Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 4 / 2025, Vol. 17, Iss. 4 https://esj.today/issue-4-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/81SAVN425.pdf

DOI: 10.15862/81SAVN425 (https://doi.org/10.15862/81SAVN425)

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Алексеев, Д. П. О некоторых особенностях оценки точности ультразвуковых расходомеров / Д. П. Алексеев, А. С. Кубенин // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 4. — URL: https://esj.today/PDF/81SAVN425.pdf. DOI: 10.15862/81SAVN425.

For citation:
Alekseev D.P., Kubenin A.S. On some features of assessing the accuracy of ultrasonic flow meters. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(4): 81SAVN425. Available at: https://esj.today/PDF/81SAVN425.pdf. DOI: 10.15862/81SAVN425. (In Russ., abstract in Eng.).

Алексеев Дмитрий Павлович
ООО «СовТИГаз», Москва, Россия
Главный специалист
E-mail: alekseev210@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=687192

Кубенин Александр Сергеевич
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», Москва, Россия
Ведущий научный сотрудник
Кандидат технических наук
E-mail: kube-n@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=935093

О некоторых особенностях оценки точности ультразвуковых расходомеров

Аннотация. В коммерческом учете газа ультразвуковые расходомеры получают широкое распространение благодаря отсутствию подвижных и газодинамически нагруженных элементов, обеспечивая высокую надежность, долговечность, простоту обслуживания и приемлемую для промышленности точность измерения объемного и массового расхода. Минимизация неопределенностей измерений критически важна для оптимального использования ресурсов. Характеристики расходомеров определяются при испытаниях на лабораторных стендах, оснащенных прямыми участками трубопроводов, выпрямителями потока и устройствами для формирования полностью/частично развитых течений. В качестве эталонных средств часто применяются измерительные гребенки. Однако конечная толщина стенки трубопровода на выходной кромке может существенно влиять на структуру потока вблизи гребенки. В статье представлены результаты исследования и анализа влияния удаленности выходной кромки корпуса расходомера от границы трубопровода на течение внутри него, особенно в зонах установки измерительных гребенок. Методом вычислительной гидродинамики получены скалярные поля параметров потока и профили скорости в сечении расходомера. Идентифицированы области отрыва и застоя, формирующиеся при обтекании расходомера на стенде. Установлено значительное влияние выходной кромки расходомера на форму профиля потока газа и количественно оценена возникающая погрешность. Показано, что погрешность в ядре потока достигает 0,37 %, а в пристеночной области — 9,95 %, с

максимальным относительным отклонением до 22 %. Экспериментально подтверждено, что увеличение расстояния между выходной кромкой канала и расходомера всего на один калибр позволяет снизить погрешность в пристеночной области с 9,95 % до 1,6 %, а максимальное расхождение — с 22 % до 2 %, что существенно повышает точность коммерческого учета.

Ключевые слова: газоснабжение; ультразвуковой расходомер; вычислительная газодинамика; компьютерное моделирование; профиль потока; измерительная гребенка; лабораторный стенд

Введение

Регулярные ошибки при измерении расхода природного газа при коммерческом учете на газораспределительных станциях формируют необходимость постоянного улучшения технологии и средств измерения расхода [1; 2]. Относительно небольшая погрешность в измерении может в итоге привести к большим денежным потерям на длительной временной дистанции. В этих условиях важны как правильный выбор устройств измерения расхода, так и внедрение улучшений в существующие конструкции расходомеров. Параметры и сфера использования каждого расходомера различаются и определяются при испытаниях в стандартных лабораторных условиях. Лабораторные стенды могут быть оснащены такими конструктивными частями как: прямые участки трубопроводов, расположенные вверх и вниз по течению; наличие формирователей и выпрямителей потока [3; 4]. Такие устройства структурируют течения и позволяют подавать на вход расходомера полностью или частично развитый поток [5]. В целях выявления неточностей в измерении расхода важно определить отклонение производительности расходомеров в работе при стандартных и полевых условиях. Существуют как расходомеры с подвижными конструктивными элементами, например, расходомеры турбинного типа, так и расходомеры с полнопроходным сечением, где какие-либо подвижные части в конструкции отсутствуют. К последним относятся набирающие популярность в последнее десятилетие ультразвуковые измерители расхода. На уменьшение неопределенности измерения расхода газа направлены усилия многих известных компаний по разработке ультразвуковых расходомеров, таких, например, как Sick, FMC. В основе работы ультразвуковых измерителей расхода лежит использование такого физического эффекта, как ускорение или замедление ультразвуковой волны, проходящей через газовый поток в прямом и обратном направлении. Измеряются времена движения в этих направлениях испускаемой ультразвуковым преобразователем ультразвуковой волны [6]. Сигнал, идущий по потоку, проходит расстояние быстрее, чем сигнал, идущий против течения. Эта разница во времени измеряется и позволяет рассчитать скорость потока и объемный расход [7].

