

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-265-274

Математическая модель расчёта расхода потока газа с применением ультразвукового расходомера

В.П. Гребнев, Н.Д. Абрамович, И.С. Максимович

ОАО «ММЗ имени С.И.Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО»,
ул. Макаёнка, 23, г. Минск 220114, Беларусь

Поступила 10.01.2025

Принята к печати 12.07.2025

Ультразвуковые расходомеры являются перспективным инструментом для контроля газовых потоков в бытовых и промышленных трубопроводах. Цель работы – разработка методологий расчёта расхода газа, а также разработка и анализ математической модели с использованием математического моделирования в пакете MATLAB для соосного расположения ультразвуковых преобразователей, в том числе анализ ограничений подхода. Основу исследования составила математическая модель с соосным расположением датчиков, описывающая распространение ультразвуковых волн в газовом потоке. Исходными параметрами выступили давление (5 Па и 8,5 кПа) и температура газа, рассчитываемыми – скорость потока, число Рейнольдса, время прохождения импульса по потоку и против него, разность указанных времён и итоговый расход газа. Моделирование проводилось в MATLAB с акцентом на методологию расчёта, но без учёта акустических помех и формы ультразвукового пучка (рассматривался только центральный луч). Разработанная методология позволяет проводить предварительные расчёты расхода газа и служит основой для дальнейшего совершенствования, включая учёт дополнительных физических факторов и адаптацию для угловой конфигурации датчиков. Ключевые ограничения математической модели: учёт звукового давления, шумов приёмной схемы и упрощенная модель волнового пучка. Тем не менее, модель подтвердила работоспособность для базовых сценариев.

Ключевые слова: ультразвуковой датчик, газовый расходомер, временной метод, доплеровский метод

Адрес для переписки:

Гребнев В.П.
ОАО «ММЗ имени С.И.Вавилова – управляющая компания
холдинга «БелОМО»,
ул. Макаёнка, 23, г. Минск 220114, Беларусь
e-mail: vadim.grebnev.vg@gmail.com

Для цитирования:

В.П. Гребнев, Н.Д. Абрамович, И.С. Максимович.
Математическая модель расчёта расхода потока газа
с применением ультразвукового расходомера.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 3. С. 265–274.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-265-274

Address for correspondence:

Grebnev V.P.
OJSC «MMW named after S.I. Vavilov – managing company
of BelOMO holding»,
Makaenka str., 23, Minsk 220114, Belarus
e-mail: vadim.grebnev.vg@gmail.com

For citation:

Grebnev VP, Abramovich ND, Maksimovich IS.
Mathematical Model for Calculating Gas Flow Using an Ultrasonic
Flow Meter.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(3):265–274. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-265-274

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-265-274

Mathematical Model for Calculating Gas Flow Using an Ultrasonic Flow Meter

V.P. Grebnev, N.D. Abramovich, I.S. Maksimovich

OJSC «MMW named after S.I. Vavilov – managing company of BelOMO holding»,
Makaenka str., 23, Minsk 220114, Belarus

Received 10.01.2025

Accepted for publication 12.07.2025

Abstract

Ultrasonic flow meters are promising tool for monitoring gas flows in domestic and industrial pipelines. The aim of this work was to develop methodologies for calculating gas flow rate, as well as to develop and analyze a mathematical model using simulation in the MATLAB package for a coaxial arrangement of ultrasonic transducers, including an analysis of limitations of this approach. The base of the study was a mathematical model with a coaxial sensor arrangement, describing the propagation of ultrasonic waves in a gas flow. Input parameters were gas pressure (5 Pa and 8.5 kPa) and temperature, while the calculated parameters were flow velocity, Reynolds number, pulse transit time along and opposite the flow, difference between these two time values, and the final flow rate. The simulation was performed in MATLAB with a focus on the calculation methodology although without accounting for acoustic interference and the ultrasonic beam shape (only the central beam's part was considered). The developed methodology allows for preliminary gas flow rate calculations and serves as a basis for further improvement including consideration of additional physical factors and adaptation for an angular transducer configuration. Key limitations of the mathematical model include: the omission of sound pressure, noise from the receiver circuit, and a simplified wave beam model. Nevertheless, the model confirmed its viability for basic scenarios.

Keywords: ultrasonic sensor, gas flowmeter, transit-time method, Doppler method

Адрес для переписки:

Гребнев В.П.
ОАО «ММЗ имени С.И.Вавилова – управляющая компания
холдинга «БелОМО»,
ул. Макаёнка, 23, г. Минск 220114, Беларусь
e-mail: vadim.grebnev.vg@gmail.com

Address for correspondence:

Grebnev V.P.
OJSC «MMW named after S.I. Vavilov – managing company
of BelOMO holding»,
Makaenka str., 23, Minsk 220114, Belarus
e-mail: vadim.grebnev.vg@gmail.com

Для цитирования:

В.П. Гребнев, Н.Д. Абрамович, И.С. Максимович.
Математическая модель расчёта расхода потока газа
с применением ультразвукового расходомера.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 3. С. 265–274.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-265-274

For citation:

Grebnev VP, Abramovich ND, Maksimovich IS.
Mathematical Model for Calculating Gas Flow Using an Ultrasonic
Flow Meter.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(3):265–274. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-265-274

Введение

Акустические расходомеры измеряют эффекты, возникающие при прохождении звуковых волн через поток газа или жидкости. Почти все они работают в ультразвуковом диапазоне [1]. Их делят на: временные (основаны на разнице времени прохождения волн по потоку и против него) и доплеровские (измеряют скорость газа на участке потока и могут использоваться для определения расхода) [2].

