УДК 519.673

Моделирование дымовой трубы с высоким числом Рейнольдса при помощи методов вычислительной гидродинамики

Мухаметов А. Н., Абдуллов Т. С., Якупов З. Я.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

Аннотация: В работе исследуется метод измерения потока в дымовой трубе при наличии турбулентного потока. Метод основан на ультразвуковом измерении потока, который используется в качестве автоматической системы измерения дымовых газов. Рассмотрена типичная конфигурация дымовой трубы и воздушных потоков с применением методов вычислительной гидродинамики (CFD), с помощью программного обеспечения OpenFoam. Показано сильное влияние вихревого (турбулентного) потока на погрешность измерения расхода согласно ГОСТ Р 8-611. Сравниваются различные конфигурации (количество, ориентация и положение) ультразвуковых лучей на предварительно сформированные профили потока при помощи CFD, согласно ГОСТ Р 57700.8-2018 и ГОСТ Р 57700.17-2018.

Ключевые слова: измерение расхода в дымовых трубах, измерение выбросов, турбулентный поток, ультразвуковой расходомер, CFD.

1. Введение

Измерение расхода в дымовых трубах является важной частью определения годовых массовых выбросов загрязняющих веществ, направляемых в атмосферу. Постановление правительства РФ от 16.11.2020 г. № 1847 устанавливает пределы допускаемой погрешности измерения скорости газопылевых потоков – 25 %. Чтобы соответствовать требованиям об учете показателей выбросов, на дымовые трубы устанавливают расходомеры. Неравномерный диаметр трубы, местные сопротивления и сложная геометрия влияют на полученные показания расходомеров. В данной работе анализируются профили скорости при различной ориентации измерительного луча, рассчитывается погрешность измерения расхода ультразвуковым расходомером.

2. Ультразвуковое измерение расхода

Установка прибора ультразвукового измерения представлена на рис. 1. Ультразвуковой датчик устанавливается на стенке трубы один выше по течению, другой ниже. Согласно [1] для определения времени распространения ультразвукового сигнала из датчика выше по течению τ_{AB} к нижнему датчику и от нижнего датчика τ_{BA} к расположенному выше, используются следующие формулы:

$$\tau_{AB} = \frac{l}{(c^2 - w^{-2}\sin^2\phi)^{0.5} + w\cos\phi};$$

$$\tau_{BA} = \frac{l}{(c^2 - w^{-2}\sin^2\phi)^{0.5} - w\cos\phi};$$

Здесь l – длина координаты вдоль луча, c – скорость звука в газе, w – средняя скорость потока и ϕ – угол установки расходомера относительно потока.



Рис. 1. Ультразвуковой расходомер в трубе

Время τ_{AB} короче, чем время τ_{BA} с момента отправления сигнала, следовательно различие во времени коррелирует со скоростью потока. Зная об отклонениях геометрических параметров от их номинальных значений, вследствие производственных допусков и допущениями в принятой модели расчета средней скорости газа в измерительном сечении, применяется корректирующий или калибровочный коэффициент. В общем случае объемный расхода газа при рабочих условиях с учетом калибровочного коэффициента может быть вычислен по формуле:

$$q_v = K_f \frac{l}{2\cos\phi} \left(\frac{1}{\tau_{AB}} - \frac{1}{\tau_{BA}}\right).$$

Здесь K_f – корректирующий или калибровочный коэффициент.

3. CFD-моделирование потока

В простейшем случае полностью развитого турбулентного потока осевой профиль потока может быть предсказан [2]. Однако присутствие нарушений потока выше по течению, может исказить профиль и привести к возникновению неосевых компонентов скоростей. Именно это приводит к погрешности определения расхода, поскольку не существует способа вычислить общий калибровочный коэффициент для столь большого разнообразия всевозможных полей потока. В данном случае количество расходомеров может быть увеличено, а скорость потока может быть оценена по средневзвешенной скорости на измеряемом отрезке пути.