Подробное изучение ультразвуковых расходомеров можно провести только в лабораторных условиях. Для таких исследований необходимы эталонные измерители расхода, используемые для сличения измеренных значений с показаниями разрабатываемого прибора. В роли таких эталонов может выступать, например, турбинный счетчик расхода. Но, зачастую, исследования требуют более подробной информации о потоке внутри расходомера, а также не всегда удается установить турбинный расходомер, требующий дополнительного длинного участка трубопровода после расходомера. В таких случаях можно использовать, например, гребенку, измеряющую статические и полное давления по высоте канала с последующим вычислением средней скорости потока. Гребенки получили широкое распространение при проведении аэродинамических исследований в аэродинамических трубах [8; 9]. Обычно, такие гребенки устанавливаются внутри аэродинамической трубы [10]. В случае аэродинамической продувки расходомера гребенка или измерительный зонд устанавливаются на срезе выходной кромки корпуса расходомера. Это обусловлено в том числе простотой и удобством монтажа. Но выходная кромка корпуса расходомера вследствие конечной толщины стенки на границе

81SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

трубы и окружающей среды может оказывать существенное влияние на структуру потока внутри трубы вблизи этой кромки. И, следовательно, усложнять условия сличения показаний гребенки с показаниями исследуемого расходомера. В работе поставлена задача оценки влияния удаленности выходной кромки корпуса ультразвукового расходомера в упрощенном виде на эффективность работы эталона скорости, в роли которого выступает гребенка.

Исходные данные и метод решения

Проведено трехмерное компьютерное моделирование турбулентного течения идеального вязкого газа (воздух при нормальных условиях P = 101325 Па, T = 20 гр. Ц.) со скоростью V = 20 м/с в трубопроводе, конфигурация которого показана на рисунке 1

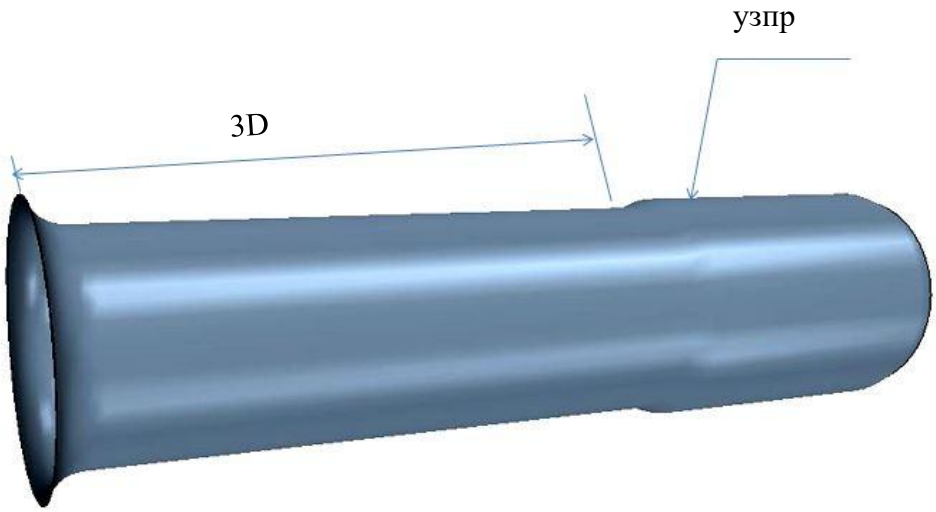


Рисунок 1. *Конфигурация канала (калибры длины участка посчитаны по D = 1 400 мм). Конфигурация 1 (разработано авторами)*