Принцип действия ультразвуковых расходомеров следует из распространения ультразвуковых колебаний в движущейся контролируемой среде. Скорость ультразвуковой волны в неподвижной системе координат (стенок трубопровода) равна векторной сумме скорости ультразвука относительно среды и скорости самой среды [3].

Ультразвуковой расходомер состоит из измерительного преобразователя (пьезоэлементы, звукопроводы и контролируемый участок

трубопровода) и электронной схемы (генератор высокочастотных колебаний, блоки измерения, визуализации и регистрации данных). Методы измерения разности волн: фазовый (анализ сдвига фаз между колебаниями по и против потока), импульсные (измерение разности времён распространения ультразвуковых импульсов), частотно-импульсные (анализ разности частот следования импульсов или пакетов колебаний). Ультразвуковые расходомеры классифицируются не только по типу измерительных схем, но и по типу расположения преобразователей: угловые (направление распространения ультразвуковых волн под углом к потоку) и осевые (направление распространения соосно с потоком). Угловые преобразователи дополнительно различаются по характеру распространения ультразвуковой волны: на схеме без преломления волны и с преломлением волны, что и представлено на рисунке 1а и 1b соответственно, а соосные представлены на рисунке 1с [4].

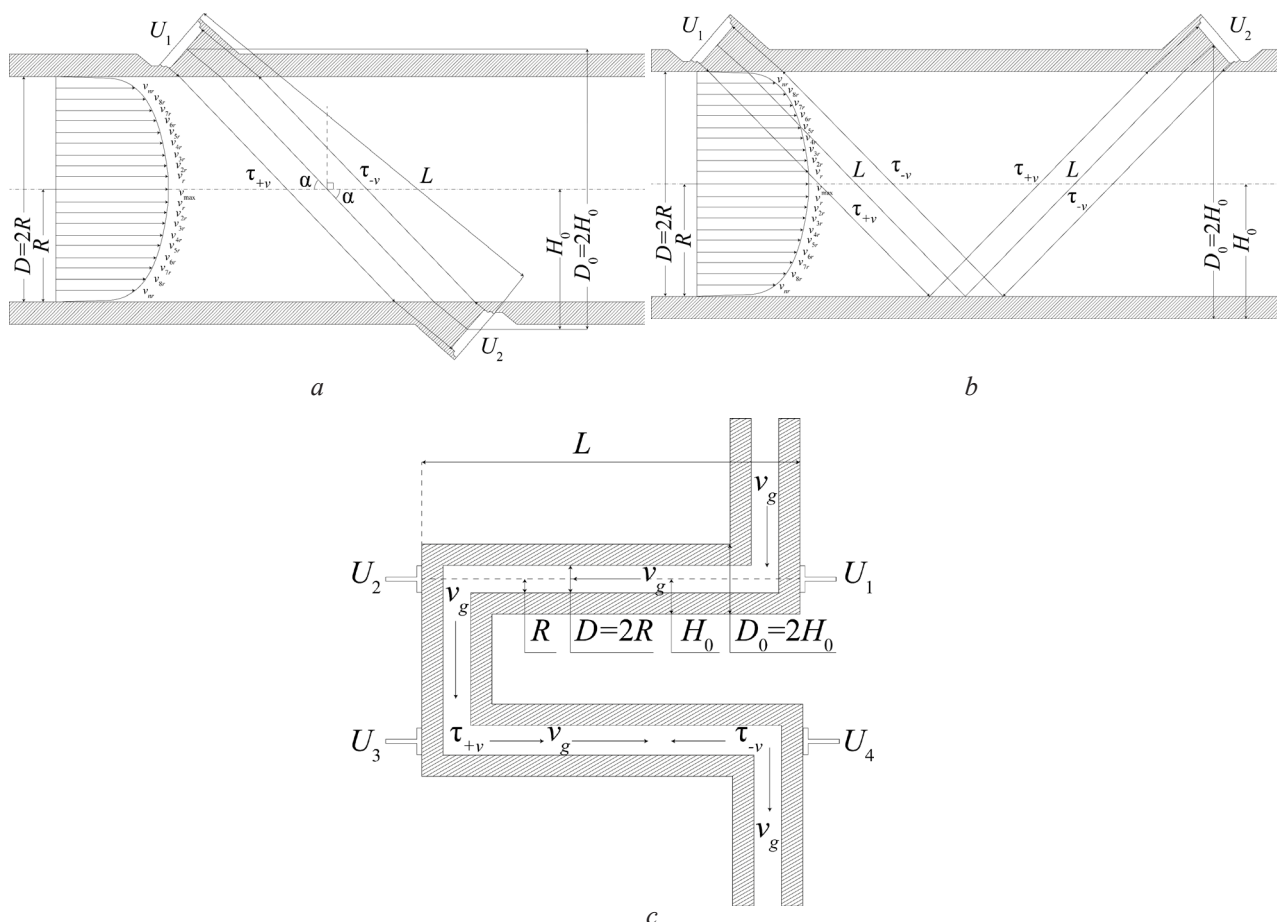


Рисунок 1 – Классификация ультразвуковых расходомеров

Figure 1 – Classification of Ultrasonic Flow Meters

Описание методологий расчёта расхода газа

Предположим, что ультразвуковые датчики установлены под углом к направлению потока газа в трубопроводе. На рисунке 2 показана схема их расположения, а также векторы скорости ультразвуковой волны и потока газа. Таким образом, время распространения сигнала по направлению потока от датчика U_1 до датчика U_2 можно выразить через соотношение (1):

$$\tau_{+v} = \frac{L}{(c + v_g \cdot \sin(\alpha))} + 2 \cdot \frac{H_0 - R}{(c \cdot \cos(\alpha))}; \quad (1)$$

где L – расстояние между датчиками U_1 и U_2 , м; c – скорость ультразвуковой волны, м/с; v_g – скорость потока газа, м/с; α – угол, составляемый центральным ультразвуковым лучом в трубопроводе и в контролируемой среде с нормалью поверхности; H_0 – радиус трубопровода, м; R – внутренний радиус трубопровода, м.

