffiths W.D, Boysan F., Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers, Journal of Aerosol Science 27 (2) (1996) pp.281–304.
5. Hoekstra A.J, Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators, Ph.D. thesis, Technical University Delft, (2000).
6. Secchiaroli A, Ricci R, Montelpare S, Alessandro V.D., Numerical simulation of turbulent flow in a Ranque–Hilsch vortex tube, International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (23-24) (2009) pp.5496–5511.
7. Chuah T, Gimbun J, Choong T.S., A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aero cyclones performance and hydrodynamics, Powder Technology 162 (2006) pp.126–132.
8. G. Wan G, Sun G, X. Xue, Shi M., Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator, Powder Technology 183 (2008) pp. 94–104.
9. Kaya F, Karagoz I., Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones, Current Science 94 (10)(2008) pp.1273–1278.
10. Bernardo S, Mori M, Peres A, DioNiSio R., 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles, Powder Technology 162 (3) (2006) pp.190–200.