Расчеты проведены методами вычислительной гидрогазодинамики. Такие методы представляют собой дискретизацию расчетной геометрической модели, т. е. аппроксимацию расчетной области контрольными объемами с последующим решением обобщенного дифференциального уравнения переноса для каждого контрольного объема. В форме обобщенного дифференциального уравнения представляются уравнения движения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу, а также уравнения модели турбулентности, записанные через кинетическую энергию турбулентности и ее диссипацию. Внутри контрольных объемов члены уравнения дискретизируются конечно-разностными схемами. Данный вычислительный метод является консервативным, т. е. обеспечивает выполнения законов сохранения. Для замыкания системы уравнений используется набор начальных и граничных условий.

Поток воздуха со скоростью 20 м/с обеспечивается постоянным перепадом давления. На входе и выходе из расчетной области заданы значения давления для обеспечения заданного перепада. На стенках канала заданы условия прилипания. Стенки канала считаются гидравлически гладкими и адиабатическими. Среда считается несжимаемой и изотермической.

Конструкция трубопровода представляет собой трубу диаметром 1 400 мм, входная кромка которой спрофилирована таким образом, чтобы обеспечить безотрывное всасывание воздуха из окружающей среды внутрь трубопровода. Без специального профилирования входной кромки трубопровода в зоне входа в канал на внутренней стенке трубопровода образуются отрывные течения (рис. 2).

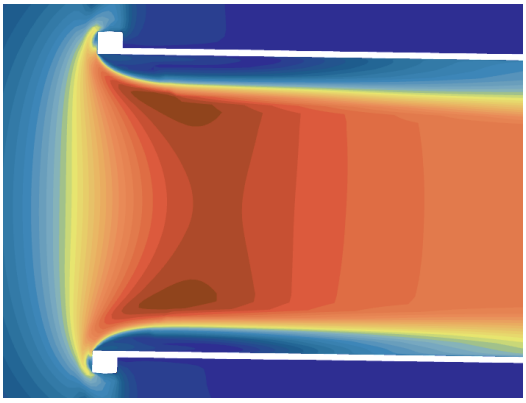


Рисунок 2. *Отрыв вдоль внутренней стенки канала без профилирования входной кромки (разработано авторами)*

Так как математическое моделирование в своей основе использует уравнения движения Навье-Стокса с замыканием их гипотезой Буссинеска и моделью турбулентности, то наличие таких отрывов может не точно описываться моделью турбулентности и стать причиной дополнительной погрешности моделирования. В таком случае встает вопрос об анализе влияния разных моделей турбулентности на результаты расчета, что не имеет смысл, конечно же, при отсутствии экспериментальной базы. Среди наиболее популярных моделей турбулентности можно выделить модель, использующую в качестве параметров переноса кинетическую энергию турбулентности и ее диссипацию; модель, в качестве параметров переноса использующую кинетическую энергию турбулентности и скорость ее диссипации с поправкой Ментера для турбулентных напряжений; модель рейнольдсовых напряжений.

Другим вариантом нейтрализации вносимых моделью турбулентности погрешностей является калибровка выбранной модели турбулентности путем настройки коэффициентов, отвечающих за генеративные и диссипативные члены в уравнениях переноса параметров турбулентности. Все озвученные подходы имеют право на жизнь, но требуют значительного объема временных и материальных ресурсов. Поэтому более простой вариант с использованием безотрывного входа (рис. 1) является наиболее предпочтительным в данной ситуации.

