УДК 532.517+519.6+681.121

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В ЗАДАЧЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

NUMERICAL METHODS FOR CALCULATING TURBULENT FLOW PARAMETERS IN THE PROBLEM OF FLUE GAS FLOW MEASUREMENT

Садуллаев Алим Маратович
аспирант кафедры автоматизированных систем сбора и обработки информации,
Казанский национальный исследовательский технологический университет
alimsadullaev18@gmail.com

Шустрова Марина Леонидовна
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизированных систем сбора и обработки информации,
Казанский национальный исследовательский технологический университет
shu.ma@bk.ru

Фафурин Виктор Андреевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматизированных систем сбора и обработки информации,
Казанский национальный исследовательский технологический университет
ait@kstu.ru

Аннотация. Настоящая работа посвящена задаче выбора численного метода для расчета гидродинамических параметров потока дымовых газов, протекающих в ультразвуковых расходомерах. Выбор модели и численного метода, в свою очередь, позволит осуществить вывод расчетной зависимости метрологических характеристик измерительного узла в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: дымовые газы, гидродинамические параметры потока, модели турбулентности, вычислительная гидродинамика, корректирующий коэффициент.

Sadullaev Alim Maratovich
Postgraduate Student, Department of Automated Systems for Data Collection and Processing,
Kazan National Research Technological University
alimsadullaev18@gmail.com

Shustrova Marina Leonidovna
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor, Department of Automated Data Collection and Processing Systems,
Kazan National Research Technological University
shu.ma@bk.ru

Fafurin Viktor Andreevich
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Professor, Department of Automated Systems for Data Collection and Processing,
Kazan National Research Technological University
ait@kstu.ru

Annotation. This paper addresses the problem of selecting a numerical method for calculating the hydrodynamic parameters of flue gas flow in ultrasonic flowmeters. The selection of a model and numerical method, in turn, will enable the derivation of a calculated dependence on the metrological characteristics of the measuring unit under real operating conditions.

Keywords: flue gases, flow hydrodynamic parameters, turbulence models, computational fluid dynamics, correction factor.

Точное измерение расхода дымовых газов производственными комплексами является важной задачей, обусловленной экологическими требованиями и регулируемой нормативными документами [1]. Ультразвуковые расходомеры (УЗР) являются перспективным средством измерения расхода дымовых газов, однако методикой их применения предусмотрены специальные условия, в частности, присутствие прямолинейных участков до и после измерительного трубопровода [2, 3]. Ввиду сложности геометрических характеристик трубопроводов методы оценки метрологических характеристик расходомеров, приведенные в методике измерения, не всегда позволяют получить корректный результат, так как условия измерения существенно отличаются от стандартных, что становится источником дополнительных погрешностей. Влияние неравномерности профиля температур и скоростей потока, завихрений, и характера развития турбулентных структур потока в реальных условиях возможно оценить с помощью численного эксперимента.

Целью настоящей работы является определение численного метода, подходящего для решения задачи оценки гидродинамических параметров потоков дымовых газов в условиях внутренней задачи (течения среды в УЗР).

С позиции моделирования поток дымовых газов может быть рассмотрен как несжимаемая изотермическая квази-однофазная среда в рамках стационарного течения без учета гравитационных сил

при малой концентрации дисперсной фазы [4–7]. При этом режим течения, с учетом высоких скоростей течения и значительных диаметров трубопроводов, можно отнести к высокорейнольдсовой группе.

Современные методы вычислительной гидродинамики включают различные подходы к моделированию газодинамических параметров потока. Ключевым аспектом при выборе модели является учет нестационарных и вихревых характеристик потока. Классификация моделей турбулентности, составленная в рамках настоящей работы по данным [8–11], представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Классификация моделей турбулентности

Эффективность расчетных методов в контексте задачи оценки газодинамических параметров потока в УЗР, рассматривались в работах [12, 13]. Авторы [13] отмечают, что для развитого потока в гладкой трубе сравнительный анализ расчетных значений профиля скорости и гидравлических потерь по двухпараметрическим моделям семейства $\mathrm{k}-\varepsilon$, модели переноса сдвиговых напряжений Ментера (SST) и однопараметрической модели Спалларта-Аллмараса (S-A) показал что модели RNG $\mathrm{k}-\varepsilon$ (ewt) и SST $\mathrm{k}-\omega$ обеспечивают профиль скорости, который хорошо согласуется с экспериментальными данными. Модели турбулентности SST и S-A не отражают тенденции более ранней стабилизации давления по сравнению с полем скоростей при развитии структуры потока. В связи с этим, оптимальной моделью турбулентности для описания турбулентного течения в круглых трубах является RNG $\mathrm{k}-\varepsilon$ модель с усовершенствованной пристеночной функцией. Там же отмечены необходимые требования для построения сетки при использовании данной пристеночной функции.