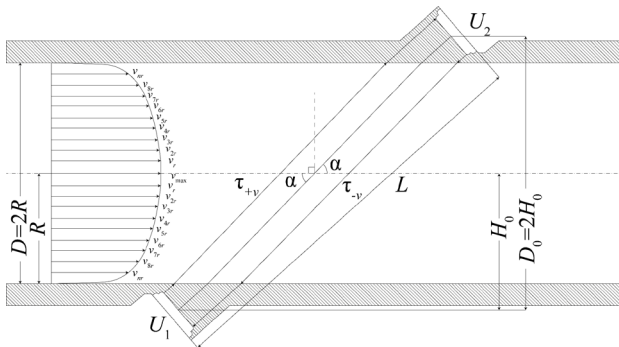


Рисунок 2 – Расположение ультразвуковых датчиков, расположенных под углом к направлению потока газа в трубопроводе

Figure 2 – Arrangement of ultrasonic sensors positioned at an angle to the direction of gas flow in the pipeline

Аналогично, если ультразвуковая волна распространяется в обратном направлении, то время распространения сигнала против направления потока от датчика U_2 до датчика U_1 можно выразить через соотношение (2):

$$\tau_{-v} = \frac{L}{(c - v_g \cdot \sin(\alpha))} + 2 \cdot \frac{H_0 - R}{(c \cdot \cos(\alpha))}. \quad (2)$$

Упростим выражения (1) и (2), исключив расчёт толщины трубопровода и на основе этих формул составим систему уравнений (3):

$$\begin{cases} \tau_{+v} = \frac{L}{(c + v_g \cdot \sin(\alpha))} \\ \tau_{-v} = \frac{L}{(c - v_g \cdot \sin(\alpha))} \end{cases}. \quad (3)$$

Выразив из системы (3) скорость потока газа, получим систему уравнений (4):

$$\begin{cases} v_g = \frac{L - \tau_{+v} \cdot c}{\tau_{+v} \cdot \sin(\alpha)} \\ v_g = \frac{\tau_{-v} \cdot c - L}{\tau_{-v} \cdot \sin(\alpha)} \end{cases}. \quad (4)$$

Проведя суммирование уравнений системы (4), получим уравнение (5):

$$\begin{aligned} v_g + v_g &= \frac{L - \tau_{+v} \cdot c}{\tau_{+v} \cdot \sin(\alpha)} + \frac{\tau_{-v} \cdot c - L}{\tau_{-v} \cdot \sin(\alpha)} = \\ &= \frac{\tau_{-v} \cdot (L - \tau_{+v} \cdot c) + \tau_{+v} \cdot (\tau_{-v} \cdot c - L)}{\tau_{+v} \cdot \tau_{-v} \cdot \sin(\alpha)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из полученного уравнения выведем соотношение (6):

$$v_g = \frac{L \cdot (\tau_{-v} - \tau_{+v})}{2 \cdot \tau_{+v} \cdot \tau_{-v} \cdot \sin(\alpha)}. \quad (6)$$

Выражение (6) интерпретируется, как «временной метод» («transit-time method»). Рассмотрим систему (3), которая представляет собой разность времён распространения ультразвукового импульса в обратном (τ_{-v}) и прямом (τ_{+v}) направлениях, т. е.:

$$\Delta\tau = \tau_{-v} - \tau_{+v} = \frac{L}{(c - v_g \cdot \sin(\alpha))} - \frac{L}{(c + v_g \cdot \sin(\alpha))}. \quad (7)$$

После упрощения (7) получается следующее выражение разности прохождения времени между ультразвуковыми преобразователями в выражении (8):

$$\Delta\tau = \frac{2 \cdot L \cdot v_g \cdot \sin(\alpha)}{c^2 - (v_g \cdot \sin(\alpha))^2}. \quad (8)$$

Преобразовав выражение (8) и выразив скорость потока газа, получим:

$$v_g = \frac{\sqrt{(c \cdot \Delta\tau \cdot \cos(\alpha))^2 + 4 \cdot R^2} - 2 \cdot R}{\Delta\tau \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)}. \quad (9)$$

Выражение (9) интерпретируется, как «Метод Доплера». Стоит отметить, что в публикации [5] $(v_g \cdot \sin(\alpha))^2$ упрощается так как

$c^2 \gg (v_g \cdot \sin(\alpha))^2$, но в соотношении (9) приводит-
ся уравнение без упрощений. На рисунке 3
представлен случай, при котором ультразвуко-
вые датчики соосны.

