



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 320–327

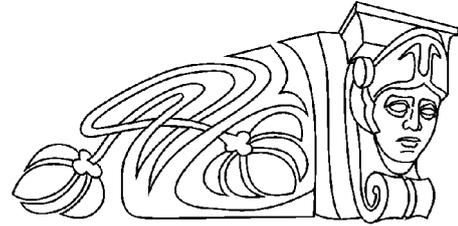
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2022, vol. 22, iss. 4, pp. 320–327

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-4-320-327>, EDN: UVEZON

Научная статья
УДК 532.57.08

Моделирование турбулентного режима течения газа



А. Л. Хвалин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Хвалин Александр Львович, доктор технических наук, профессор кафедры общей, теоретической и компьютерной физики, Khvalin63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4746-469X>

Аннотация. Проанализированы физические процессы, происходящие в турбулентном потоке. В поперечном сечении трубопровода выделены характерные области: ядро турбулентного потока и ламинарный пристеночный слой. Для моделирования распределения скорости в ядре потока использован степенной закон, в пристеночной области – линейный закон изменения модуля вектора скорости. Показатель степени определяется в зависимости от значения числа Рейнольдса, алгоритм приведен. Используемый подход не требует значительных вычислительных затрат в отличие от ряда известных сеточных методов на основе системы дифференциальных уравнений Навье – Стокса.

На основе анализа физических процессов предложен способ математического моделирования турбулентного режима течения газа в круглой трубе в виде достаточно простых инженерных формул. Геометрический вид трехмерного годографа скорости представляет собой комбинацию из круглого усеченного конуса и фигуры вращения, образованной на основе степенной функции. Определена граница пристеночной области на основе числа Рейнольдса, получена инженерная формула.

Приведены результаты расчетов, в графическом виде представлены двумерные профили скорости для ряда значений скоростей. Анализ результатов позволяет определить границы применимости модели. Так, при различиях значений модулей скорости на оси трубопровода и вблизи стенки более 20%, т. е. при числах Рейнольдса ниже 8000, годограф скорости претерпевает излом в верхушечной области. Графический вид годографа скорости приближается к параболическому, что соответствует ламинарному режиму течения газа и описывается законом Пуазейля.

Ключевые слова: ламинарный и турбулентный режимы течения газа, уравнения Навье – Стокса, число Рейнольдса, вязкость газа (жидкости), годограф скорости, объемный расход газа

Для цитирования: Хвалин А. Л. Моделирование турбулентного режима течения газа // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 320–327. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-4-320-327>, EDN: UVEZON

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Simulation of turbulent gas flow

A. L. Khvalin

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Aleksander L. Khvalin, Khvalin63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4746-469X>

Abstract. Background and Objectives: The purpose of the study carried out in the article is to obtain analytical expressions for calculating the gas (liquid) flow rate in the turbulent gas (liquid) flow regime. A method is presented for the mathematical description of a three-dimensional profile (hodograph) of the flow velocity in a turbulent flow regime based on two known velocity values in the pipeline cross section. The article analyzes the physical processes occurring in the turbulent flow. In the cross section of the pipeline, characteristic areas are distinguished: the core of the turbulent flow and the laminar near-wall layer. **Materials and Methods:** To simulate the velocity distribution in the core of the flow, a power law was used, in the near-wall region, a linear law of change in the modulus of the velocity vector. The exponent is determined depending on the value of the Reynolds number, the algorithm is given. The approach used does not require significant computational costs, in contrast to a number of well-known grid methods based on the Navier–Stokes system of differential equations. **Results:** Based on the analysis of physical processes, a method for mathematical modeling of the turbulent gas flow in a round pipe has been proposed in the form of fairly simple engineering formulas. The geometric view of the three-dimensional velocity hodograph is a combination of a round truncated cone and a figure of rotation formed on the basis of a power function. The boundary of the near-wall region has been determined on the basis of the Reynolds number, and an engineering formula has been obtained. The results of calculations have been presented; two-dimensional velocity profiles have been plotted for a number of velocity values. **Conclusions:** Analysis of the results allows us to determine the limits of applicability of the model. So, with



significant deviations of the velocity modules on the axis of the pipeline and near the wall, i.e. as the Reynolds number decreases, the velocity hodograph undergoes a kink in the apex region. This is explained by the approach of the gas flow to the laminar flow regime and the need to use a parabolic velocity profile according to the Poiseuille law.

