

РАСЧЕТ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ГАЗА В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

Сугак А.В.¹, Сугак Е.В.²

¹ Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия (150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88)

² Сибирский государственный аэрокосмический университет, Красноярск, Россия (660014, г. Красноярск, проспект им. газеты «Красноярский рабочий», 31), e-mail: sugak@mail.ru

Исходя из экспериментальных соотношений для расчета профиля осредненной скорости газа в турбулентном потоке получено выражение для расчета динамической скорости газа, которое позволяет построить профиль скорости без дополнительных измерений и сведений о потоке. Предложенный подход позволяет с использованием экспериментальных данных и упрощенных представлений о структуре и характеристиках турбулентных потоков газа рассчитать поля скоростей газа. Его использование дает хорошие результаты при расчете как однофазных, так и газодисперсных, газожидкостных (дисперсно-кольцевых) потоков и может использоваться при анализе, интенсификации и оптимизации гидродинамических, тепло- и массообменных процессов в однофазных и гетерофазных системах в режимах с интенсивным взаимодействием фаз, моделировании, расчетах и оптимизации процессов и аппаратов химических технологий и очистки промышленных газовых выбросов.

Ключевые слова: аэродинамика, процессы и аппараты, турбулентные потоки, профиль скорости газа.

CALCULATION OF THE GAS VELOCITY PROFILE IN THE TURBULENT FLOW

Sugak A.V.¹, Sugak E.V.²

¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia (150023, Yaroslavl, Moscow Av., 88)

² Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk, Russia (660014, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy Av., 31), e-mail: sugak@mail.ru

Based on the experimental relations for the calculation of the averaged velocity profile in a turbulent gas flow to obtain an expression for the calculation of dynamic gas velocity, which allows us to construct the velocity profile without additional measurements and information flow. The proposed approach makes use of experimental data and simplified ideas about the structure and characteristics of turbulent gas flows to calculate the velocity field of the gas. Its use gives good results in calculating both single-phase and gas-dispersion, gas-liquid (dispersion-ring) flows and can be used in the analysis, optimization and intensification of hydrodynamic, heat and mass transfer processes in single- and heterophase systems in modes of interaction with intensive phase modeling, calculation and optimization of processes and devices of chemical technologies and cleaning of industrial gas emissions.

Keywords: aerodynamics, processes and devices, turbulent flows, gas velocity profile.

Для турбулентного течения газа характерны беспорядочные хаотические пульсации скорости во всех направлениях, придающие всем происходящим процессам стохастический характер – отдельные объемы газа с определенной вероятностью могут перемещаться в любом направлении, и истинное значение любой локальной характеристики газа в конкретный момент времени представляет собой сумму величин, характеризующих основное и пульсационное течения. Следствием хаотических пульсационных движений является беспорядочное интенсивное перемешивание и специфическая турбулентная диффузия, турбулентная вязкость газа, более равномерное, чем при ламинарном течении, распределение осредненной скорости и резкое ее падение в пристенной области, увеличение потерь на трение и т.д.

Мгновенную скорость газа в любой точке потока в каждом из направлений можно представить как сумму осредненной скорости и скорости пульсаций:

$$w_x = \overline{w_x} + w_x', \quad w_y = \overline{w_y} + w_y', \quad w_z = \overline{w_z} + w_z'. \quad (1)$$

Подстановка этих выражений в уравнения движения Навье-Стокса и усреднение по времени и пространству приводит к уравнениям движения Рейнольдса, в которые входят добавочные касательные напряжения, обуславливающие повышение вязкости и гидравлического сопротивления [5-7]. Для замыкания системы уравнений применяются статистические или полуэмпирические теории турбулентности, используются аналогия между турбулентными и молекулярными напряжениями, экспериментальные данные о статистических связях между пульсациями в пространстве и времени, др. экспериментальные данные [5; 6].

Профиль осредненной осевой скорости газа по сечению канала наиболее точно можно аппроксимировать «универсальным профилем скорости» («трехслойной моделью»), полученным Прандтлем и Тейлором и дополненным Карманом (рис. 1) [10]:

$$w^+ = y^+ \text{ при } y^+ < 5 \text{ (ламинарный пристенный слой)}, \quad (2)$$

$$w^+ = -3,05 + 5 \ln(y^+) \text{ при } 5 < y^+ < 30 \text{ (буферный слой)}, \quad (3)$$

$$w^+ = 5,5 + 2,5 \ln(y^+) \text{ при } 30 < y^+ < R^+ \text{ (турбулентное ядро)}, \quad (4)$$

где $w^+ = w/w^*$ – скоростной параметр («универсальная скорость»); $y^+ = w^*y/\mu$ – параметр расстояния трения («универсальная координата»); y – расстояние от стенки, м; $w^* = (\tau_0/\rho)^{1/2}$ – скорость трения (динамическая скорость), м/с; $\tau_0 = \lambda \rho w_{cp}^2/8$ – касательное напряжение трения на стенке, Н/м²; λ – коэффициент сопротивления; w_{cp} – средняя скорость газа, м/с.