В данном исследовании рассматривается вертикальная дымовая труба. Радиусы основания и выходного отверстия составляют 4.9 м и 3.5 м соответственно. Высота всей исследуемой модели составляет более 85 м. Входное отверстие представляет собой разветвленный тройник с прямоугольным сечением (рис. 2).

Приняты следующие граничные условия: поле скоростей равно 3 м/с и 6 м/с на входных отверстиях, атмосферное давление на выходном отверстии, применены простеночные функции на стенках, а значения кинетической энергии турбулентности и удельной скорости рассеивания турбулентности рассчитан относительно интенсивности турбулентности равной 3.8 %. Тепловые эффекты, влияющие на поток, не учитываются.

X Международная научная молодежная школа-семинар "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ" имени Е.В. Воскресенского Саранск, 14-18 июля 2022



Рис. 2. Геометрия исследуемой дымовой трубы

Для CFD-моделирования используется бесплатный пакет с открытым исходным кодом OpenFoam. Данное программное обеспечение содержит инструменты для всех этапов создания CFD: геометрия, генератор сетки, решатель и инструменты постпроцессинга для анализа данных и их визуализации.

Вычислительная сетка представляет из себя неструктурированную сетку. Для достижения полной сходимости решения были проверены несколько параметров плотности сетки. Была выбрана сетка № 3.

| № | кол-во ячеек | у+ для 3 м/с | размер ячеек у стенки | размер ячеек в центре |
|---|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 2.5 M | 1 | 0.11 мм | 50 мм |
| 2 | 3.5 M | 1 | 0.11 мм | 40 мм |
| 3 | 6 M | 1 | 0.11 мм | 20 мм |

Таблица 1. Параметры сетки

При предварительном исследовании предусматривает измерения профиля потока в двух режимах – «а» (ожидается наиболее равномерный профиль потока, т. е. максимально возможная скорость потока с наименьшим количеством препятствий на пути потока) и «б» (с наиболее низким расходом и максимальным количеством препятствий). Другими словами, цель состояла в том, чтобы проверить максимально возможный диапазон различных профилей потока, которые могут появиться во время эксплуатации трубы и сравнить их.

Исследованы результаты для высоты плоскости измерения скорости в диапазоне от 17.5 м до 83 м над основанием трубы. Руководство по эксплуатации на ультразвуковые расходомеры регламентируют прямолинейные участки до расходомера в диапазоне от $5D_N$ до $20D_N$, где D_N – это гидравлический диаметр. В данном случае руководство по эксплуатации, регламентирует 8 D_N , что соответствует высоте в 70 м.

4. Погрешность измерения ультразвукового расходомера

Для выбора оптимального места установки расходомера исследовались такие параметры как: асимметрия потока, коэффициент амплитуды и отклонение скорости потока. Диапазон отклонений измеренных параметров от теоретического профиля скорости имеет следующие значения: для асимметрии потока от 25 % до 5 %, коэффициент амплитуды изменяется от 32 % до 2 %, а скорость потока от 46 % до 11 %, для высот 12.5 м и 70 м соответственно. В данной работе рассматриваются ультразвуковые лучи, наклоненные под углом в 60° к горизонтальной плоскости, как показано на рис. 3. Симметричное расположение завихрения показанное на рис. 4 указывает что конфигурация расположения измерительного луча перпендикулярно входному каналу дает наибольшее отклонение по всем трём показателям и по всей длине измерительного канала. На рис. 5 показаны графики с профилями скорости при разных конфигурациях установки измерительного луча, при скорости 3 м/с. Погрешность рассчитывается без использования калибровочного коэффициента для полностью развитого профиля. Этот фактор может немного улучшить значение погрешности, но он не влияет на сравнение профилей [3].



Рис. 3. Расположение измерительных лучей



Рис. 4. Структура завихрений на высотах (а) 17.5 м, (б) 38.5 м, (в) 53 м, (г) 68 м



Рис. 5. График профилей скорости, пунктирной линией указан теоретический профиль скорости

На рис. 6 можно наблюдать как изменение высоты сказывается на распределение скоростей. Результаты изменения погрешности от высоты показаны на рис. 7. Значе-

ния рассчитаны через относительный радиус и относительную скорость на каждой из высот с учетом изменения профиля скорости от изменения внутреннего радиуса дымовой трубы. Указанные значения являются максимальными значениями при скоростях 3 м/с и 6 м/с.