Keywords: laminar and turbulent gas flow regimes, Navier–Stokes equations, Reynolds number, gas (liquid) viscosity, velocity hodograph, gas volume flow

For citation: Khvalin A. L. Simulation of turbulent gas flow. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 4, pp. 320–327 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-4-320-327>, EDN: UVEZON

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

Введение

Значительное число практических задач аэро- и гидродинамики связано с необходимостью определения объемного расхода текучих сред (газа, жидкости) [1–3]. Далее будем использовать термин «газ», подразумевая при этом аналогии в математическом описании течения газа и жидкости, обладающих вязкостью. Сложности вычисления объемного расхода вызваны изменением скорости потока движущейся среды в поперечном сечении трубопровода от его оси к стенке.

В зависимости от скорости течения вязкой текучей среды в круглом трубопроводе различают следующие режимы течения: устойчивое ламинарное, ламинарное с элементами турбулентности, устойчивое турбулентное. Для строгого математического описания всех видов течения газа в качестве базовых уравнений используются дифференциальные уравнения Навье – Стокса [1].

До недавнего времени математическое моделирование с использованием уравнений Навье – Стокса сдерживалось ограниченными возможностями вычислительной техники, связанными с необходимостью выполнения трудоемких вычислений с построением сеток в расчетной области и численными методами решения уравнений [4–6]. С увеличением производительности компьютерной техники вычислительные ограничения во многом снимаются [7, 8], и в настоящее время для научных применений часто используется строгая постановка задачи. Решение уравнений Навье – Стокса требует значительных вычислительных затрат, поэтому на практике расчеты предпочтительно проводить на основе более простых формул [9–11]. В статье представлены результаты математического моделирования турбулентного режима течения газа в круглой трубе, не требующие значительных вычислительных затрат.

Математическое описание ламинарного режима течения использует известную формулу

Пуазейля. Так, двумерное распределение вектора скорости потока (годограф, профиль скорости) в поперечном сечении круглого трубопровода в установившемся ламинарном режиме имеет параболический вид [1]. Трехмерный профиль скорости получается путем вращения двумерного годографа относительно оси симметрии трубопровода и представляет собой параболоид вращения. Известное выражение для объема параболоида позволяет получить расход газа (объем в единицу времени) через поперечное сечение трубопровода.

Необходимо отметить, что ламинарный режим течения газа на практике реализуется достаточно сложно [12, 13]. Например, используются формирователи потока, регулярные отрезки трубопровода, имеющие длины от пяти до десяти диаметров трубопровода. Кроме того, необходимо учитывать максимальную скорость потока, шероховатость стенок трубопровода и прочие факторы.

По сравнению с ламинарным, моделирование турбулентного режима течения газа существенно сложнее в связи с необходимостью учета возникающих физических процессов и невозможностью их описания с помощью аналитических выражений [14–16].

В большинстве известных публикаций объемный расход газа определяется путем умножения полученного значения средней скорости потока на площадь поперечного сечения трубопровода [1, 17, 18]. При этом основной вклад в погрешность вычисления объемного расхода вносится при усреднении скорости потока, поскольку распределение скорости в поперечном сечении трубопровода имеет нелинейный характер. Очевидно, что при увеличении максимального значения скорости потока погрешность измерений будет расти вследствие увеличения диапазона изменения скоростей в пределах поперечного сечения трубопровода.

На основании изложенного представляется следующий подход к моделированию турбулентного режима течения газа. Необходимо разбить



поперечное сечение трубопровода на участке, допускающие описание годографа скорости на основе кусочно-непрерывных функций [1, 4]. Затем строится трехмерный годограф скорости, объем которого представляет собой расход газа в единицу времени.

1. Математическая модель турбулентного режима течения

В качестве критерия оценки режима течения газа используется число Рейнольдса. Для круглого трубопровода число Рейнольдса определяется выражением [1, 2]:

$$Re = \frac{\rho \vartheta DN}{\eta},$$

где ρ – плотность газа; ϑ – максимальная скорость течения; DN – диаметр трубопровода; η – динамическая вязкость газа.

Режимы течения газа соответствуют следующим диапазонам чисел Рейнольдса: для $Re \leq 2300$ – устойчивый ламинарный, для $2300 \leq Re \leq 10000$ – ламинарный с элементами турбулентности, для $Re > 10000$ – устойчивый турбулентный.

На рис.1 показаны результаты расчета пограничных значений чисел Рейнольдса для случая круглого трубопровода и ρ -плотности газа (метана) при нормальных условиях.

