

УДК 532.529

ЭФФЕКТ ТУРБУЛИЗАЦИИ ЗАТУХАЮЩЕЙ ОДНОРОДНОЙ ИЗОТРОПНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ КРУПНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

© 2024 г. Член-корреспондент РАН А. Ю. Вара́ксин^{1,2,*}, А. А. Мочалов^{1,2}

Поступило 19.04.2024 г.

После доработки 19.04.2024 г.

Принято к публикации 01.08.2024 г.

На основе двухпараметрической модели турбулентности для двухфазного потока впервые изучено влияние присутствия крупных частиц на затухающую однородную изотропную турбулентность. Показано, что обнаруженный эффект турбулизации возрастает с ростом объемной концентрации частиц и их размера.

Ключевые слова: однородная изотропная турбулентность, влияние крупных частиц, турбулизация

DOI: 10.31857/S2686740024050053, EDN: HXMNVG

Однофазные и двухфазные турбулентные течения широко распространены в природе и находят свое применение в технике [1–6]. Установление влияния дисперсной примеси в виде частиц (капель) на характеристики турбулентности несущего потока газа — одна из главных проблем теории двухфазных турбулентных течений [7–10].

На сегодняшний день известны несколько основных механизмов влияния частиц на энергию турбулентности газа. Одним из них является генерация турбулентности несущей фазы в турбулентных следах за движущимися крупными частицами [9, 10]. Этот механизм реализуется при высоких значениях числа Рейнольдса частицы Re_p , вычисляемого по диаметру частиц и относительной скорости движения частиц и газа.

Целью настоящей работы является анализ эффекта наличия в потоке крупных

частиц на процесс дополнительной генерации турбулентности для классического случая вырождающейся однородной изотропной турбулентности.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим движение несжимаемого вязкого газа, несущего тяжелые частицы (физическая плотность частиц ρ_p намного превышает плотность газа ρ , т.е. $\rho_p \gg \rho$). Примем допущение, что объемная концентрация дисперсной фазы предполагается малой ($\Phi \ll 1$). В этом случае можно пренебречь столкновениями частиц между собой. Необходимо отметить, что массовая концентрация $M = \rho_p \Phi / \rho$ может быть достаточно большой. Также сделаем допущение, что основными силами, определяющими поведение частиц в турбулентном потоке и их обратное влияние на его характеристики, являются силы аэродинамического сопротивления и сила тяжести.

Для выполнения анализа влияния частиц различной инерционности привлечем двухпараметрическую ($k - \epsilon$) модель турбулентности, модифицированную для случая двухфазного потока. Указанная модель содержит два

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*E-mail: varaksin_a@mail.ru

основных уравнения переноса — турбулентной энергии и скорости ее диссипации.

Уравнение переноса энергии турбулентности газа в присутствии частиц в сжатой форме имеет вид

$$\frac{\partial k}{\partial \tau} + \sum_j U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = D + P - \varepsilon + P_p - \varepsilon_p. \quad (1)$$

Здесь $k = \frac{1}{2} \sum_i \overline{u_i'^2}$ — энергия турбулентности газа (u_i' — i -я составляющая пульсационной скорости несущего газа); U_j — j -я составляющая осредненной скорости газа; τ — время.

Члены, стоящие в левой части уравнения (1), описывают соответственно изменение во времени и конвективный перенос энергии турбулентности. Члены в правой части (1) описывают соответственно диффузию D , генерацию турбулентности за счет градиентов осредненной скорости P , диссипацию энергии турбулентности вследствие вязкости ε , дополнительную генерацию турбулентности из-за присутствия частиц P_p , дополнительную диссипацию энергии турбулентности вследствие наличия частиц ε_p .

Уравнение переноса диссипации турбулентности газа в присутствии частиц с использованием общепринятых градиентных представлений в сжатой форме имеет вид

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \sum_j U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = D_\varepsilon + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} - C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \varepsilon_p. \quad (2)$$

Здесь $\varepsilon = \nu \sum_j \sum_i \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}$ — скорость диссипации турбулентности газа (ν — кинематическая вязкость несущего газа); $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$ — постоянные.

Дополнительную (по сравнению с однофазным потоком) константу $C_{\varepsilon 3}$ чаще всего полагают равной $C_{\varepsilon 2}$, что следует из требования невливания на деструкцию диссипации турбулентности безынерционных частиц.