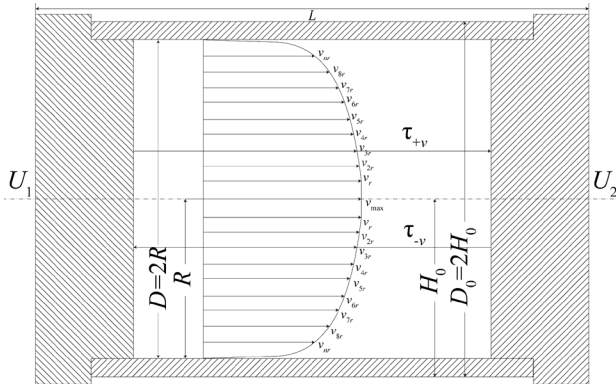


Рисунок 3 – Расположение ультразвуковых датчиков, соосных с направлением потока газа в трубопроводе

Figure 3 – Arrangement of ultrasonic sensors aligned co-axially with the direction of gas flow in the pipeline

Так как датчики расположены на одной оси, движение ультразвуковой волны будет от датчиков U_1 до U_2 , и от датчиков U_2 до U_1 , что и выражено соотношением (10) и (11) соответственно:

$$\tau_{+v} = \frac{L}{(c + v_g)} + 2 \cdot \frac{H_0 - R}{(c \cdot \cos(\alpha))}; \quad (10)$$

$$\tau_{-v} = \frac{L}{(c - v_g)} + 2 \cdot \frac{H_0 - R}{(c \cdot \cos(\alpha))}. \quad (11)$$

Исключив расчёт толщины трубопровода из (10) и (11), получим систему уравнений (12):

$$\begin{cases} \tau_{+v} = \frac{L}{(c + v_g)} \\ \tau_{-v} = \frac{L}{(c - v_g)} \end{cases}. \quad (12)$$

Выражая из уравнений (12) скорость газа, приходим к системе (13):

$$\begin{cases} v_g = \frac{L - \tau_{+v} \cdot c}{\tau_{+v}} \\ v_g = \frac{\tau_{-v} \cdot c - L}{\tau_{-v}} \end{cases}. \quad (13)$$

«Временной метод»

Просуммировав уравнения системы (13), получим уравнение (14):

$$\begin{aligned} v_g + v_g &= \frac{L - \tau_{+v} \cdot c}{\tau_{+v}} + \frac{\tau_{-v} \cdot c - L}{\tau_{-v}} = \\ &= \frac{\tau_{-v} \cdot (L - \tau_{+v} \cdot c) + \tau_{+v} \cdot (\tau_{-v} \cdot c - L)}{\tau_{+v} \cdot \tau_{-v}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Из полученного уравнения выведем соотношение (15):

$$v_g = \frac{L \cdot (\tau_{-v} - \tau_{+v})}{2 \cdot \tau_{+v} \cdot \tau_{-v}}. \quad (15)$$

«Метод Доплера»

Рассмотрим систему (13), которая представляет собой разность времён распространения ультразвукового импульса в обратном (τ_{-v}) и прямом (τ_{+v}) направлениях (16), и получим выражение (17):

$$\Delta\tau = \tau_{-v} - \tau_{+v} = \frac{L}{(c - v_g)} - \frac{L}{(c + v_g)} = \frac{2 \cdot L \cdot v_g}{c^2 - v_g^2}. \quad (16)$$

Преобразовав выражение (16) и выразив скорость потока газа, получим выражение (17), а для описания расхода газа воспользуемся формулой (18):

$$v_g = \frac{\sqrt{(c \cdot \Delta\tau)^2 + L^2} - L}{\Delta\tau}; \quad (17)$$

$$Q = S_A \cdot v_g, \quad (18)$$

где S_A – площадь поперечного сечения ($S_A = \pi R^2$), м².

Следовательно, при случаях установки ультразвуковых преобразователей под углом и соосности выражения расхода газа примут вид (19) и (20), соответственно:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \left(\sqrt{(c \cdot \Delta\tau \cdot \cos(\alpha))^2 + 4 \cdot R^2} - 2 \cdot R \right)}{\Delta\tau \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)}; \quad (19)$$

$$Q = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \left(\sqrt{(c \cdot \Delta\tau)^2 + L^2} - L \right)}{\Delta\tau}. \quad (20)$$

На рисунке 4 показано распределение скорости потока газа.

Распространение ультразвуковой волны вдоль потока будет соответствовать проекции скорости газа.