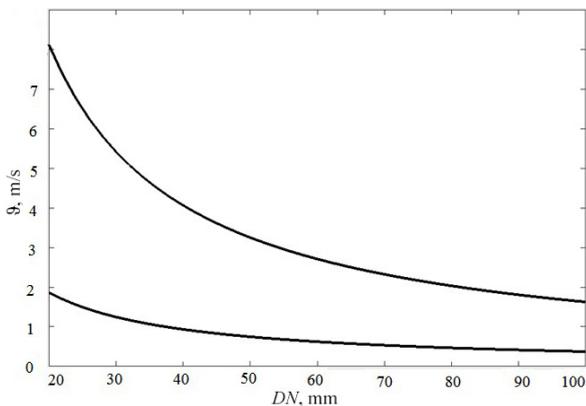


Рис.1 Режимы течения газа в круглой трубе
Fig.1 Gas flow regimes in a round pipe

По оси абсцисс показаны значения диаметра трубопровода (DN , мм), по оси ординат – максимальная скорость течения потока газа (ϑ , м/с) на оси трубопровода. Нижняя кривая соответствует значению числа Рейнольдса $Re = 2300$, верхняя – значению $Re = 10000$. Таким образом, область графика ниже нижней кривой соответствует устойчивому ламинарному режиму течения газа, область между кривыми – ламинарному

с элементами турбулентности, а выше верхней кривой – устойчивому турбулентному.

По графику, представленному на рис. 1, можно определить режим течения газа (метана) при нормальных условиях по значениям диаметра трубопровода (DN , мм) и максимальной скорости течения потока газа (ϑ , м/с) на оси трубопровода.

Из рис. 1 также видно, что при фиксированном значении диаметра трубопровода DN ламинарный режим течения газа устанавливается в области малых значений максимальной скорости течения потока газа ϑ в трубопроводе. С увеличением скорости течения газа число Рейнольдса растет, ламинарный режим течения газа искажается, и годограф скорости в поперечном сечении трубопровода претерпевает изменения. Параболическая зависимость нарушается вследствие появления завихренностей в потоке газа. Для турбулентного течения экспериментально наблюдается распределение скоростей, при котором практически во всем поперечном сечении (в ядре потока) скорость мало изменяется, а в непосредственной близости к стенке трубопровода возникает ламинарный подслой, в котором вследствие вязкости среды происходит уменьшение скорости до нуля на стенке трубопровода. Попытка построения аналитического решения затрудняется физической сложностью процесса. Хотя уравнения Навье – Стокса справедливы и для турбулентного случая, но инженерное решение следует искать в классе не непрерывных, а кусочно-непрерывных функций [1, 4, 19, 20].

Очевидно, что границы непрерывных областей определяются размерами ядра потока и ламинарного подслоя [1, 21–23]. Определим математический вид годографа скорости в непрерывных областях турбулентного потока.

Полагаем, что в результате практических измерений, либо теоретических оценок известны значения скоростей потока: ϑ_1 – на оси трубопровода (точка 1) и ϑ_2 – в точке 2, отстоящей от оси на некотором расстоянии (рис. 2). Известно, что область ядра турбулентного потока математически описывается логарифмическим, либо степенным законом с показателем n [24, 25]. Найдем n в нашем случае. Зависимость скорости потока от расстояния до оси трубопровода дается выражением из [2]:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 \left(\frac{y}{r_0} \right)^n, \quad (1)$$



где y – расстояние от стенки трубопровода до точки, в которой известна скорость ϑ_2 , $r_0 = \frac{DN}{2}$ – радиус трубопровода.

Без потери общности рассуждений будем полагать, что расстояние y равно половине радиуса трубопровода. Тогда из (1) $\vartheta_2 = \vartheta_1 \left(\frac{1}{2}\right)^n$. Следовательно, $n = \frac{\ln(\vartheta_1/\vartheta_2)}{\ln 2}$. Найдем толщину ламинарного подслоя, прилегающего к стенке, в соответствии с выражением, представленным в [2]:

$$\delta = 132.25 \frac{\eta}{\rho \Delta \vartheta} = \sqrt[n+1]{132.25 \frac{\eta (DN/2)^n}{\rho \vartheta_1}}, \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость газа; ρ – плотность газа; $\Delta \vartheta$ – изменение скорости течения в пределах ламинарного подслоя; ϑ_1 – скорость потока на оси трубопровода; $n = \frac{\ln(\vartheta_1/\vartheta_2)}{\ln 2}$ – показатель степени.

Таким образом, распределение скорости в ядре турбулентного потока определяется выражением

$$\vartheta(r) = \vartheta_1 \left(\frac{|r-r_0|}{r_0} \right)^n, \quad (3)$$

где $\vartheta(r)$ – соответствующее значение скорости потока, r – текущий радиус точки наблюдения в поперечном сечении трубопровода и изменяется в пределах от 0 до $(r_0 - \delta)$, $r_0 = DN/2$ – радиус трубопровода.