Члены, стоящие в левой части уравнения (2), описывают, соответственно, изменение во времени и конвективный перенос диссипации энергии турбулентности. Члены в правой части описывают, соответственно, диффузию диссипации энергии турбулентности D_ε , генерацию диссипации за счет энергии осредненного

движения $C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P$, подавление диссипации вследствие вязкости $C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$ и эффект влияния частиц на диссипацию турбулентности $C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \varepsilon_p$.

Из уравнений (1) и (2) следует вывод, что учет модификации турбулентности в двухфазных потоках предполагает корректное описание членов уравнения, отвечающих за дополнительные генерацию P_p и диссипацию ε_p вследствие присутствия частиц.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ

Изотропная однородная турбулентность представляет собой простейший класс турбулентных течений. Рассмотрим нестационарную вырождающуюся турбулентность за решеткой. В этом случае конвективный перенос, диффузия и порождение турбулентности отсутствуют [11]. Присутствие крупных инерционных частиц предполагает отсутствие их влияния на дополнительную диссипацию энергии турбулентности вследствие вовлечения в пульсационное движение несущего газа, т.е. $\varepsilon_p = 0$.

С учетом вышесказанного уравнения (1) и (2) значительно упрощаются и принимают вид

$$\frac{dk}{d\tau} = -\varepsilon + P_p, \quad (3)$$

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = -C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) следует, что для учета модификации турбулентности в рассматриваемом случае необходимо описание единственного члена уравнения, отвечающего за дополнительную генерацию турбулентности P_p вследствие присутствия крупных частиц.

В работе [12] на основе решения для автомобильного осесимметричного турбулентного следа получено следующее выражение для определения дополнительной генерации турбулентности в уравнении баланса пульсационной энергии:

$$P_p = a \left(\frac{C_D}{\beta} \right)^{4/3} \Phi \frac{W^3}{d_p}, \quad (5)$$

где постоянные $a = 0.027$, $\beta = 0.2$; C_D — коэффициент сопротивления частицы; Φ — объемная концентрация частиц; $W = |\mathbf{U} - \mathbf{V}|$ — модуль

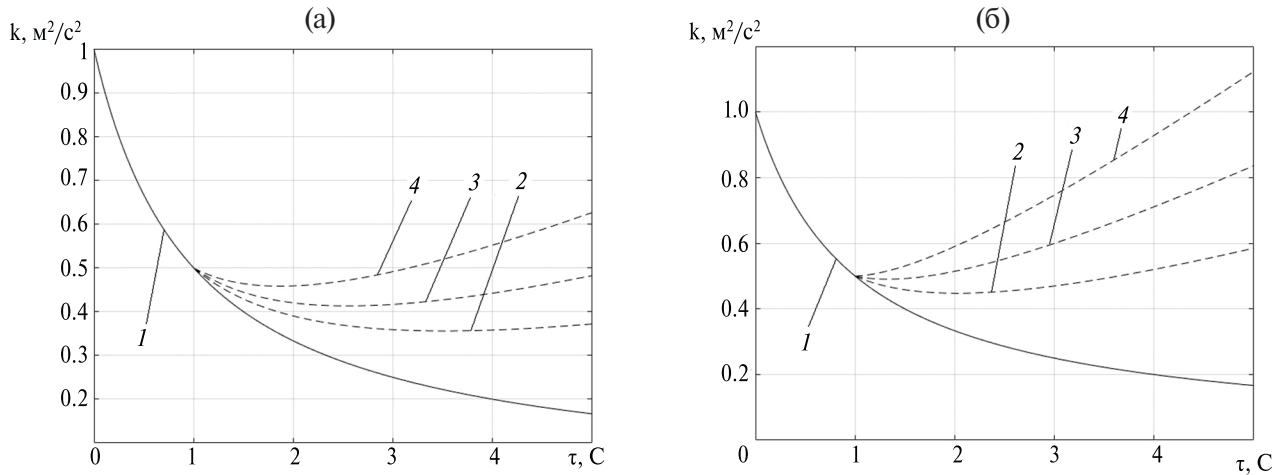


Рис. 1. Влияние присутствия крупных частиц на вырождающуюся однородную изотропную турбулентность: $\Phi = 5 \cdot 10^{-6}$ (а), $\Phi = 10^{-5}$ (б). Цифрами обозначены: 1 – однофазное течение; 2 – двухфазное течение, $d_p = 2 \cdot 10^{-3}$ м; двухфазное течение, 3 – двухфазное течение, $d_p = 5 \cdot 10^{-3}$ м; 4 – двухфазное течение, $d_p = 10^{-2}$ м.

относительной осредненной скорости несущего газа и частиц; d_p – диаметр частицы.