Результаты расчета

В результате моделирования получены поля параметров потока, такие как скорость, давление (рис. 3).

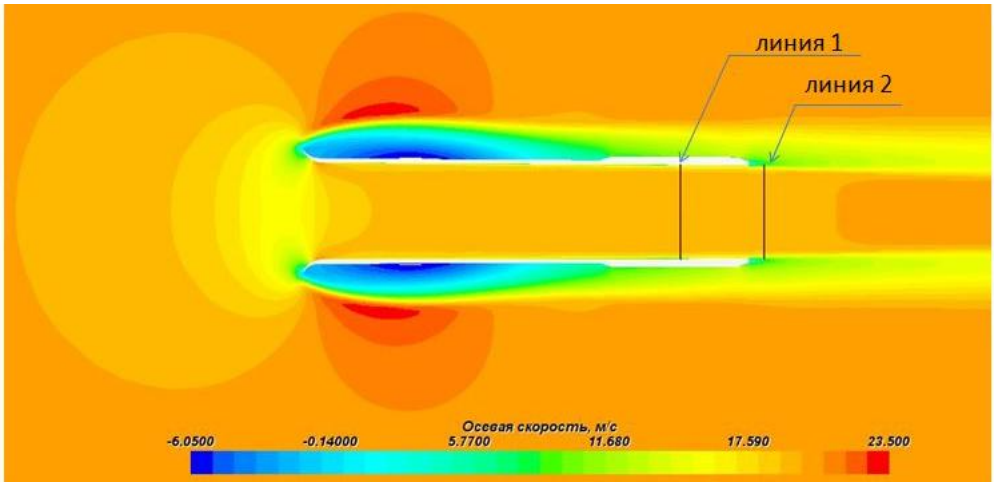


Рисунок 3. *Скалярное поле осевой скорости в расчетной области. Конфигурация 1 (разработано авторами)*

81SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

На рисунок 3 видны большие застойные отрывные зоны со стороны внешней поверхности канала. Появление таких зон обусловлено спрофилированными выпирающими кромками трубы, которые обеспечивают безотрывной ввод потока воздуха внутрь канала. Утолщение канала представляет собой сам расходомер, по центру которого (линия 1) и измеряется скорость потока. Линия 2 соответствует расположению гребенки на выходной кромке канала. Поскольку гребенка измеряет статические давления по высоте канала, важно, чтобы профили скорости в сечении 1 и сечении два были одинаковы с достаточной точностью. Это необходимо для проведения точного сличения показаний ультразвукового расходомера и скорости, вычисленной гребенкой.

В результате сравнения профилей осевой скорости в радиальных сечениях 1 и 2 (на рисунке 3 линия 1-расположена по центру УЗПР и линия 2-расположена в 120 мм от выходной кромки УЗПР) выявлены количественное и качественное расхождения между ними. В частности, в области ядра потока средняя относительная погрешность в значениях скорости составила 0,37 %, а в пристеночной области 9,95 %. При этом максимальное значение относительной погрешности в пристеночной области составляет 22 %. Соответствующие профиля в безразмерной форме показаны на рисунке 4.

Красная кривая — сечение 1; черная кривая — сечение 2

Рисунок 4. *Профили скорости в сечениях 1 и 2. Конфигурация 1 (разработано авторами)*

На рисунке 4 и на всех последующих по оси ординат отложена осевая скорость, отнесенная к максимальной осевой скорости в данном сечении. По оси абсцисс — безразмерная координата (расстояние, отнесенное к радиусу УЗПР DN1400).

Такое различие в профилях потока обусловлено близким расположением выходной кромки канала к УЗПР, а также тем, что при данной схеме измерения сечение 2 расположено на срезе выходной кромки канала. Для подтверждения данного предположения конфигурация канала модифицирована. Конфигурация канала дополнена участком длиной один калибр, расположенного после УЗПР (рис. 5).