Для оценки коэффициента сопротивления λ , необходимого для расчета касательного напряжения на стенке τ_0 и динамической скорости w^* , обычно используются эмпирические зависимости:

– формула Блазиуса (при $Re < 10^5$) [1; 2]:

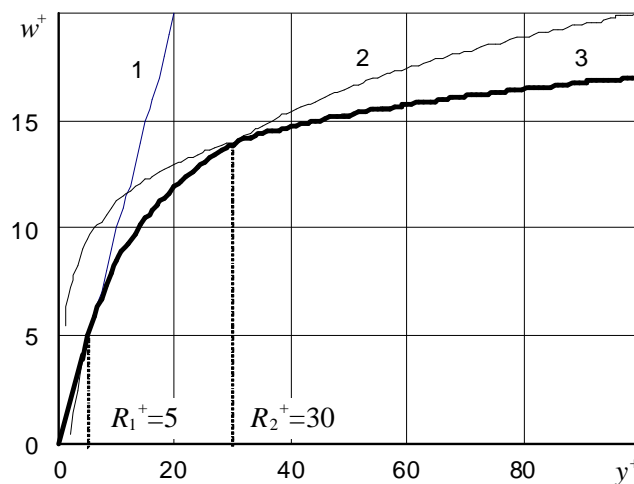


Рис. 1. Универсальный профиль скорости газа при турбулентном режиме течения:
1 – по формуле (2); 2 – по формуле (3); 3 – по формуле (4)

$$\lambda = 0,3164/Re^{0,25}; \quad (5)$$

– формула Никурадзе (при $Re > 10^5$) [1; 2]:

$$\lambda = 0,0032 + 0,221/Re^{0,237}; \quad (6)$$

– формула [2]:

$$1/\sqrt{\lambda} = 2 \lg(Re \sqrt{\lambda}) - 0,8. \quad (7)$$

Коэффициент сопротивления λ и касательное напряжение трения на стенке τ_0 вычисляются также непосредственно по перепаду давления в канале, которое определяется экспериментально.

При моделировании потоков в цилиндрических трубах можно на основании «универсального профиля» (2)–(4) построить профиль скорости газа без привлечения дополнительных эмпирических и полуэмпирических зависимостей и коэффициентов из условия обеспечения заданных объемного расхода газа или среднерасходной скорости w_{cp} .

Расход газа в цилиндрическом канале складывается из расходов в ламинарном пристенном слое, буферном слое и турбулентном ядре, границы между которыми R_1 и R_2 определяются условиями формул (2)–(4):

$$W = \pi(R^2 - R_1^2)w^*w_1^+ + \pi(R_1^2 - R_2^2)w^*w_2^+ + \pi R_2^2 w^*w_3^+ = \\ = \frac{2\pi\mu^2}{w^*\rho^2} \left[\int_0^5 y^+(R^+ - y^+) dy^+ + \int_5^{30} (-3,05 + 5 \ln y^+) (R^+ - y^+) dy^+ + \int_{30}^{R^+} (5,5 + 2,5 \ln y^+) (R^+ - y^+) dy^+ \right]. \quad (8)$$

После интегрирования и преобразований из выражения (8) можно получить соотношение между средней и динамической скоростями газа в виде [6]

$$w_{cp} = \frac{W}{\pi R^2} = 2,5w^* \ln \frac{w^*\rho R}{\mu} + 1,75w^* - 127,792 \frac{\mu}{\rho R} - 10603,449 \frac{\mu^2}{w^*\rho^2 R^2} \quad (9)$$

