

УДК 621.317.39.084.2

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-8

Метод измерения угловой скорости воздушного потока**В. В. Седышев**Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

sedyshev@usu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Измерение скорости перемещения или вращения подвижных объектов, воздушных и жидкостных сред является одним из самых распространенных в авиационно-космической, автотранспортной и производственной промышленности. С появлением новых принципов, законов и методов определения переменных и параметров физических величин происходит разработка новых приборов и средств измерительной техники. *Материалы и методы.* Предлагается рассмотреть один из методов измерения угловой скорости подвижных объектов на основе динамики воздушного потока, который, в свою очередь, может быть образован вращением маховика любого двигателя, маневра летательного аппарата и др. При наличии воздушного потока и появлении переносной угловой скорости возникает сложное движение, в котором создается сила Кориолиса, приводящая к перераспределению перепада давления жидкости или газа в потоке. Измерение перепада давления позволяет определить угловую скорость вращения данного подвижного объекта. Перепад давления можно измерить с помощью различных чувствительных элементов, например тензодатчиками, ультразвуковыми пластинами и другими средствами измерения физических величин. *Результаты.* Непосредственное измерение перепада давления воздушного потока осуществляется с помощью тонких сопел. Исследование проводилось на базе поворотной установки УПГ-48 и гироскопического мотора в сборе с гироскопом. *Выводы.* Сигнал (перепад давления), пропорциональный угловой скорости, измерялся с помощью сопел, а затем усиливался с помощью струйного усилителя. Исследования показали, что чувствительность измерительного прибора, построенного на предложенном методе, составляет 0,6 Гц.

Ключевые слова: угловая скорость, измерение, сила Кориолиса, гидродинамика, перепад давления, эксперимент

Для цитирования: Седышев В. В. Метод измерения угловой скорости воздушного потока // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 89–97. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-8

Method for measuring the angular velocity of airflow**V.V. Sedyshev**

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

sedyshev@usu.ru

Abstract. *Background.* Measuring the speed of movement or rotation of moving objects, as well as air and liquid media, is one of the most common practices in aviation, automotive, and manufacturing industries. With the emergence of new principles, laws, and methods for determining variables and parameters of physical quantities, new devices and measurement techniques are being developed. *Materials and methods.* This work proposes a method for measuring the angular velocity of moving objects based on the dynamics of airflow, which

can be generated by the rotation of a flywheel of any engine, maneuvering of an aircraft, and more. When there is an airflow and a portable angular velocity occurs, a complex motion arises, creating a Coriolis force that leads to the redistribution of pressure differences in the liquid or gas flow. Measuring the pressure difference allows for the determination of the angular velocity of the rotating object. The pressure difference can be measured using various sensitive elements, such as strain gauges, ultrasonic plates, and other means of measuring physical quantities. *Results.* This work involves the direct measurement of the pressure difference in the airflow using thin nozzles. The research was conducted using a rotating installation UPG-48 and a gyroscopic motor assembled with a gyro unit. *Conclusions.* The signal (pressure difference) proportional to the angular velocity was measured using nozzles and then amplified with a jet amplifier. The studies showed that the sensitivity of the measuring device based on the proposed method is 0.6 Hz.

Keywords: angular velocity, measurement, Coriolis force, hydrodynamics, pressure difference, experiment

For citation: Sedyshev V.V. Method for measuring the angular velocity of airflow. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):89–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-8

Введение

Развитию измерительных приборов в авиационной, космической, автомобильной и машиностроительной промышленности в последнее время уделяется много внимания, а особенно импортозамещению средств измерительной техники [1]. Процесс измерения различных физических величин осуществляется с помощью специальных технических средств, которые отличаются друг от друга по своей сложности и принципу действия. В основе каждого измерительного прибора лежат определенные методы и законы определения той или иной физической величины. Использование различных физических явлений, эффектов и свойств, известных ранее, позволяет создать новые методы измерения, которые могут быть использованы для управления техническими или технологическими системами [2, 3].

Развитие измерения скорости и перемещения объекта в последние годы существенно возросло. Это связано с необходимостью с высокой точностью и быстродействием управлять как техническими системами, так и системами управления движением. Перспективные электромеханические, микромеханические и наномеханические приборы измерения в основном опираются на физические величины, которые базируются на новейших достижениях классической механики, электродинамики, физики полупроводников, а также гидро- и газодинамики [4]. В последнее время много внимания уделяется учету возмущающих факторов, влияющих на показания приборов измерения скорости потока, расхода жидкости и газа [5].

Материалы и методы

Методов измерения угловой скорости довольно много. В работе предлагается один из методов измерения угловой скорости подвижного объекта, который прямо пропорционально зависит от перепада давления газа вращающегося потока.

Описание процессов, происходящих в газовом потоке, рассмотрим на примере быстровращающегося маховика. На рис. 1 представлена механиче-

ская система, которая состоит из быстровращающегося маховика 1, расположенного в подшипниковой опоре 2, которая, в свою очередь, связана с кожухом (на рис. 1 не показан), воздушных сопел 3, установленных вдоль образующей ротора и сопел 4, расположенных перпендикулярно оси вращения маховика.