Результаты численного расчета течения газа в канале новой конфигурации показаны на рисунке 6 в виде скалярного поля осевой скорости во всей расчетной области. На рисунке 7 показаны профиля осевой скорости в сечении 1 (где проводятся измерения с помощью УЗПР) для двух случаев конфигурации канала. Из рисунка видно, что отличия между профилями практически нет (в области ядра потока средняя относительная погрешность в значениях скорости составила 0,015 %, а в пристеночной области 0,33 %).

81SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

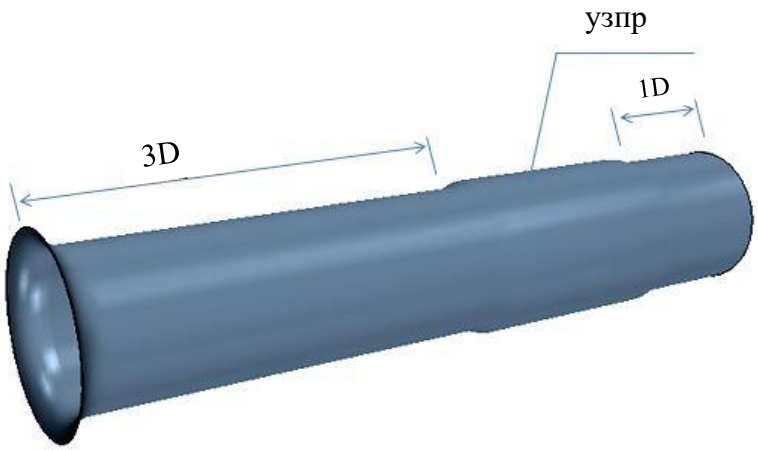


Рисунок 5. *Модифицированная конфигурация канала. Конфигурация 2 (разработано авторами)*

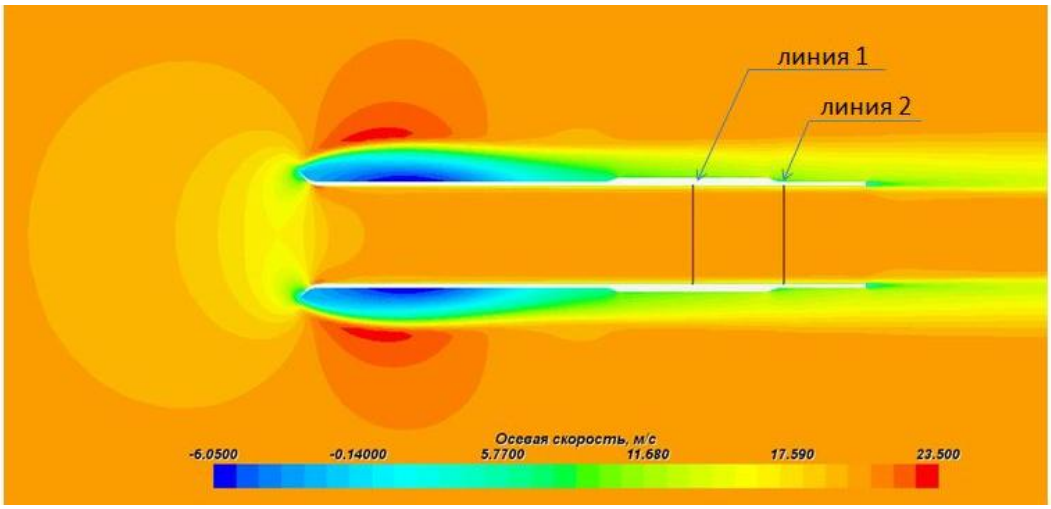
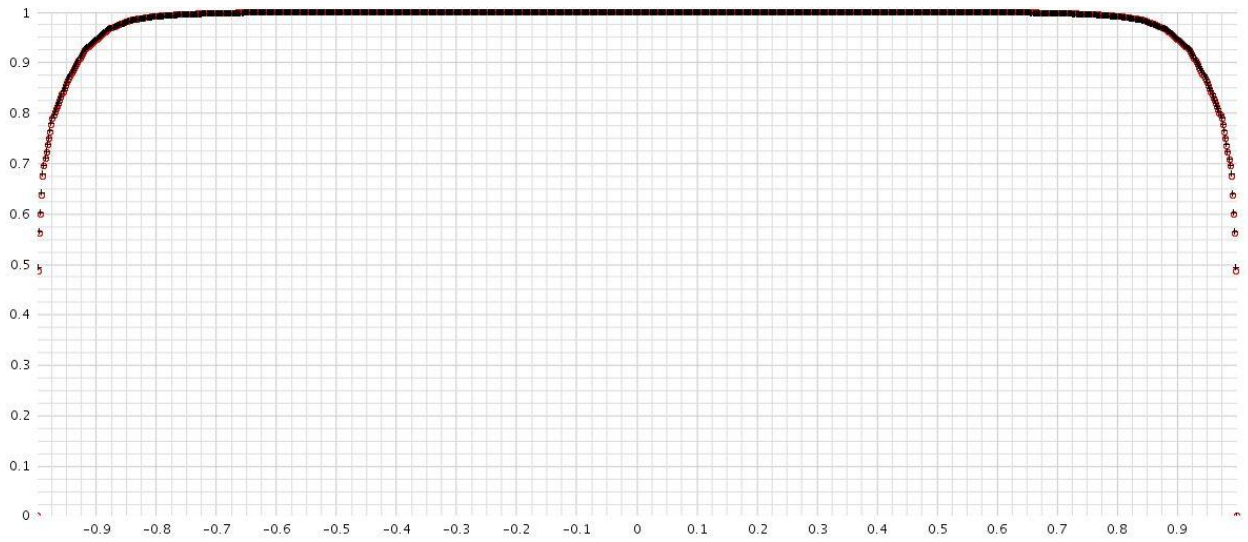


