

УДК 532.529

## О ВЛИЯНИИ МАКРО-, МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ НА ТУРБУЛЕНТНОСТЬ НЕСУЩЕГО ГАЗА

© 2021 г. Член-корреспондент РАН А. Ю. Варакин<sup>1,2,\*</sup>

Поступило 03.02.2021 г.

После доработки 03.02.2021 г.

Принято к публикации 08.02.2021 г.

С использованием двухпараметрической модели турбулентности для двухфазного потока впервые получено соотношение, учитывающее все основные механизмы влияния частиц на турбулентность газа. Найденное выражение позволяет проводить анализ влияния частиц на энергию турбулентности несущей фазы в широком диапазоне изменения инерционности последних. Показано, что турбулизующий эффект предельно малоинерционных частиц (наночастицы) сменяется ламинаризирующим эффектом малоинерционных частиц (микрочастицы), а затем снова сменяется на турбулизующий вследствие дополнительной генерации турбулентности в следах за крупными частицами (макрочастицы).

*Ключевые слова:* турбулентность, влияние частиц, ламинаризация, турбулизация, макрочастицы, микрочастицы, наночастицы

DOI: 10.31857/S2686740021020103

Установление влияния дисперсной примеси в виде частиц (капель) на характеристики турбулентности несущего потока газа — одна из главных проблем теории двухфазных турбулентных течений [1–8].

На сегодняшний день известны три основных механизма влияния частиц на энергию турбулентности газа [8]: 1) генерация турбулентности несущей фазы в турбулентных следах за движущимися крупными частицами [9–11]; 2) диссипация турбулентности за счет траты энергии крупных вихрей на вовлечение относительно малоинерционных частиц в крупномасштабное пульсационное движение [12, 13]; 3) генерация турбулентности за счет снижения энергии мелких вихрей, вовлекающих предельно малоинерционные частицы в мелко-масштабное пульсационное движение и отвечающих за подавление турбулентности [14].

Целью настоящей работы является одновременный учет всех трех описанных выше механизмов влияния дисперсной фазы, что позволит проводить анализ процессов дополнительной диссипации и дополнительной генерации энергии

турбулентности в потоках с частицами при варьировании инерционности последних в максимально возможном диапазоне.

### ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Рассмотрим движение несжимаемого вязкого газа, несущего тяжелые частицы. Физическая плотность частиц  $\rho_p$  намного превышает плотность газа  $\rho$ . Объемная концентрация дисперсной фазы  $\Phi$  предполагается малой, чтобы можно было пренебречь столкновениями частиц между собой.

Массовая концентрация  $M = \frac{\rho_p \Phi}{\rho}$  может быть достаточно большой. Примем допущение, что основной силой, определяющей поведение частиц в турбулентном потоке и их обратное влияние на его характеристики, является сила аэродинамического сопротивления.

Для выполнения анализа влияния частиц различной инерционности привлечем двухпараметрическую  $k - \epsilon$  модель турбулентности, модифицированную для двухфазного потока. Указанная модель содержит два основных уравнения переноса — турбулентной энергии и скорости ее диссипации.

Уравнение переноса энергии турбулентности газа в присутствии частиц в сжатой форме

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана (национальный  
исследовательский университет), Москва, Россия

\*E-mail: varaksin\_a@mail.ru

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

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;  $\tau$  – время.

Члены, стоящие в левой части уравнения (1), описывают, соответственно, изменение во времени и конвективный перенос энергии турбулентности. Члены в правой части описывают соответственно диффузию  $D$ , генерацию турбулентности за счет градиентов осредненной скорости  $P$ , диссипацию энергии турбулентности вследствие вязкости  $\varepsilon$  и эффект влияния частиц на энергию турбулентности  $A_k$ .

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

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

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 ( $\nu$  – кинематическая вязкость несущего газа);  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $C_{\varepsilon 3}$  – постоянные.