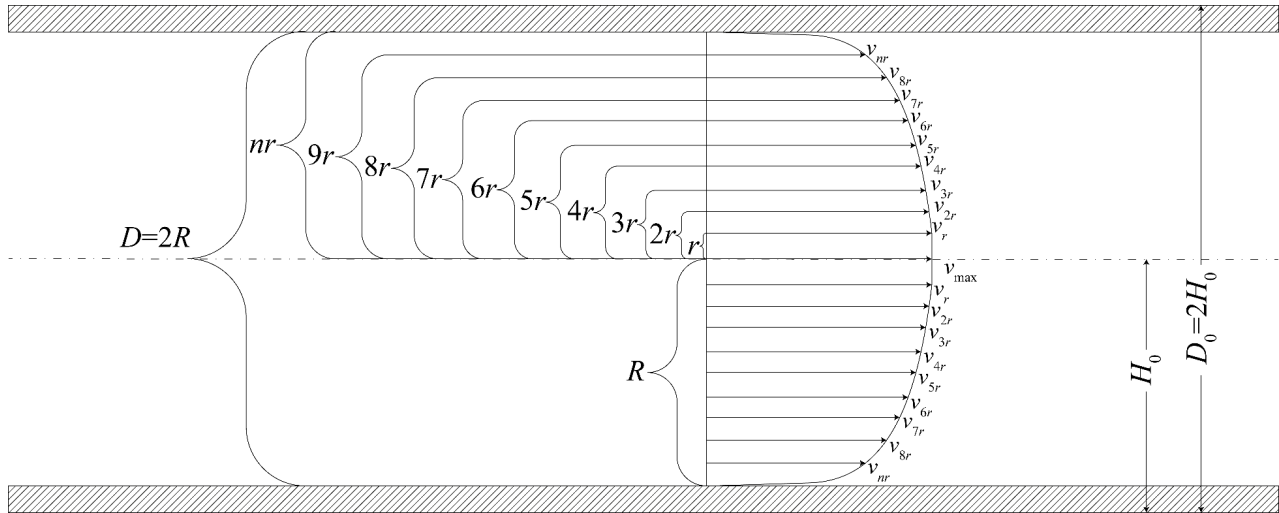


Рисунок 4 – Профиль распределение скорости потока газа

Figure 4 – Velocity profile of gas flow

Для упрощения вывода формул примем, что скорость потока газа будет равна $v_{\max}$, так как на центральной оси трубопровода ($r = 0$) скорость достигает максимального значения.

Ламинарный поток

В работе [6] упоминается, что профиль потока скорости газа при ламинарном режиме по диаметральному сечению трубопровода выражается соотношением:

$$v_r = v_{\max} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (21)$$

где v_r – скорость потока газа на расстоянии от центральной оси трубопровода, м/с.; $v_{\max}$ – скорость потока газа на центральной оси трубопровода, м/с; r – текущее расстояние от центра трубопровода до рассматриваемой точки, м.

Для определения средней скорости потока необходимо проинтегрировать уравнение (21) по площади поперечного сечения. Учитывая осевую симметрию профиля скоростей, в качестве элемента площади выбирается кольцо. После чего средняя скорость потока будет выражена соотношением (22) [4]:

$$\begin{aligned} \bar{v}_g &= \frac{v_{\max}}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^R \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr = \\ &= \frac{2 \cdot v_{\max}}{R^2} \cdot \left(\int_0^R r \cdot dr - \int_0^R \frac{r^3}{R^2} \cdot dr \right). \end{aligned} \quad (22)$$

В результате интегрирования (22), получим соотношение (23), что также называется уравнением Хагена–Пуазейля [6]:

$$\bar{v}_g = \frac{v_{\max}}{2}. \quad (23)$$

Средняя скорость потока вдоль ультразвуковой волны (24) определяется аналогичным образом:

$$v_g = \frac{v_{\max}}{R} \cdot \int_0^R \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \cdot r \cdot dr = \frac{v_{\max}}{R} \cdot \left(\int_0^R r \cdot dr - \int_0^R \frac{r^3}{R^2} \cdot dr \right). \quad (24)$$

В результате интегрирования (24), получим соотношение (25) [4]:

$$v_g = \frac{2 \cdot v_{\max}}{3}. \quad (25)$$

Преобразуем выражение (18) с учётом формул (23) и (25), что позволяет получить систему уравнений (26):

$$\begin{cases} Q = \pi \cdot R^2 \cdot \frac{2 \cdot v_{\max}}{3} \\ Q_L = \pi \cdot R^2 \cdot \frac{v_{\max}}{2} \end{cases}. \quad (26)$$

Упрощая систему уравнений (26), получим соотношение, которое связывает расход при ламинарном режиме с реальным расходом:

$$Q_L = \frac{3}{4} \cdot Q.$$

Турбулентный поток

При турбулентном режиме профиль скорости потока газа выражается соотношением (28) [7]:

$$v_r = v_{\max} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}}. \quad (28)$$

Для расчёта средней скорости потока проинтегрируем уравнение (28) по площади поперечного сечения. Применяя метод интегрирования, аналогичный использованному при выводе соотношения (22), получаем промежуточный результат (29) и окончательную формулу (30):

$$\overline{v_g} = \frac{v_{\max}}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^R \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr; \quad (29)$$

$$\overline{v_g} = \frac{2 \cdot n^2 \cdot v_{\max}}{(2n+1) \cdot (n+1)}. \quad (30)$$

Средняя скорость потока вдоль ультразвуковой волны определяется аналогичным образом:

$$v_g = \frac{v_{\max}}{R} \cdot \int_0^R \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot dr. \quad (31)$$

В результате интегрирования (31), получим соотношение:

$$v_g = \frac{n \cdot v_{\max}}{n+1}. \quad (32)$$

Преобразуем выражение (18) с учётом формул (30) и (32), что позволяет получить систему уравнений (33):

$$\begin{cases} Q = \pi \cdot R^2 \cdot \frac{n \cdot v_{\max}}{n+1} \\ Q_r = \pi \cdot R^2 \cdot \frac{2 \cdot n^2 \cdot v_{\max}}{(2n+1) \cdot (n+1)} \end{cases}. \quad (33)$$

Упрощая систему уравнений (33), получим соотношение, которое связывает расход при турбулентном режиме с реальным расходом:

$$Q_r = \frac{2n}{2n+1} \cdot Q. \quad (34)$$

Математическая модель расчёта расхода в пакете MATLAB

Математическая модель разработана на основе существующего типа расположения преобразователей при условии соосности ультразвуковых датчиков (рисунок 3). Расчёт

плотности газа и начальная оценка скорости потока газа выполнялись с использованием соотношений (35) и (36) соответственно:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_s}{T_g}; \quad (35)$$

$$\frac{v_g^2}{2} + \frac{\Delta p}{\rho} + gh = \text{const}, \quad (36)$$

где ρ_0 – плотность вещества, кг/м³; T_s – стандартная температура газа, К ($T_s = 273,15$ К); T_g – температура газа, К; Δp – разность между начальным и конечным давлением, Па; h – разность высот между рассматриваемым сечением трубопровода, м.