или через динамический критерий Рейнольдса $Re^* = w^*D\rho/\mu = 2w^*R\rho/\mu$

$$\frac{w_{cp}}{w^*} = \frac{Re}{Re^*} = 2,5 \ln Re^* - 255,584(Re^*)^{-1} - 42413,796(Re^*)^{-2} + 0,017. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) показывают соотношение между средней w_{cp} и динамической w^* скоростями газового потока в неявном виде. При заданном значении средней скорости уравнение (10) может быть решено итерационными методами. В качестве начального приближения можно использовать известные оценки характеристик турбулентного потока [2]

$$\frac{w_{max} - w_{cp}}{w^*} \approx 3,75, \quad \frac{w_{max}}{w_{cp}} = 1,15 \div 1,30, \quad (11)$$

откуда $w_{cp}/w^* \approx 12,5 \div 25$, причем нижнее значение соответствует малым значениям критерия

Рейнольдса ($Re \approx 5000$), верхнее – большим ($Re \approx 3 \cdot 10^6$).

Также в качестве начального приближения можно использовать известное приближенное соотношение [9]

$$w^* \approx 0,2w_{cp}/Re^{1/8}. \quad (12)$$

Расчеты и сравнение с экспериментальными данными показывают, что формула (10) при $Re > 10^4$ позволяет достаточно точно рассчитать и другие параметры потока, в частности – коэффициент сопротивления и, соответственно, гидравлическое сопротивление канала [6].

На рис. 2 показаны профили скорости газа при различных значениях критерия Рейнольдса Re , рассчитанные по формулам (2)–(4) с использованием полученного соотношения (10).

Выражения (2)–(4) и (10) дают также возможность рассчитать градиент осевой скорости газа по радиусу канала. После подстановки $w^+ = w/w^*$ и $y^+ = w^*\rho y/\mu$ можно получить [6]:

$$dw/dy = \rho(w^*)^2/\mu \quad \text{при } 0 < y < 5\mu/(w^*\rho); \quad (13)$$

$$dw/dy = 5w^*/y \quad \text{при } 5\mu/(\rho w^*) < y < 30\mu/(\rho w^*); \quad (14)$$

$$dw/dy = 2,5w^*/y \quad \text{при } 30\mu/(\rho w^*) < y < R, \quad (15)$$

или, учитывая, что в цилиндрическом канале $y = R - r$ и $dw/dy = -dw/dr$,

$$dw/dr = -2,5w^*/(R-r) \quad \text{при } 0 < r < R-30\mu/(\rho w^*); \quad (16)$$

$$dw/dr = -5w^*/(R-r) \quad \text{при } R-30\mu/(\rho w^*) < r < R-5\mu/(\rho w^*); \quad (17)$$

$$dw/dr = -\rho(w^*)^2/\mu \quad \text{при } R-5\mu/(\rho w^*) < r < R. \quad (18)$$

Исходные выражения (2)–(4) можно использовать и для двухфазного потока, если опре-