Дополнительную (по сравнению с однофазным потоком) константу  $C_{\varepsilon 3}$  положим в дальнейшем равной  $C_{\varepsilon 2}$ , что следует из требования невливания на деструкцию диссипации турбулентности безынерционных частиц [14].

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  $D_\varepsilon$ , 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  $C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} A_k$ .

Член уравнения  $A_k$ , отвечающий за влияние частиц на энергию турбулентности, должен учитывать все три основные физические механизмы и может быть представлен в следующем виде:

$$A_k = P_{pS} + P_{pL} - \varepsilon_p. \quad (3)$$

Здесь  $P_{pS}$  – дополнительная генерация энергии турбулентности вследствие вовлечения предельно малоинерционных частиц в мелкомасштабное пульсационное движение;  $P_{pL}$  – дополнительная генерация энергии турбулентности в следах за движущимися крупными частицами;  $\varepsilon_p$  – дополнительная диссипация турбулентности вследствие вовлечения относительно малоинерционных частиц в крупномасштабное пульсационное движение.

Далее будем рассматривать случай стационарно-го гидродинамически развитого течения, для которого левая часть уравнений (1) и (2) обращается в нуль. С целью получения простого аналитического решения, описывающего влияние частиц на энергию турбулентности, анализ проведем в так называемом бездиффузионном приближении ( $D = 0$ ).

С учетом принятых допущений уравнение (1) приобретает вид

$$P + P_{pS} + P_{pL} = \varepsilon + \varepsilon_p. \quad (4)$$

В отличие от уравнения для турбулентной энергии, в уравнении для диссипации (2) необходимо учитывать диффузионный перенос  $D_\varepsilon$ . Для случая стационарного гидродинамически развитого течения (без учета нестационарного и конвективного членов) с учетом (4), из (2) получаем

$$D_\varepsilon = \frac{(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1})\varepsilon P}{k} = 0. \quad (5)$$

С целью получения аналитического решения диффузионный поток в (5) аппроксимируется алгебраическим соотношением [14]

$$D_\varepsilon = \frac{(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1})C_\mu^{3/2} k^2}{l^2} = 0, \quad (6)$$

где  $C_\mu = 0.09$ ,  $l$  – интегральный пространственный масштаб турбулентности (длина пути смешения Прандтля–Никурадзе).

Приравнявая (5) и (6), получаем выражение для скорости диссипации турбулентной энергии

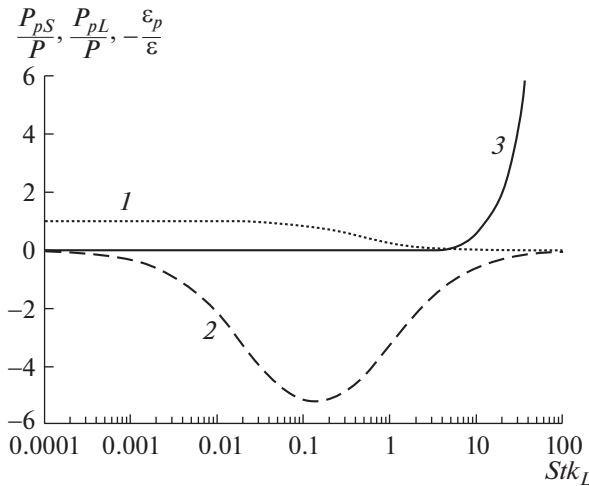
$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/2} k^3}{l^2 P}. \quad (7)$$

Полученное из уравнения для диссипации энергии турбулентности соотношение (7) выражает связь между диссипацией и “генерационным” членом  $P$ .

Член, отвечающий за генерацию энергии турбулентности в однофазном потоке из осредненного движения, обычно представляют как

$$P = \frac{C_\mu k^2}{l} \left( \frac{\partial U_x}{\partial y} \right)^2, \quad (8)$$

где  $U_x$  – продольная составляющая скорости газа;  $y$  – поперечная координата, направленная от стенки к оси трубы.