Рисунок 6. *Скалярное поле осевой скорости в расчетной области. Конфигурация 2 (разработано авторами)*



Красная кривая — конфигурация 1; черная кривая — конфигурация 2

Рисунок 7. *Профили скорости в сечении 1 (разработано авторами)*

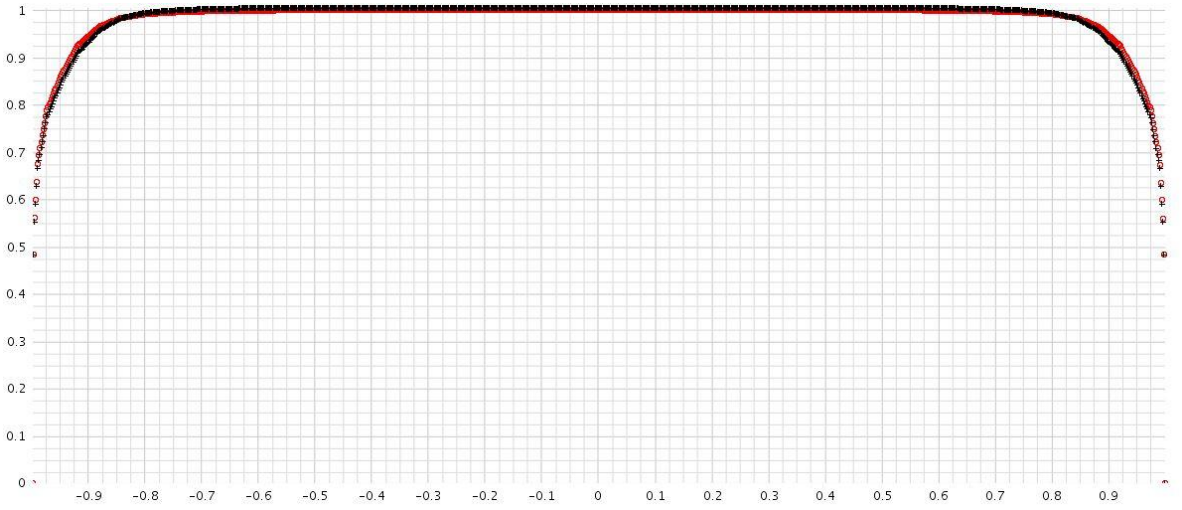
81SAVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Сравнение профилей осевой скорости в сечении 2 для двух конфигураций каналов показано на рисунке 8. В области ядра потока средняя относительная погрешность в значениях скорости составила 0,4 %, а в пристеночной области 7 %, а максимальная погрешность в пристеночной области достигает 16 %.