Вторая область турбулентного потока моделируется следующим образом. Известно, что в пристеночном пограничном слое создается ламинарный режим течения газа с логарифмическим законом распределения скоростей [2]. Ввиду того, что на практике толщина ламинарного слоя δ при значениях числа Рейнольдса $Re > 10000$ составляет не более 1.5%, при моделировании пристеночного слоя практически без потери точности можно заменить логарифмический закон изменения линейным. Полагаем, что в ламинарном слое скорость потока изменяется от соответствующего значения скорости на границе ламинарного подслоя $\vartheta(\delta)$ до 0, т. е. $\Delta \vartheta = \vartheta(\delta)$. Таким образом, по известным двум точкам в координатах (r, ϑ) можно построить отрезок прямой линии.

Известны координаты двух различных точек на границах ламинарного подслоя $(x_1 = (r_0 - \delta); y_1 = \vartheta(\delta))$, $(x_2 = r_0; y_2 = 0)$. Тогда коэффициенты прямой линии

$$y = -\frac{a_0 \times x + c_0}{b_0},$$

проходящей через эти точки, могут быть найдены следующим образом:

$$a_0 = y_1 - y_2, \quad b_0 = x_2 - x_1, \quad c_0 = x_1 \times y_2 - x_2 \times y_1.$$

Следовательно, двумерный годограф скорости представляет собой участок степенной функции для области ядра потока и отрезки прямых линий в пристеночных областях. Трехмерная картина профиля скорости, показанная на рис. 2, получена путем азимутального вращения двумерного годографа скорости (определяемого выражениями (2) и (3)) относительно оси трубопровода и представляет собой объединение двух фигур вращения, полученных из двумерной картины. Фигура I – круглый усеченный конус, фигура II – результат вращения степенной функции (3).

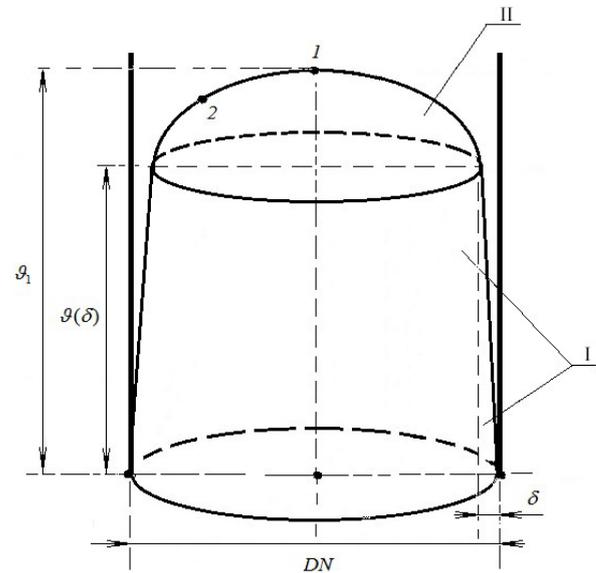


Рис. 2. Трехмерный годограф скорости для турбулентного режима течения газа

Fig. 2. Three-dimensional velocity hodograph for a turbulent gas flow

Для определения расхода газа через поперечное сечение трубопровода необходимо найти суммарный объем фигур I и II. Выражение для объема усеченного конуса I известно, вычисление объема фигуры II может быть проведено путем интегрирования.

Расход газа в единицу времени определяется следующим выражением:

$$Q = \frac{2\pi \vartheta_1}{r_0^n} \left[\frac{r_0^{n+2}}{(n+1)(n+2)} + \delta^{n+1} \left(\frac{\delta}{n+2} - \frac{r_0}{n+1} \right) \right] + \frac{\pi \delta}{3} (r_0 - 2\delta) \vartheta(\delta).$$



2. Результаты моделирования

На рис. 3, а–г представлены результаты моделирования двухмерного годографа скорости в трубопроводе $DN = 80$ мм по представленному алгоритму для различных параметров потока газа, где r – текущее значение расстояния от оси симметрии трубопровода.

В таблице представлены численные значения необходимых расчетных параметров потока газа.

Полученные годографы скоростей для значений чисел Рейнольдса $Re \geq 10000$ (см. рис. 3, а и рис. 3, б) имеют вид, аналогичный известным эпюрам распределения скоростей в опытах И. Никурадзе, описанных в [1, 2] для гидравлически гладких труб.