Далее в предположении о равенстве относительной скорости между фазами скорости витания (максимальная скорость осаждения) крупных частиц из уравнения их движения было получено выражение

$$W = \sqrt{3\rho_p d_p g / \rho}, \quad (6)$$

где g – ускорение силы тяжести.

При выводе (6) учитывалось отличие закона сопротивления частиц от закона Стокса, т.е.

$$\tau_p = \tau_{p0} / C(\text{Re}_p) = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu C(\text{Re}_p)}, \quad (7)$$

где τ_{p0} – время динамической релаксации стоксовой частицы, μ – динамическая вязкость, $C(\text{Re}_p) = 0.11\text{Re}_p / 6$ – поправочная функция, учитывающая влияние сил инерции на время релаксации нестоксовой частицы при $\text{Re}_p > 1000$.

Решение системы уравнений (3) и (4) производилось численным методом с учетом соотношений (5)–(7). Первые (“пристрелочные”) расчеты были выполнены при следующих начальных условиях: $k(0) = 1 \text{ м}^2/\text{с}^2$, $\varepsilon(0) = 1 \text{ м}^2/\text{с}^3$ при $\tau = 0$. Частицы вводились в поток в момент времени $\tau = 1$ с. Некоторые результаты вычислений для $\rho_p = 1.2$ и $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ приведены на рис. 1.

Из приведенных данных видно, что турбулизирующий эффект вследствие генерации турбулентности в следах за крупными частицами возрастает с увеличением объемной концентрации и размера последних.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00734.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Перенос вещества капли при формировании первичной каверны // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 508. С. 42–52.
2. Чувахов П.В., Егоров И.В. Турбулизация сверхзвукового пограничного слоя на прямом крыле из-за акустического шума // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 509. С. 63–66.
3. Губайдуллин Д.А., Шайдуллин Л.Р., Фадеев С.А. Вынужденные продольные колебания газа и аэрозоля в открытой трубе со скачком сечения // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 510. С. 59–63.
4. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С. Турбулентный пограничный слой на проницаемой пластине с положительным градиентом давления при вдуве инородного газа // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 510. С. 64–69.
5. Лапшин В.Б., Скубачевский А.А., Бугаев А.С. Пондемоторные силы при взаимодействии заряженной частицы с неоднородной электромагнитной

- волной // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 512. С. 32–35.
6. Уткин А.В., Фомин В.М. Молекулярно-динамическое исследование процесса кратерообразования при высокоскоростном взаимодействии металлических кластеров с подложкой // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 513. С. 76–80.
 7. Letournel R., Laurent F., Massot M., Vie A. Modulation of Homogeneous and Isotropic Turbulence by Sub-Kolmogorov Particles: Impact of Particle Field Heterogeneity // *Int. J. Multiphase Flow*. 2020. V. 125. № 103233.
 8. Rosa B., Copec S., Ababaei A., Pozorski J. Collision Statistics and Settling Velocity of Inertial Particles in Homogeneous Turbulence from High-Resolution DNS under Two-Way Momentum Coupling // *Int. J. Multiphase Flow*. 2022. V. 48. № 103906.
 9. Varaksin A.Y., Ryzhkov S.V. Turbulence in Two-Phase Flows with Macro-, Micro- and Nanoparticles: A Review // *Symmetry*. 2022. V. 14. № 2433.
 10. Varaksin A.Y., Ryzhkov S.V. Mathematical Modeling of Gas-Solid Two-Phase Flows: Problems, Achievements and Perspectives (A Review) // *Mathematics*. 2023. V. 11. № 3290.
 11. Зайчик Л.И., Алипченков В.М., Козлов И.М. Моделирование влияния мелкодисперсных частиц на турбулентность // *ТВТ*. 2010. Т. 48. № 2. С. 224–233.
 12. Зайчик Л.И., Вараксин А.Ю. Влияние следа за крупными частицами на интенсивность турбулентности несущего потока // *ТВТ*. 1999. Т. 37. № 4. С. 683–687.

ON THE EFFECT OF TURBULIZATION OF DECAYING HOMOGENEOUS ISOTROPIC TURBULENCE BY LARGE PARTICLES

Corresponding Member of the RAS A. Yu. Varaksin^{a,b}, A. A. Mochalov^{a,b}

^a*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

By using of a two-parameter turbulence model for two-phase flow the effect of the presence of large particles on decaying homogeneous isotropic turbulence was studied for the first time. It is shown that the detected effect increases with increasing volume concentration of particles and their size.

Keywords: homogeneous isotropic turbulence, effect of large particles, turbulization