Рис. 6. Распределение скоростей на высотах (а) 17.5 м, (б) 38.5 м, (в) 53 м, (г) 68 м



Рис. 7. График зависимости погрешности от высоты

5. Заключение

При помощи CFD-моделирования исследован метод измерения расхода в дымовой трубе на предмет дополнительной погрешности при наличии турбулентных завихрений потока, с ультразвуковым расходомером. Программное обеспечение OpenFoam использовалось для расчета полей скоростей в дымовой трубе при скорости газа на входе 3 м/с и 6 м/с. Исследована погрешность измерения расхода в дымовой трубе. Показана возможность выбрать лучшее место установки расходомера с использованием предварительного исследования профилей скорости. Оценка погрешности измерения расхода при различных ориентациях и высотах установки расходомера может улучшить дополнительную погрешность измерения до 35 %.

Литература

- 1. ГОСТ Р 8.611-2013 Расход и количество газа. Методика(метод) измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода.
- 2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973.
- Geršl J., Knotek S., Belligoli Z., Dwight R.P., Robinson R.A., Coleman M.D. Flow rate measurement in stacks with cyclonic flow – Error estimations using CFD modelling // Measurement. 2018. Vol. 129. P. 167–183.
- Мухаметов А.Н., Абудллов Т.С., Якупов З.Я. Расчет многоканальной диафрагмы на измерительном трубопроводе // Физико-математические, естественно-научные и социальные аспекты современного развития науки, техники и общества: материалы I Городской молодёжной научной конференции. Казань. С. 56--58.
- Ramon S.M., Guilherme S.A., Márcio F.M., Rogério R. Sensitivity analysis for numerical simulations of disturbed flows aiming ultrasonic flow measurement // Measurement. 2021. Vol. 185. P. 110–115.

 $\mathrm{MSC}~76\mathrm{D}55$

Modeling a high Reynolds number chimney using Computational Fluid Dynamics

A. N. Mukhametov, T. S. Abdullov, Z. Ya. Yakupov

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI

Abstract: A method for measuring the flow in a chimney in the presence of turbulent flow is being investigated in the article. The method is based on ultrasonic flow measurement, which is used as an automatic flue gas measurement system. A typical chimney and air flow configuration is considered using computational fluid dynamics (CFD) simulations using the OpenFoam software. A strong influence of vortex (turbulent) flow on the flow measurement error according to GOST R 8-611 is shown. Different configurations (number, orientation and position) of ultrasonic beams are compared on pre-formed flow profiles using CFD, according to GOST R 57700.8-2018 and GOST R 57700.17-2018.

 $Keywords: {\rm chimney \ flow \ measurement}, {\rm emission \ measurement}, {\rm turbulent \ flow}, {\rm ultrasonic \ flow \ meter}, {\rm CFD}$

References

- 1. GOST R 8.611-2013 Consumption and quantity of gas. Technique (method) of measurements with the help of ultrasonic flow transducers.
- 2. L.G. Loitsyansky, Mechanics of fluid and gas, M ., Nauka, 1973.
- J. Geršl, S. Knotek, Z. Belligoli, R.P. Dwight, R.A. Robinson, M.D. Coleman, Flow rate measurement in stacks with cyclonic flow – Error estimations using CFD modelling, *Measurement*, 2018, Vol. 129, P. 167–183.

- 4. A.N. Mukhametov, T.S. Abudllov, Z.Ya. Yakupov, Calculation of a multichannel diaphragm on a measuring pipeline, *Physical-mathematical, natural-science and social aspects of the modern development of science, technology and society: materials of the I City Youth Scientific Conference*, Kazan, P. 56-58.
- S.M. Ramon, S.A. Guilherme, F.M. Márcio, R. Rogério, Sensitivity analysis for numerical simulations of disturbed flows aiming ultrasonic flow measurement, *Measurement*, 2021, Vol. 185, P. 110–115.