Необходимо отметить, что при переходе в область неустойчивого турбулентного течения газа в диапазоне чисел Рейнольдса $2300 \leq Re \leq 10000$ годограф скорости визуально приобретает близ-

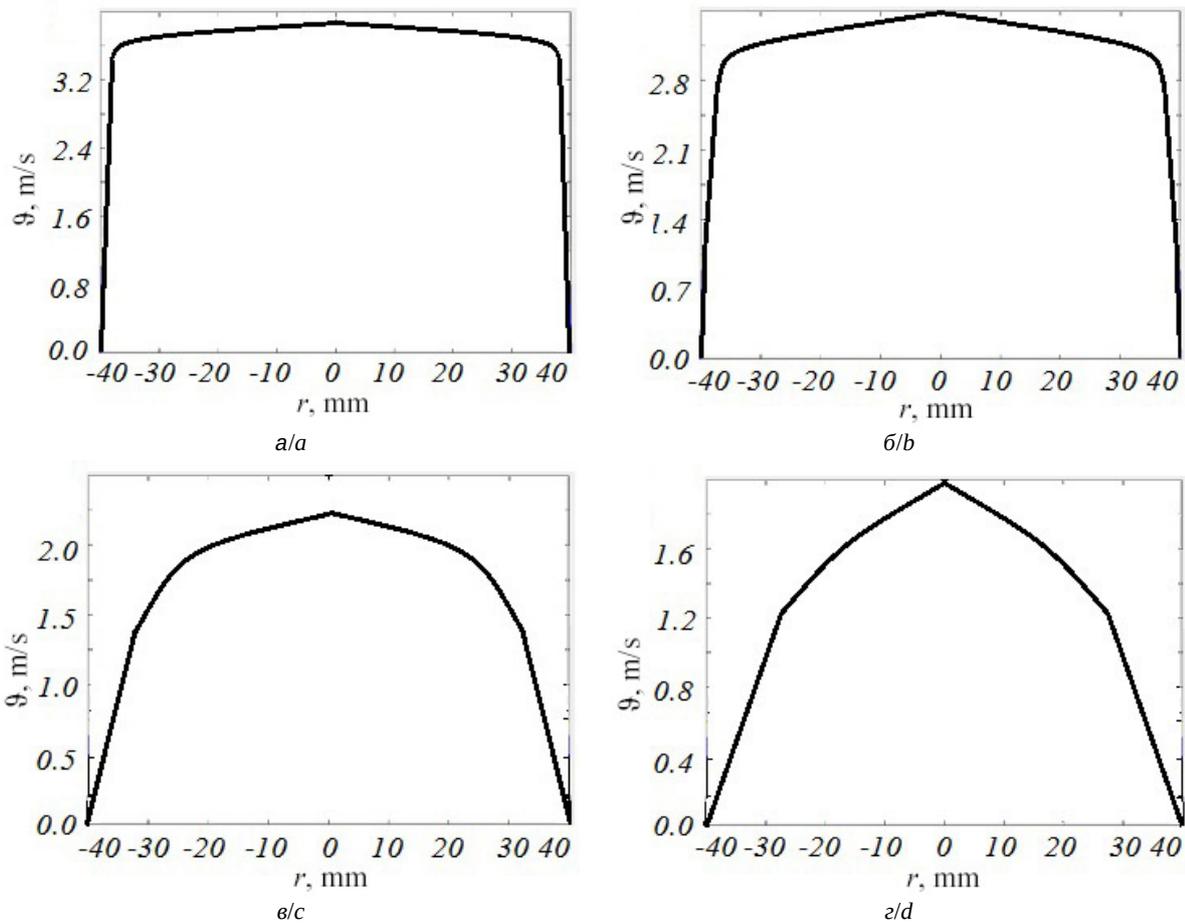


Рис. 3. Эволюция годографов скорости по построенной модели для различных значений чисел Рейнольдса Re
 Fig.3. Evolution of velocity travel time curves according to the constructed model for different values of Reynolds numbers Re

Основные параметры потока газа для различных значений чисел Рейнольдса Re для рис. 3, а–г

Table 1. Main gas flow parameters for different Reynolds numbers Re for Fig. 3, a–d

Номер рисунка Figure no.	v_1 , m/s	v_2 , m/s	$v(\delta)$, m/s	Re	δ , m	Q , m ³ /s
3a	3.75	3.65	3.42	16300	0.0015	0.0199
3b	3.45	3.2	2.79	10200	0.0020	0.0151
3c	2.30	2.00	1.40	8500	0.0067	0.0135
3d	2.00	1.60	1.23	7900	0.0116	0.0125



кий к параболическому вид (см. рис. 3, в и рис. 3, г), и возникает его излом на оси симметрии трубопровода, что говорит о приближении к границе достоверности модели и необходимости ее корректировки на основе формулы Пуазейля [25, 26].