Красная кривая — конфигурация 1; черная кривая — конфигурация 2

Рисунок 8. *Профили скорости в сечении 2 (разработано авторами)*

Как видно из рисунка 8, наличие канала длиной один калибр после УЗПР, а также измерение скорости гребенкой внутри этого канала (вместо измерения скорости на срезе выходной кромки канала) существенно влияет на получаемый профиль скорости. Причем, как показано на рисунке 9, получаемый профиль скорости качественно и количественно (относительно расхождений, показанных на рисунке 4) более близок к профилю внутри УЗПР (сечение 1).



Красная кривая — сечение 1; черная кривая — сечение 2

Рисунок 9. *Профили скорости в сечениях 1 и 2. Конфигурация (разработано авторами)*

В области ядра потока средняя относительная погрешность в значениях скорости составила 0,5 %, а в пристеночной области 1,6 %. При этом максимальное значение относительной погрешности в пристеночной области не превышает 2 %. Но даже при использовании участка длиной один калибр после УЗПР при данной схеме измерения такое различие в форме профилей может привести к разнице между интегральным значением скорости в сечении 1 (показания узпр) и сечении 2 (контрольные измерения).

Заключение

Приведенные результаты показывают немаловажное значение выбора мест расположения гребенки для использования ее в роли эталонного измерителя скорости. Существенные различия в профилях скорости, которые «видит» гребенка и УЗПР будут являться источником дополнительной погрешности при проведении сличения. Показано, что такая погрешность может достигать 0,37 % в ядре потока, а в пристеночной области 9,95 %. При этом максимальное значение относительной погрешности в пристеночной области составляет 22 %. Увеличение дистанции между выходной кромкой канала и УЗПР всего на один калибр позволяет снизить эту погрешность в пристеночной области с 9,95 % до 1,6 %, а максимальное расхождение снизить с 22 % до 2 %. При этом увеличение дистанции на один калибр не приводит к существенным затруднениям в монтаже гребенки внутри канала. Необходимо отметить также и обязательное использование безотрывного входа в таких лабораторных исследованиях, поскольку отказ от профилирования входной кромки трубы приводит к возникновению отрывов в области всасывания потока из окружающей среды в канал. Такие отрывы могут неточно описываться моделями турбулентности и сказываться на общей точности вычислительного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moore, P.I. Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology / P.I. Moore, G.J. Brown, B.P. Stimpson — DOI 10.1088/0957-0233/11/12/321 // Measurement Science and Technology. — 2000. — Т 11, No. 12. — С. 1802–1811.
2. Tang, X. Data integration for multi-path ultrasonic flowmeter based on Levenberg–Marquardt algorithm / X. Tang, X. Xie, H. Zhang, H. Zhou — DOI 10.1049/iet-smt.2015.0060 // IET Science, Measurement & Technology. — 2016. — Т 10, № 5. — С. 507–518.
3. Алексеев, Д.П. О применении перфорированных дисковых вставок в круглой трубе для формирования газового потока необходимой структуры перед ультразвуковым расходомером / Д.П. Алексеев, А.С. Кубенин — DOI 10.15862/41SAVN424 // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16, № 4. — URL: https://esj.today/PDF/41SAVN424.pdf.
4. Mickan, B. Quantified comparison of the efficiency of new flow conditioners / B. Mickan, R. Kramer, G. Wendt, D. Dopheide // IMEKO TC9 Conference, Salvador, Brazil, 4–8 June, 2000. — URL: https://www.imeko.org/publications/tc9-2000/IMEKO-TC9-2000-009.pdf (дата обращения: 20.10.2025).
5. Кубенин, А.С. Об использовании конфузора для повышения точности ультразвукового расходомера / А.С. Кубенин, В.Г. Гагарин, Н.В. Павленко, Д.П. Алексеев — DOI 10.15862/09SAVN424 // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16, № 4. — URL: https://esj.today/PDF/09SAVN424.pdf.
6. Кубенин, А.С. О влиянии скорости газового потока на точность работы ультразвукового расходомера / А.С. Кубенин, Д.П. Алексеев — DOI 10.15862/66SAVN224 // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16, № 2. — URL: https://esj.today/PDF/66SAVN224.pdf.
7. Fang, L. Development of a high-precision and wide-range ultrasonic water meter / L. Fang, X. Ma, J. Zhao, Y. Faraj, Z. Wei, Y. Zhu — DOI 10.1016/j.flowmeasinst.2021.102118 // Flow Measurement and Instrumentation. — 2022. — Т 84. — С. 102118.