В качестве универсального критерия, позволяющего определить режим движения газа в различных случаях, применяется число (критерий) Рейнольдса, соотношение [8]:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_g \cdot D}{\mu}, \quad (37)$$

где D – диаметр трубопровода, м; μ – динамическая вязкость, Па·с.

В соответствии с двумя значениями критических чисел Рейнольдса (Re_c' (нижнее критическое число Рейнольдса) и Re_c'' (верхнее критическое число Рейнольдса)), можно выделить следующие режимы движения газа:

при $Re < Re_c'$ – ламинарный режим;

при $Re_c' < Re < Re_c''$ – переходной режим;

при $Re > Re_c''$ – турбулентный режим,

где $Re_c' = 2300$ независимо от рода жидкости и диаметра труб, среднее значение верхнего критического числа Рейнольдса при течении жидкости в прямой круглой трубе $Re_c'' > 10^4$. Расчёт скорости потока газа ламинарного режима течения выполнялся с использованием соотношения [9]:

$$v_g = \frac{\Delta p \cdot R^2}{8 \cdot \mu \cdot L}, \quad (38)$$

где L – длина трубопровода, м.

Расчёт скорости потока газа при переходном и турбулентном режиме течения выполнялся с использованием формулы Дарси–Вейсбаха:

$$v_g = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot D}{L \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (39)$$

где λ – коэффициент трения.

Расчёт коэффициента трения в ламинарном режиме производился по формуле Пуазейля (40);

в переходном режиме при диапазоне чисел Рейнольдса (41) в расчёт была принята формула Альтшуля (42), а при диапазоне критерия Рейнольдса (43) использовалась формула Шифринсона (44) [6]; в турбулентном режиме использовалась формула Блазиуса (45), а при диапазоне чисел Рейнольдса $Re > 10^5$, коэффициент трения определяется формулой Никурадзе (46) [10]:

$$\lambda_P = \frac{64}{Re}; \quad (40)$$

$$20 \cdot \frac{D}{\Delta_E} < Re < 500 \cdot \frac{D}{\Delta_E}; \quad (41)$$

$$\lambda_A = 0.11 \cdot \left(\frac{\Delta_E}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}; \quad (42)$$

$$Re > 500 \cdot \frac{D}{\Delta_E}; \quad (43)$$

$$\lambda_S = 0.11 \cdot \left(\frac{\Delta_E}{D} \right)^{0.25}; \quad (44)$$

$$\lambda_B = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}; \quad (45)$$

$$\lambda_N = 0.0032 + \frac{0.3164}{Re^{0.237}}; \quad (46)$$

где Δ_E – эквивалентная шероховатость внутренней поверхности трубопровода, мм.

После определения скорости потока газа для соответствующего режима течения выполнялась повторная итерация для уточнения числа (критерия) Рейнольдса.

Скорость ультразвуковой волны рассчитывалась по формуле (47):

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot Ru \cdot T_g}{Mr}}, \quad (47)$$

где γ – адиабатическая постоянная; Ru – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К) ($Ru = 8.314$ Дж/(моль·К)); Mr – молекулярная масса.

Распространение ультразвуковых колебаний в среде описывается волновым уравнением (48):

$$A = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot [t - \varphi_0]). \quad (48)$$

При этом наблюдается два основных эффекта: экспоненциальное затухание амплитуды входного сигнала, описываемое формулой (49); преобразование формы сигнала, в результате чего выходной сигнал (формула 50) демонстрирует распределение, описанное выражением (51):

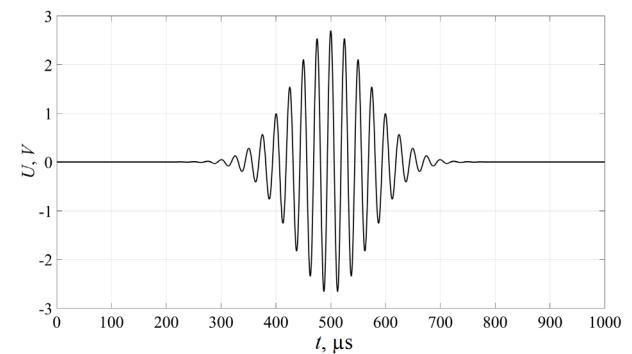
$$A_{in} = A \cdot e^{-\frac{(t-\varphi_0)^2}{2}}; \quad (49)$$

$$B = b \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot [t - \varphi_0]);$$

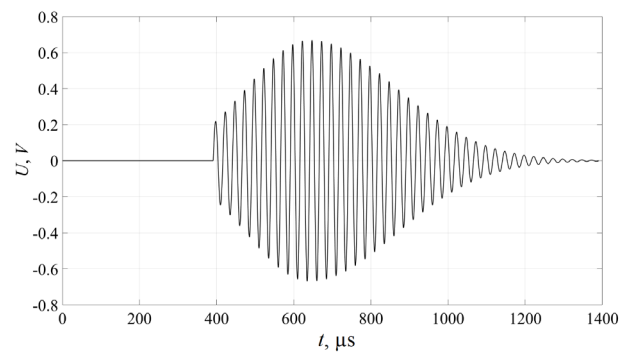
$$A_{out} = B \cdot (e^{-\beta t} - e^{-\epsilon t}),$$

где a – амплитуда входного сигнала, В; f – частота преобразователя, Гц; t – вектор времени, с; φ_0 – начальная фаза колебаний, с; A – сигнал с учётом затухания; b – амплитуда выходного сигнала, В; β, ϵ – параметры затухания, с⁻¹.