Выводы

В статье проанализированы режимы течения газа в зависимости от значений чисел Рейнольдса. Проведено исследование физических процессов в турбулентном потоке, выделены характерные области, допускающие математическое описание годографа скорости в виде кусочно-непрерывных функций. Предложена математическая модель и получены аналитические выражения для годографа скорости в поперечном сечении трубопровода и объемного расхода газа.

Проведены численные эксперименты созданной модели в широком диапазоне чисел Рейнольдса ($2000 \leq Re \leq 20000$). Сопоставление построенных годографов скорости с данными публикаций [1, 2] позволяет сделать вывод о достоверности модели для значений чисел Рейнольдса $Re \geq 8500$.

Список литературы

1. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. Общий курс. М. : Наука, 1964. 816 с.
2. Колесниченко В. И., Шарифулин А. Н. Введение в механику жидкости : учеб. пособие. Пермь : Издательство Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. 127 с.
3. Yue Hu, Lazarian A., Bialy S. Study Turbulence and Probe Magnetic Fields Using the Gradient Technique: Application to H I-to-H₂ Transition Regions // *Astrophysical Journal*. 2020. Vol. 905, № 2. P. 1–20. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc3c6>
4. Хвалин А. Л. Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 2014. 32 с.
5. Апин М. П., Кудряшов Г. В., Хвалин А. Л. Оптимизация характеристик усилителя мощности на отечественных биполярных транзисторах в диапазоне от 1 до 2 ГГц // *Радиотехника*. 2018. № 8. С. 84–88.
6. Тутков А. А., Хвалин А. Л. Измерение статических и частотных характеристик биполярного транзистора // *Измерительная техника*. 2019. № 8. С. 58–62. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-8-58-62>
7. Хвалин А. Л., Тутков А. А., Ляшенко А. В. Экспериментальные исследования основных характеристик транзистора 2Т937 // *Гетеромагнитная микроэлектроника : сборник научных трудов / под ред.* проф. А. В. Ляшенко. Саратов : ОАО «Институт критических технологий», 2019. Вып. 26. С. 4–10.
8. Хвалин А. Л., Калинин А. В. Моделирование усилителей мощности в среде Microwave Office // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика*. 2021. Т. 21, вып. 3. С. 275–284. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-3-275-284>
9. Калинин А. В., Хвалин А. Л. Перестраиваемые радиотехнические генераторы шума // *Гетеромагнитная микроэлектроника : сборник научных трудов / под ред. проф. А. В. Ляшенко*. Саратов : ОАО «Институт критических технологий», 2019. Вып. 27. С. 31–43.
10. Калинин А. В., Хвалин А. Л. Применение метода конечных элементов в современных системах автоматизированного проектирования // *Гетеромагнитная микроэлектроника : сборник научных трудов / под ред. проф. А. В. Ляшенко*. Саратов : ОАО «Институт критических технологий», 2019. Вып. 26. С. 41–51.
11. Хвалин А. Л., Ляшенко А. В. Многоканальный микрополосковый делитель / сумматор мощности // *Гетеромагнитная микроэлектроника : сборник научных трудов / под ред. проф. А. В. Ляшенко*. Саратов : ОАО «Институт критических технологий», 2019. Вып. 27. С. 43–50.
12. Fan Z., Rudlin J., Asfis G., Meng H. Convolution of Barker and Golay Codes for Low Voltage Ultrasonic Testing // *Technologies*. 2019. Vol. 7, № 4. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/technologies7040072>
13. Nauber R., Thieme N., Beyer H., Bflttner L., Rabiger D., Eckert S., Czarske J. Modular Ultrasound Array Doppler Velocimeter with FPGA-based Signal Processing for Real-time Flow Mapping in Liquid Metal // 2015 International Congress on Ultrasonics. *Physic Procedia*. 2015. Vol. 70. P. 537–540.
14. Eckert S., Cramer A., Gerbeth. G. Velocity measurement techniques for liquid metal flows // *Magneto hydrodynamics – Historical Evolution and Trends / eds. S. Molokov, R. Moreau, H. K. Moffatt*. Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 2007. P. 275–294. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4833-3_17
15. Nauber R., Burger M., Buttner L., Franke S., Rabiger D., Eckert S., Czarske J. Novel ultrasound array measurement system for flow mapping of complex liquid metal flows // *The European Physical Journal Special Topics*. 2013. Vol. 220, № 1. P. 43–52. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01795-1>
16. Nauber R., Burger M., Neumann M., Buttner L., Dadzis K., Niemietz K., Patzold O., Czarske J. Dual-plane flow mapping in a liquid-metal model experiment with a square melt in a traveling magnetic field // *Experiments in Fluids*. 2013. № 4. P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1502-x>
17. Raine A. B., Aslam N., Underwood C. P., Danaher S. Development of an ultrasonic airflow measurement device for ducted air // *Sensors*. 2015. Vol. 15, № 5. P. 10705–10722.
18. Chen Q., Li W., Wu J. Realization of a multipath ultrasonic gas flowmeter based on transit-time technique // *Ultrasonics*. 2014. Vol. 54, № 1. P. 285–290.