8. Пастушков, П.П. О величине шага по азимуту ветрового потока при аэродинамических исследованиях высотных зданий / П.П. Пастушков, А.А. Синявин, А.Ю. Чулюнин — DOI 10.31659/0044-4472-2024-6-49-52 // Жилищное строительство. — 2024. — № 6. — С. 49–52.

9. Гагарин, В.Г. О достоверности компьютерных прогнозов при определении ветровых воздействий на здания и комплексы / В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк, А.С. Кубенин // Жилищное строительство. — 2014. — № 7. — С. 3–8. — URL: https://istina.msu.ru/publications/article/6874345/ (дата обращения: 20.10.2025).

10. Божков, В.М. Определение профильного сопротивления с помощью интегрирующей гребенки / В.М. Божков, А.С. Мозольков // Ученые записки ЦАГИ. — 1972. — Т. 3, № 1. — С. 88–92. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_13086667_90784890.pdf (дата обращения: 20.10.2025).

Alekseev Dmitry Pavlovich
«SovTIGaz», Moscow, Russia
E-mail: alekseev210@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=687192

Kubenin Aleksandr Sergeevich
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia
E-mail: kube-n@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=935093

On some features of assessing the accuracy of ultrasonic flow meters

Abstract. In commercial gas metering, ultrasonic flow meters are widely used due to the absence of moving and gas-dynamically loaded elements, ensuring high reliability, durability, ease of maintenance and the accuracy of volume and mass flow measurement acceptable for the industry. Minimizing measurement uncertainties is critical for optimal use of resources. Flow meter characteristics are determined during tests on laboratory stands equipped with straight pipeline sections, flow straighteners and devices for forming fully/partially developed flows. Measuring combs are often used as reference means. However, the final thickness of the pipeline wall at the outlet edge can significantly affect the flow structure near the comb. The article presents the results of a study and analysis of the effect of the distance of the ultrasonic flow meters body outlet edge from the pipeline boundary on the flow inside it, especially in the areas of installation of measuring combs. Using the computational fluid dynamics method, scalar fields of flow parameters and velocity profiles in the ultrasonic flow meters cross-section were obtained. The separation and stagnation regions formed during flow past the flow meter on the test bench were identified. A significant influence of the outlet edge of the ultrasonic flow meters on the shape of the gas flow profile was established and the resulting error was quantitatively estimated. It was shown that the error in the flow core reaches 0,37 %, and in the near-wall region — 9,95 %, with a maximum relative deviation of up to 22 %. It was experimentally confirmed that increasing the distance between the outlet edge of the channel and the ultrasonic flow meters by just one caliber allows reducing the error in the near-wall region from 9,95 % to 1,6 %, and the maximum discrepancy — from 22 % to 2 %, which significantly improves the accuracy of commercial metering.

Keywords: gas supply; ultrasonic flow meter; computational gas dynamics; computer modeling; flow profile; measuring comb; laboratory stand