**Рис. 1.** Иллюстрация вклада основных механизмов влияния частиц на турбулентность несущего потока в зависимости от инерционности:  $\frac{P_{pS}}{P}$  (1);  $-\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon}$  (2);  $\frac{P_{pL}}{P}$  (3).

Подставим в (4) выражения для  $P$  и  $\varepsilon$  из (8) и (7). Произведя несложные преобразования, получим выражение для турбулентной энергии несущего потока

$$k = \frac{Pl^2 \left( \frac{\partial U_x}{\partial y} \right)^2 \left[ 1 + \frac{P_{pS} + P_{pL}}{P} \right]}{\varepsilon C_\mu^{1/2} \left( 1 + \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} \right)}. \quad (9)$$

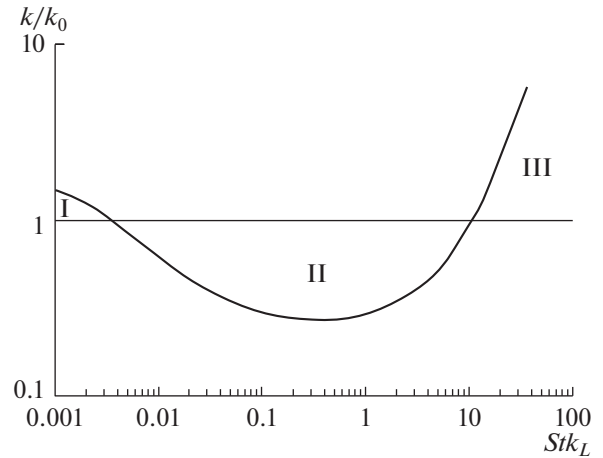
Предположив, что воздействием дисперсной фазы на профиль осредненной скорости газа так же, как и на распределение длины смещения, при анализе влияния на интенсивность турбулентной энергии можно пренебречь, для равновесного приближения ( $P = \varepsilon$ ) из (9) получаем

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1 + \frac{P_{pS} + P_{pL}}{P}}{1 + \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon}}, \quad (10)$$

где  $k_0 = \frac{l^2}{C_\mu^{1/2}} \left( \frac{\partial U_x}{\partial y} \right)^2$  – турбулентная энергия однофазного потока.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОЙ ИНЕРЦИОННОСТИ НА ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Для расчета влияния частиц по уравнению (10) в случае пристеночной турбулентности можно воспользоваться выражениями для  $P_{pS}$ ,  $P_{pL}$  и  $\varepsilon_p$ , полученными ранее в [14, 11, 12] соответственно.



**Рис. 2.** Влияние инерционности частиц на энергию турбулентности несущего газа ( $M = 1, z = 0.2$ ). Цифрами обозначены: I – область генерации турбулентности предельно малоинерционными частицами; II – область диссипации турбулентности относительно малоинерционными частицами; III – область генерации турбулентности крупными частицами.

На рис. 1 показаны величины  $\frac{P_{pS}}{P}$ ,  $-\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon}$  и  $\frac{P_{pL}}{P}$  в зависимости от инерционности частиц (числа Стокса в крупномасштабном пульсационном движении  $Stk_L$ ). Расчет указанных величин производился на основе данных [11, 12, 14] для массовой концентрации частиц  $M = 1$ . Вычисления выполнены при следующих параметрах однофазного потока:  $z = 0.2$  (отношение тейлоровского и лагранжева временных масштабов турбулентности),  $k_0 = 1.5 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ,  $T_L = 0.043 \text{ с}$  и  $l = 0.007 \text{ м}$ .

На рис. 2 показано влияние инерционности частиц на отношение энергий турбулентности в двухфазном и однофазном потоке. Расчет энергии турбулентности двухфазного потока проводился с использованием соотношения (10) и рассчитанных ранее величин  $\frac{P_{pS}}{P}$ ,  $\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon}$  и  $\frac{P_{pL}}{P}$  (см. рис. 1).