19. Yu Y., Woradechjumroen D., Yu D. A review of fault detection and diagnosis methodologies on air-handling units // *Energy Build.* 2014. Vol. 82. P. 555–562.
20. Yu D., Li H., Yang M. A virtual supply airflow rate meter for rooftop air-conditioning units // *Build. Environ.* 2011. Vol. 46. P. 1292–1302.
21. Dhamodaran M., Jegadeesan S., Praveen R. Kumar Analysis and Calculation of the Fluid Flow and the Temperature Field by Finite Element Modeling // *Measurement Science Review.* 2018. Vol. 18, № 2. P. 59–64.
22. Jiang W., Zhang T., Xu Y. The effects of fluid viscosity on the orifice rotameter // *Measurement Science Review.* 2016. Vol. 16, № 2. P. 87–95.
23. Schena E., Massaroni C., Saccomandi P., Cecchini S. Flow measurement in mechanical ventilation: A review // *Medical Engineering & Physics.* 2015. Vol. 37, № 3. P. 257–264.
24. Gong Y., Liu Q. F., Zhang C. L., Wu Y., Rao Y. R., Peng G. D. Microfluidic flow rate detection with a large dynamic range by optical manipulation // *IEEE Photonics Technology Letters.* 2015. Vol. 27, № 23. P. 2508–2511.
25. Turkowski M. Influence of fluid properties on the characteristics of a mechanical oscillator flowmeter // *Measurement.* 2004. Vol. 35, № 1. P. 11–18.
26. Wei-Jiang, Tao-Zhang, Ying-Xu, Huaxiang-Wang, Xiaoli-Guo, Jing-Lei, Peiyong-Sang. The Effects of Fluid Viscosity on the Orifice Rotameter // *Measurement Science Review.* 2016. Vol. 16, № 2. P. 87–95.
- [Heteromagnetic Microelectronics], 2019, iss. 26, pp. 4–10 (in Russian).
8. Khvalin A. L., Kalinin A. V. Modeling power amplifiers in the Microwave Office environment. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 3, pp. 275–284. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-3-275-284>
9. Kalinin A. V., Khvalin A. L. Tunable Radio Engineering Noise Generators. *Geteromagnitnaya mikroelektronika* [Heteromagnetic Microelectronics], 2019, iss. 27, pp. 31–43 (in Russian).
10. Kalinin A. V., Khvalin A. L. Application of the finite element method in modern computer-aided design systems. *Geteromagnitnaya mikroelektronika* [Heteromagnetic Microelectronics], 2019, iss. 26, pp. 41–51 (in Russian).
11. Khvalin A. L., Lyashenko A. V. Multichannel microstrip divider / power combiner. *Geteromagnitnaya mikroelektronika* [Heteromagnetic Microelectronics], 2019, iss. 27, pp. 43–50 (in Russian).
12. Fan Z., Rudlin J., Asfis G., Meng H. Convolution of Barker and Golay Codes for Low Voltage Ultrasonic Testing. *Technologies*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 1–16. <https://doi.org/10.3390/technologies7040072>
13. Nauber R., Thieme N., Beyer H., Bflttner L., Rabiger D., Eckert S., Czarske J. Modular Ultrasound Array Doppler Velocimeter with FPGA-based Signal Processing for Real-time Flow Mapping in Liquid Metal. *2015 International Congress on Ultrasonics. Physic Procedia*, 2015, vol. 70, pp. 537 – 540.
14. Eckert S., Cramer A., Gerbeth. G. Velocity measurement techniques for liquid metal flows. In: S. Molokov, R. Moreau, H. K. Moffatt (Eds.). *Magneto hydrodynamics – Historical Evolution and Trends.* Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2007, pp. 275–294. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4833-3_17
15. Nauber R., Burger M., Buttner L., Franke S., Rabiger D., Eckert S., Czarske J. Novel ultrasound array measurement system for flow mapping of complex liquid metal flows. *The European Physical Journal Special Topics*, 2013, vol. 220, no. 1, pp. 43–52. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01795-1>
16. Nauber R., Burger M., Neumann M., Buttner L., Dadzis K., Niemietz K., Patzold O., Czarske J. Dual-plane flow mapping in a liquid-metal model experiment with a square melt in a traveling magnetic field. *Experiments in Fluids*, 2013, no. 4, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1502-x>
17. Raine A. B., Aslam N., Underwood C. P., Danaher S. Development of an ultrasonic airflow measurement device for ducted air. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 10705–10722.
18. Chen Q., Li W., Wu J. Realization of a multipath ultrasonic gas flowmeter based on transit-time technique. *Ultrasonics*, 2014, vol. 54, no. 1, pp. 285–290.
19. Yu Y., Woradechjumroen D., Yu D. A review of fault detection and diagnosis methodologies on air-handling units. *Energy Build.*, 2014, vol. 82, pp. 555–562.
20. Yu D., Li H., Yang M. A virtual supply airflow rate meter for rooftop air-conditioning units. *Build. Environ.* 2011, vol. 46, pp. 1292–1302.