Распространение ультразвуковых волн с учётом затухания для входного и выходного сигналов продемонстрировано на рисунке 5, a и b соответственно, что согласуется с данными, опубликованными в работах [11, 12]. Кроме того, при распространении ультразвука наблюдается значительное снижение амплитуды выходного сигнала (0,67 В) по сравнению с входным (2,7 В).



a



b

Рисунок 5 – Распространение ультразвуковой волны с учётом затухания: *a* – входной сигнал; *b* – выходной сигнал

Figure 5 – Ultrasonic wave propagation with attenuation accounted for: *a* – input signal; *b* – output signal

Моделирование процесса прохождения газа через трубопровод проводилось для двух значений перепада давления при постоянной температуре. В таблице приведены исходные и

рассчитываемые параметры для моделирования работы ультразвукового расходомера.

На рисунке 6а показан профиль скорости газа для ламинарного режима течения ($\Delta p = 5$, Па), на рисунке 6б – для турбулентного

($\Delta p = 8.5 \cdot 10^3$, Па); временные диаграммы напряжений представлены на рисунках 7а и 7б для ламинарного режима течения ($\Delta p = 5$, Па) и для турбулентного ($\Delta p = 8.5 \cdot 10^3$, Па) соответственно.

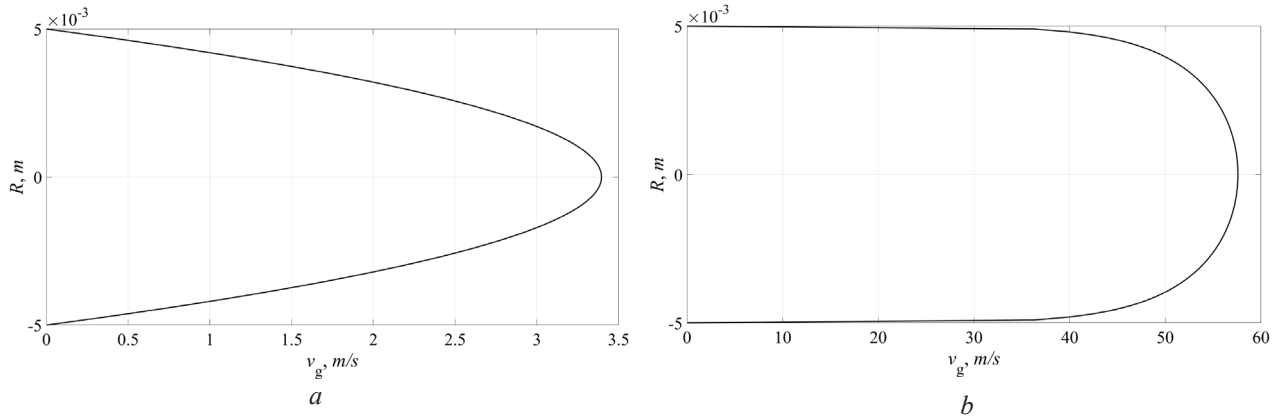


Рисунок 6 – Профиль распределение скорости потока газа: а – ламинарный режим ($\Delta p = 5$, Па); б – турбулентный режим ($\Delta p = 8.5 \cdot 10^3$, Па)

Figure 6 – Gas flow velocity distribution profile: а – laminar flow ($\Delta p = 5$, Pa); б – turbulent flow ($\Delta p = 8.5 \cdot 10^3$, Pa)