Из приведенных данных видно, что с ростом инерционности частиц (числа Стокса) турбулизирующий эффект частиц вследствие их вклада в порождение турбулентности сменяется на ламинаризирующее влияние за счет дополнительной диссипации, а затем снова сменяется на турбулизирующий эффект вследствие генерации турбулентности в следах за крупными частицами.

Для большинства имеющихся на сегодняшний день экспериментальных данных по влиянию частиц на турбулентность газа диаметр каналов (труб) составляет десятки миллиметров, а скорости несущей фазы от нескольких до нескольких десятков метров в секунду. Для указанных условий предельно малоинерционные частицы имеют

субмикрометровые размеры (наночастицы), относительно малоинерционные частицы – микрометровые размеры (микрочастицы), а крупные частицы – миллиметровые размеры (макрочастицы). Этим обстоятельством объясняется использование этих терминов в названии сообщения.

Таким образом, с использованием двухпараметрической модели турбулентности для двухфазного потока впервые получено соотношение, учитывающее все основные механизмы влияния частиц на турбулентность газа. Полученное выражение позволяет проводить анализ влияния частиц на энергию турбулентности несущей фазы в широком диапазоне изменения инерционности последних.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Horwitz J.A., Mani A. // *Physical Review Fluids*. 2020. V. 5. Paper № 104302.
2. Marchetti B., Bergougnoux L., Guazzelli E. // *J. of Fluid Mechanics*. 2020. V. 908. Paper № A30.
3. Sozza A., Cencini M., Musacchio S., Boffetta G. // *Physical Review Fluids*. 2020. V. 5. Paper № 094302.
4. Kalenko S., Liberzon A. // *Int. J. Multiphase Flow*. 2020. V. 133. Paper № 103451.
5. Li D., Luo K., Wang Z., Xiao W., Fan J.R. // *Physics of Fluids*. 2019. V. 31. Paper № 063303.
6. Buchta D.A., Shallcross G., Capecelatro J. // *J. of Fluid Mechanics*. 2019. V. 875. P. 254–285.
7. Richter D.H., Sullivan P.P. // *Physics of Fluids*. 2019. V. 26. Paper № 103304.
8. Varaksin A.Yu. // *High Temperature*. 2015. V. 53. № 3. P. 423–444.
9. Yuan Z., Michaelides E.E. // *Int. J. Multiphase Flow*. 1992. V. 18. № 5. P. 779–785.
10. Yarin L.P., Hetsroni G. // *Int. J. Multiphase Flow*. 1994. V. 20. № 1. P. 27–44.
11. Zaichik L.I., Varaksin A.Yu. // *High Temperature*. 1999. V. 37. № 4. P. 655–658.
12. Varaksin A.Yu., Zaichik L.I. // *High Temperature*. 1998. V. 36. № 6. P. 983–986.
13. Pakhomov M.A., Protasov M.V., Terekhov V.I., Varaksin A.Yu. // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2007. V. 50. P. 2107–2116.
14. Zaichik L.I., Alipchenkov V.M., Kozlov I.M. // *High Temperature*. 2010. V. 48. P. 205–214.

## ON THE EFFECT OF MACRO-, MICRO- AND NANOPARTICLES ON THE TURBULENCE OF A CARRIER GAS

Corresponding Member of the RAS A. Yu. Varaksin<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

By using of a two-parameter turbulence model for two-phase flow, for the first time, a relation was obtained that takes into account all main mechanisms of the effect of particles on gas turbulence. The expression found makes it possible to analyze the effect of particles on the turbulence energy of the carrier phase in a wide range of their inertia. It is shown that the turbulizing effect of extremely low-inertia particles (nanoparticles) is replaced by the laminarizing effect of low-inertia particles (microparticles), and then again is replaced by a turbulizing effect due to the additional generation of turbulence in the wakes behind the large particles (macroparticles).

*Keywords:* turbulence, particle influence, laminarization, turbulization, macroparticles, microparticles, nanoparticles