References

1. Fabrikant N. Ya. *Aerodinamika. Obshchij kurs* [Aerodynamics. General Course]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 816 p. (in Russian).
2. Kolesnichenko V. I., Sharifulin A. N. *Vvedenie v mekhaniku zhidkosti: ucheb. posobie* [Introduction to Fluid Mechanics: A Study Guide]. Perm, Izdatelstvo Perm. nats. issled. polytekh. un-ta, 2019. 127 p. (in Russian).
3. Yue Hu, Lazarian A., Bialy S. Study Turbulence and Probe Magnetic Fields Using the Gradient Technique: Application to H I-to-H₂ Transition Regions. *Astrophysical Journal*, 2020, vol. 905, no. 2, pp. 1–20. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc3c6>
4. Khvalin A. L. *Analysis and synthesis of integral magnetically controlled radio devices on ferrite resonators.* Diss. Dr. Sci. (Tehn.). Samara, 2014. 32 p. (in Russian).
5. Apin M. P., Kudryashov G. V., Hvalin A. L. Optimization of the characteristics of a power amplifier based on domestic bipolar transistors in the range from 1 to 2 GHz. *Radiotekhnika [Radio Engineering]*, 2018, no. 8, pp. 84–88 (in Russian).
6. Titkov A. A., Khvalin A. L. Measurement of static and frequency characteristics of a bipolar transistor. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring Equipment], 2019, no. 8, pp. 58–62 (in Russian).
7. Khvalin A. L., Titkov A. A., Lyashenko A. V. Experimental studies of the main characteristics of the 2T937 transistor. *Geteromagnitnaya mikroelektronika*



21. Dhamodaran M., Jegadeesan S., Praveen R. Kumar. Analysis and Calculation of the Fluid Flow and the Temperature Field by Finite Element Modeling. *Measurement Science Review*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 59–64.
22. Jiang W., Zhang T., Xu Y. The effects of fluid viscosity on the orifice rotameter. *Measurement Science Review*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 87–95.
23. Schena E., Massaroni C., Saccomandi P., Cecchini S. Flow measurement in mechanical ventilation: A review. *Medical Engineering & Physics*, 2015, vol. 37, no. 3, pp. 257–264.
24. Gong Y., Liu Q. F., Zhang C. L., Wu Y., Rao Y. R., Peng G. D. Microfluidic flow rate detection with a large dynamic range by optical manipulation. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, vol. 27, no. 23, pp. 2508–2511.
25. Turkowski M. Influence of fluid properties on the characteristics of a mechanical oscillator flowmeter. *Measurement*, 2004, vol. 35, no. 1, pp. 11–18.
26. Wei-Jiang, Tao-Zhang, Ying-Xu, Huaxiang-Wang, Xi-aoli-Guo, Jing-Lei, Peiyong-Sang. The Effects of Fluid Viscosity on the Orifice Rotameter. *Measurement Science Review*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 87–95.

Поступила в редакцию 16.03.2022; одобрена после рецензирования 05.05.2022; принята к публикации 23.05.2022
The article was submitted 16.03.2022; approved after reviewing 05.05.2022; accepted for publication 23.05.2022