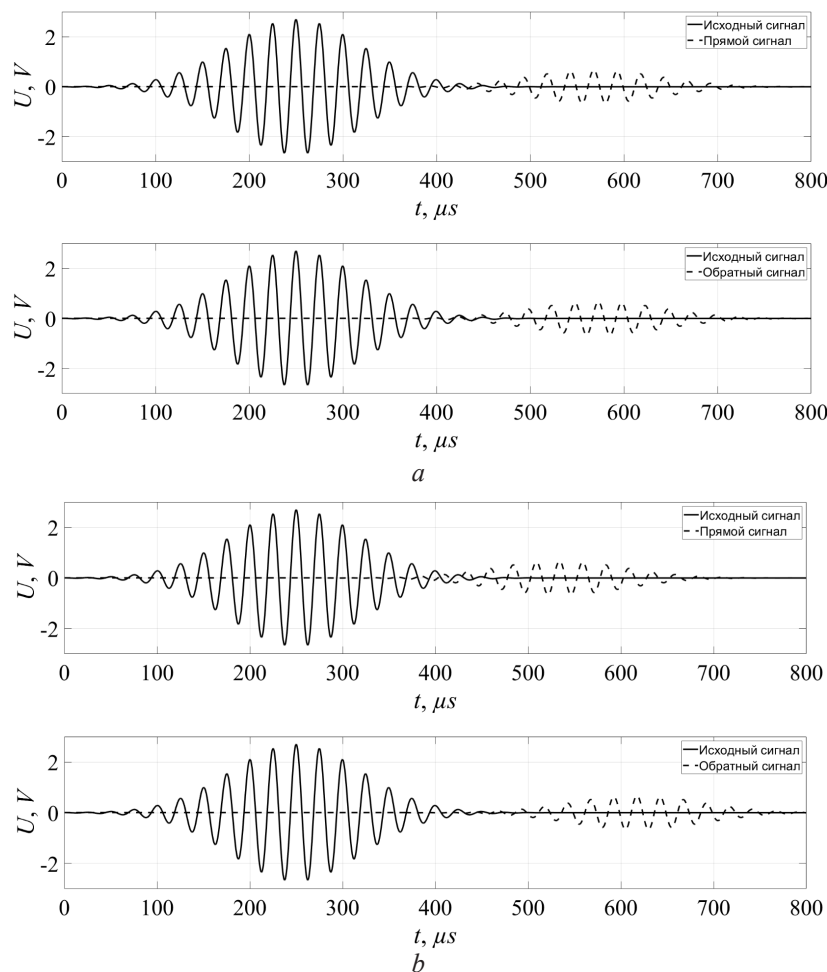


Рисунок 7 – Временная диаграмма напряжений: а – ламинарный режим ($\Delta p = 5$, Па); б – турбулентный режим ($\Delta p = 8.5 \cdot 10^3$, Па)

Figure 7 – Voltage timing diagram: а – laminar flow ($\Delta p = 5$, Pa); б – turbulent flow ($\Delta p = 8.5 \cdot 10^3$, Pa)

Таблица / Table

Исходные и рассчитываемые параметры для моделирования работы ультразвукового расходомера

Initial and calculated parameters for simulating the ultrasonic flow meter operation

Входные параметры / Input parameters			Выходные параметры / Output parameters				
Δp , Pa	T_g , K	v_g , m/s	Re	τ_{+v} , μs	τ_{-v} , μs	$\Delta \tau$, μs	Q , m ³ /h
5	300	3.4	2016	317.953	322.794	4.841	0.72
$8.5 \cdot 10^3$		57.59	34179	283.972	367.431	83.458	4.07

Математическая модель не учитывала следующие факторы: силу и давление звука; помехи (шумы), возникающие в схеме приёма сигнала; также рассматривался один центральный луч ультразвуковой волны вместо широкого пучка.

Заключение

В ходе разработки математической модели расчёта расхода газа с использованием ультразвукового расходомера предложены две методологии (для углового и соосного расположения преобразователей); численное моделирование в MATLAB проведено для соосной конфигурации датчиков. Основное внимание уделено расчётному алгоритму определения расхода.

Исходными параметрами модели были давление и температура газа, рассчитываемыми параметрами – скорость потока газа, число (критерий) Рейнольдса, время прохождения ультразвукового импульса по потоку и против потока, разность этих времён и расход газа. Моделирование процесса проводилось при разности давлений 5 Па и 8.5 кПа.

Несмотря на полученные результаты, следует отметить, что модель имеет ряд ограничений. В частности, не учитывались сила и давление звука; помехи (шумы), возникающие в схеме приёма сигнала; а также рассматривался только один центральный луч ультразвуковой волны вместо широкого пучка. Результаты исследования имеют практическую значимость для разработки и расчёта скорости ультразвуковых газовых расходомеров.

References /

Список использованных источников

1. Jacobson S. New developments in ultrasonic gas analysis and flowmetering. IEEE, 2008;508-516.
DOI: 10.1109/ULTSYM.2008.0124

2. Conrad K, Lynnworth L. Fundamentals of ultrasonic flow meters. American School of Gas Measurement Technology. 2002;1:53-54.

3. Rajita G, Mandal N. Review on transit time ultrasonic flowmeter. IEEE, 2016;88-92.
DOI: 10.1109/CIEC.2016.7513740

4. Lynnworth LC. Ultrasonic measurements for process control: theory, techniques, applications. Academic press. 2013;694.

5. Zhang H, Guo C, Lin J. Effects of velocity profiles on measuring accuracy of transit-time ultrasonic flowmeter. Applied Sciences. 2019;9(8):1648.
DOI: 10.3390/app9081648

6. Качанов И.В. Механика жидкости и газа: курс лекций: в 4 ч. / И.В. Качанов, В.В. Кулебякин, В.К. Недбалский. – Минск: БНТУ, 2012. – Ч. 3. – 56 с.

6. Kachanov IV, Kulebyakin VV, Nedbalsky VK. Fluid and Gas Mechanics: Lecture Course: in 4 Parts. Minsk: BNTU, 2012;3:56 p.

7. Mandard E. [et al.]. Transit Time Ultrasonic Flowmeter: Velocity Profile Estimation. Proc. IEEE Ultrason. Symp. 2005;763-766.
DOI: 10.1109/ULTSYM.2005.1602963

8. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. / Л.Д. Ландау, Лифшиц Е.М. – 5-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 736 с.

8. Landau LD, Lifshitz EM. Theoretical Physics: Textbook for Universities. In 10 Volumes. Vol. VI: Fluid Mechanics. 5th Edition, Stereo. Moscow: FIZMATLIT, 2001;736.

9. White FM. [et al.]. Fluid Mechanics. McGraw-Hill. 2011;862.

10. Ovsyannikov MK, Orlova EG, Yemelyanov PS. Fundamentals of Hydromechanics. Moscow: RConsult. 2003.

11. Willatzen M. [et al.]. Arrival-time detection and ultrasonic flow-meter applications. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2006;52(1):58.
DOI: 10.1088/1742-6596/52/1/006

12. Ma Jie [et al.]. Applications of digital signal processing methods in TOF calculation of ultrasonic gas flowmeter. Flow Measurement and Instrumentation. 2021;79. **DOI:** 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101932