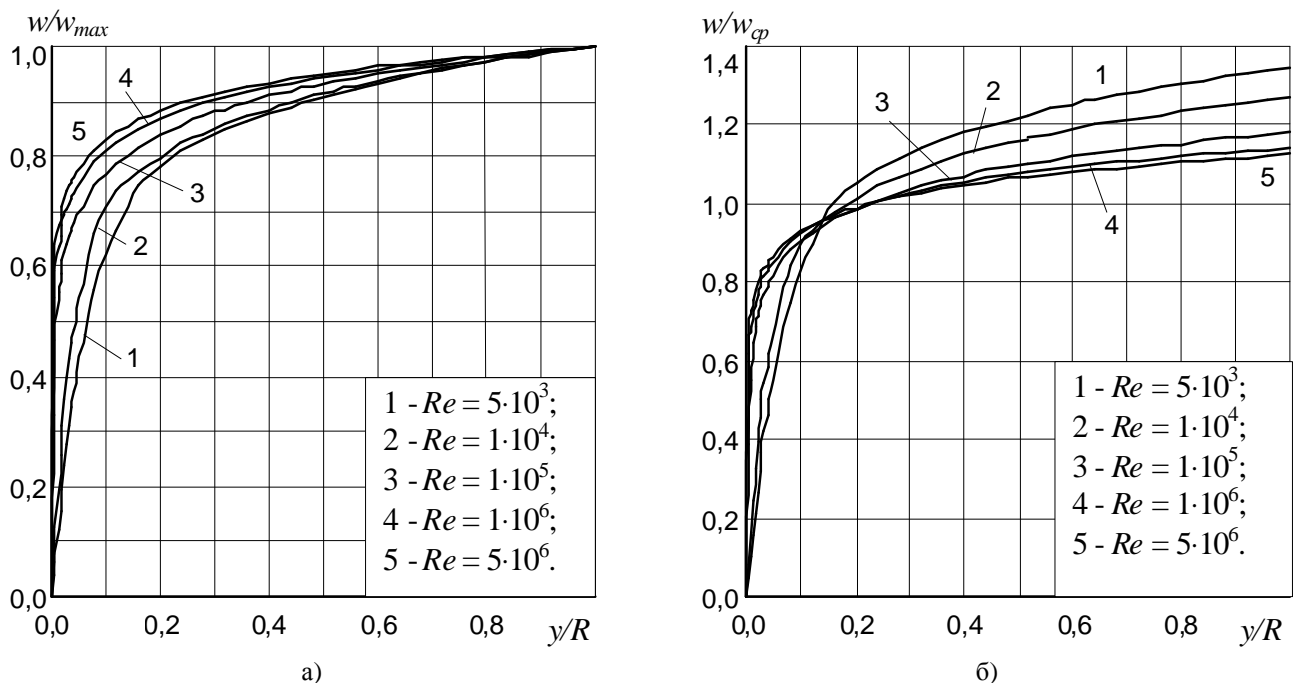


Рис. 2. Профили скорости газа в турбулентном потоке

делить его транспортные свойства с учетом дисперсной фазы, которые зависят от ее концентрации [6].

В частности, для расчета динамической вязкости двухфазной капельной среды можно использовать соотношение [6]

$$\mu' = \mu \left(1 + 2,5\varphi \frac{\mu_d + 0,4\mu}{\mu_d + \mu} \right), \quad (19)$$

которое для газодисперсных потоков с твердыми частицами ($\mu_d \gg \mu$) переходит в известную формулу Эйнштейна

$$\mu' = \mu(1 + 2,5\varphi). \quad (20)$$

При небольших концентрациях дисперсной фазы ($\varphi \ll 1$) ее влияние на профиль осевой скорости незначительно.

Предложенный подход позволяет с использованием экспериментальных данных и упрощенных представлений о структуре и характеристиках турбулентных потоков газа рассчитывать поля скоростей газа. Его использование дает хорошие результаты при расчете как однофазных, так и газодисперсных, газожидкостных (дисперсно-кольцевых) потоков и может использоваться при анализе, интенсификации и оптимизации гидродинамических, тепло- и массообменных процессов в гетерофазных системах в режимах с интенсивным взаимодействием фаз, моделировании и расчетах процессов и аппаратов химических технологий, оценки технологической и социально-экологической эффективности процессов очистки отходящих промышленных газов от пыли [3-8].

Разработанная методика расчета полей скоростей газа использовалась также при анализе движения и расчете равновесных траекторий и концентраций аэрозольных частиц в турбулентном потоке газа [4; 8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-06-00256) и Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Броунштейн Б.И., Фишбеин Г.А. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах. – Л. : Химия, 1977. – 280 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М. : Наука, 1978. – 736 с.
3. Сугак А., Сугак Е. Центробежные пылеуловители и классификаторы. – ИД «LAP Lambert Academic Publishing», 2012. – 226 с.
4. Сугак А.В., Сугак Е.В. Равновесные траектории аэрозольных частиц в турбулентном потоке.

ке // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 2. - С. 1-8. - URL: <http://www.science-education.ru/116-12336>.

5. Сугак Е. Процессы очистки газов в турбулентных газодисперсных потоках. - ИД «LAP Lambert Academic Publishing», 2011. – 308 с.

6. Сугак Е.В. Моделирование и интенсификация процессов очистки промышленных газовых выбросов в турбулентных газодисперсных потоках : дис. ... докт. техн. наук. – Красноярск : Сибирский государственный технологический университет, 1999. – 320 с.

7. Сугак Е.В., Войнов Н.А., Николаев Н.А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. – Казань : Отечество, 2009. – 224 с.

8. Сугак Е.В., Сугак А.В. Моделирование турбулентных газодисперсных потоков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. - № 6. - С. 1-11. - URL: www.science-education.ru/106-8076.

9. Ужов В.Н. и др. Очистка промышленных газов от пыли. - М. : Химия, 1981. – 392 с.

10. Хьюитт Д., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. – М. : Энергия, 1974. – 408 с.

Рецензенты:

Войнов Н.А., д.т.н., профессор, Сибирский государственный технологический университет, г. Красноярск.

Чекалов Л.В., д.т.н., генеральный директор ЗАО «Кондор-Эко», Ярославская область, п. Семibrатово.