Для невозмущенных осесимметричных профилей потока корректирующий коэффициент лежит в пределах $0{,}9 < \mathrm{k} < 1$. Для цилиндрического гладкого трубопровода при допущении о логарифмическом законе распределения скоростей зависимость $\mathrm{k} = \mathrm{f}(\mathrm{Re})$ имеет вид [13]:

$$\mathrm{k} = \left(1 + 0{,}01\sqrt{6{,}25 + 431\mathrm{Re}^{-0{,}237}}\right)^{-1}. \quad (1)$$

В свою очередь, эмпирическая зависимость, полученная интегрированием экспериментальных данных Никурадзе [12]:

$$\mathrm{k} = (1{,}12 - 0{,}011 * \lg\mathrm{Re})^{-1}. \quad (2)$$

Зависимости (1) и (2) справедливы для диапазона чисел Рейнольдса от $5{\cdot}10^3$ до $5{\cdot}10^6$. Данные зависимости позволяют проводить анализ результатов моделирования на основе сравнительного сопоставления их с корректирующим коэффициентом. Сопоставление зависимостей корректирующего коэффициента от числа Рейнольдса, полученных по моделям турбулентности стандартная $\mathrm{k}-\varepsilon\,(\mathrm{ewt})$, RNG $\mathrm{k}-\varepsilon\,(\mathrm{ewt})$, Realizable $\mathrm{k}-\varepsilon\,(\mathrm{ewt})$ и SST $\mathrm{k}-\omega$, с зависимостями (1) и (2) показано на рисунке 2 [13].

Сопоставив результаты, полученные в указанных работах, можно заключить, что профиль скорости, корректирующий коэффициент и соответственно метрологические характеристики ультразвуковых расходомеров с высокой степенью достоверности можно определять, используя модель турбулентности RNG семейства моделей $k-\varepsilon$ при Re > 10^4. Учитывая, что ввиду малой концентрации твердых частиц в дымовых газах данный поток можно рассматривать как квазиоднородный, модели указанной группы применимы и к решению задач, связанных с моделированием течения дымовых газов.

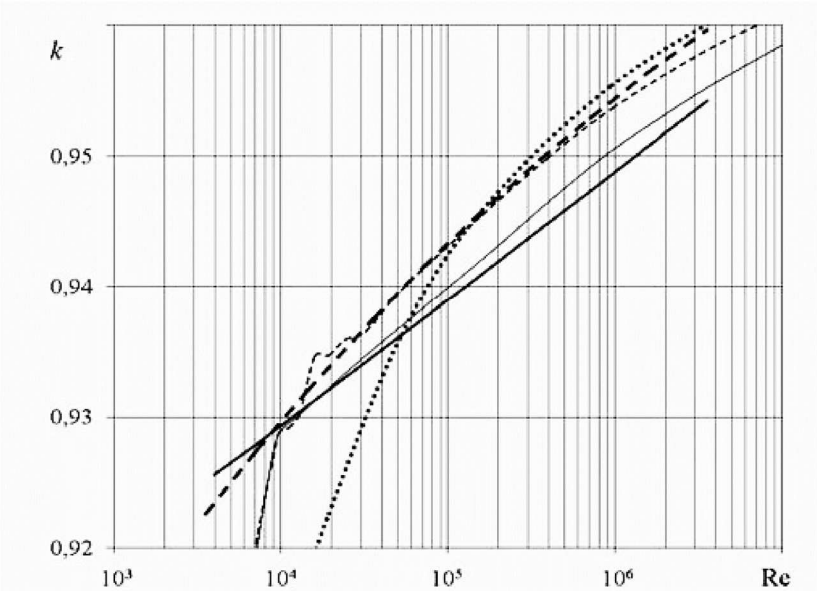

Рисунок 2 – Сравнительное сопоставление корректирующего коэффициента для условий развитого турбулентного потока в прямолинейной гладкой трубе: ——— – RNG k-ε; –·–·–·– – Realizable k-ε; - - - - - - - – стандартная k-ε; ····· – SST k-ω; — — — – теоретическая зависимость (1); ——— – эмпирическая зависимость (2)

Список литературы:

1. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 25.12.2023) «Об охране окружающей среды».
2. ГОСТ Р 8.611-2024 Государственная система обеспечения единства измерений. Расход и количество газа. Методика (метод) измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода. – М. : Российский институт стандартизации, 2025. – 57 с.
3. Актуализация методик измерения расхода и объема газа, регламентированных ГОСТ Р 8.740, ГОСТ Р 8.995, ГОСТ Р 8.611/ Р.И.Ганиев, В.А. Фафурин, М.Л. Шустрова [и др.] // Главный метролог. – 2025. – № 1 (142). – С. 32–36.
4. Felaco E., Gasser I. Gas dynamics in a chimney: Mathematical modeling and numerical simulations // Journal of Mathematics in Industry. – 2013. – Vol. 3. – Article 3.
5. CFD modeling of gas-particles flow in a circulating fluidized G-Volution gasification reactor / W. Hassen, M. Dhrioua, L. Kolsi [et al.] // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 144. – P. 438–451.
6. Modeling conjugate heat transfer in an anode baking furnace using OpenFOAM / D. Lahaye, P. Nakate, K. Vuik [et al.] // Fluids. – 2022. – Vol. 7. – № 4. – Article 124. – DOI: 10.3390/fluids7040124.
7. Fischer M.-D., Baier S., Boettcher K.E.R. Numerical modelling of the discharge behaviour of particles from a gas vessel // Results in Engineering. – 2023. – Vol. 18. – Article 101207.
8. CFD simulations on high-buoyancy gas dispersion in the wake of an isolated cubic building using steady RANS model and LES / C. Lin, R. Ooka, H. Kikumoto [et al.] // Building and Environment. – 2021. – Vol. 188. – Article 107478.
9. Turbulence models commonly used in CFD / J. Gorman, S. Bhattacharyya, L. Cheng [et al.] // IntechOpen. – 2021. – DOI: 10.5772/intechopen.99784.
10. Шустрова М.Л., Аминев И.М., Байтимиров А.Д. Средства численного моделирования гидродинамических параметров процессов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 14. – С. 221–224.
11. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. – 3rd ed. – DCW Industries, 2006.
12. Collings A.F. New developments in ultrasonic flow metrology // In Proc. of the Biennial Conference of the Metrology Society of Australia, National Measurement Laboratory, West Lindfield, Australia, Nov., 1995. – P. 53–57.
13. Фафурин В.А., Галеев М.К. Расчет корректирующего коэффициента ультразвукового расходомера // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – С. 152–155.

List of references:

1. Federal Law of 10.01.2002 № 7-FZ (as amended on 25.12.2023) «On Environmental Protection».

2. GOST R 8.611-2024. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Gas Flow Rate and Quantity. Methodology (Technique) for Measurement Using Ultrasonic Flow Transducers. – M. : Russian Institute of Standardization, 2025. – 57 p.

3. Updating the Methods for Measuring Gas Flow Rate and Volume Regulated by GOST R 8.740, GOST R 8.995, GOST R 8.611/ R.I. Ganiev, V.A. Fafurin, M.L. Shustrova [et al.] // Chief Metrologist. – 2025. – № 1 (142). – P. 32–36.

4. Felaco E., Gasser I. Gas dynamics in a chimney: Mathematical modeling and numerical simulations // Journal of Mathematics in Industry. – 2013. – Vol. 3. – Article 3.

5. CFD modeling of gas-particles flow in a circulating fluid G-Volution gasification reactor / W. Hassen, M. Dhrioua, L. Kolsi [et al.] // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 144. – P. 438–451.

6. Modeling conjugate heat transfer in an anode baking furnace using OpenFOAM / D. Lahaye, P. Nakate, K. Vuik [et al.] // Fluids. – 2022. – Vol. 7. – № 4. – Article 124. – DOI: 10.3390/fluids7040124.

7. Fischer M.-D., Baier S., Boettcher K.E.R. Numerical modeling of the discharge behavior of particles from a gas vessel // Results in Engineering. – 2023. – Vol. 18. – Article 101207.

8. CFD simulations on high-buoyancy gas dispersion in the wake of an isolated cubic building using steady RANS model and LES / C. Lin, R. Ooka, H. Kikumoto [et al.] // Building and Environment. – 2021. – Vol. 188. – Article 107478.

9. Turbulence models commonly used in CFD / J. Gorman, S. Bhattacharyya, L. Cheng [et al.] // IntechOpen. – 2021. – DOI: 10.5772/intechopen.99784.

10. Shustrova M.L., Aminev I.M., Baitymirov A.D. Tools for numerical modeling of hydrodynamic process parameters // Bulletin of Kazan Technological University. – 2014. – Vol. 17. – № 14. – P. 221–224.

11. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. – 3rd ed. – DCW Industries, 2006.

12. Collings A.F. New developments in ultrasonic flow metrology // In Proc. of the Biennial Conference of the Metrology Society of Australia, National Measurement Laboratory, West Lindfield, Australia, Nov., 1995. – P. 53–57.

13. Fafurin V.A., Galeev M.K. Calculation of the correction coefficient of an ultrasonic flowmeter // Bulletin of Kazan Technological University. – 2011. – P. 152–155.