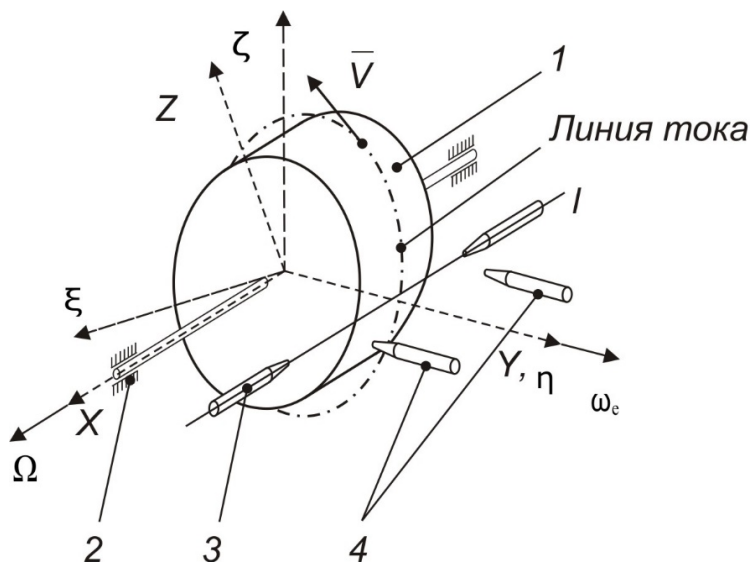


Рис. 1. Вращающийся маховик

С целью описания метода измерения угловой скорости рассмотрим процессы, происходящие в газовом потоке, который образован вокруг вращающегося маховика. Допустим, что маховик вращается с угловой скоростью Ω , при этом окружающий его газ приводится в движение наружной поверхностью маховика. В результате этого образующий газовый поток имеет два пограничных слоя (рис. 2): вблизи вращающегося маховика $q_{\text{пм}}$ и вблизи неподвижного кожуха $q_{\text{пк}}$. Между пограничными слоями скорость газа приблизительно постоянна и равна половине скорости вращения маховика $V = \frac{1}{2} R_{\text{м}} \Omega$ [6–8]. Предположим, что отношение зазора между маховиком и кожухом к диаметру маховика находится в диапазоне 0,01...0,05. В этом случае аэродинамический момент сопротивления и теплоотдачи в пограничных слоях приблизительно постоянны.

Будем считать, что скорость движения газового потока в 2 раза меньше скорости звука. Механика этого потока может быть охарактеризована безразмерным критерием подобия – числом Рейнольдса Re [9]. В рассматриваемом случае она составляет $Re = 0,7 \cdot 10^3 \dots 10^5$. Это означает, что характер течения газа изменяется от ламинарного к турбулентному. Турбулентное движение выглядит макроскопически, как наложение непрерывного движения на движение, характеризуемое турбулентными флуктуациями [6]. В первом приближении газовый поток между пограничными слоями можно охарактеризовать как ламинарный, следовательно, для вывода уравнения измерителя

угловой скорости можно использовать дифференциальное уравнение Эйлера. Это уравнение движения потока газа в форме Громеко – Ламба [6] имеет вид

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \overline{\text{grad}} \left(\frac{V^2}{2} \right) + 2\bar{\omega} \times \bar{V} = F - \frac{1}{\rho} \overline{\text{grad}} P, \quad (1)$$

где $\bar{F}$ – объемная сила в точке линии тока; $\bar{\omega} = \text{rot } \bar{V}$ – вектор угловой скорости (завихренность) частички газа; P – гидродинамическое давление.

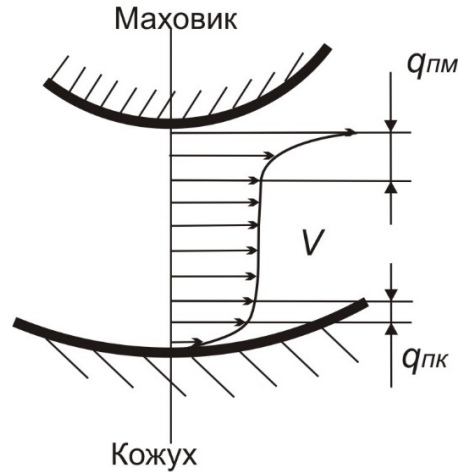


Рис. 2. Распределение скоростей: $q_{пм}$ – толщина пограничного слоя около маховика; $q_{пк}$ – толщина пограничного слоя около кожуха

Для стационарного течения газа с постоянной линейной скоростью V уравнение (1) примет вид

$$\text{grad} \left(\frac{V^2}{2} + \Psi + \Pi \right) = -2\bar{\omega} + \bar{V}, \quad (2)$$

где $\Psi(P)$ – функция давления поверхностных сил; Π – потенциал объемных сил $\bar{F} = -\text{grad}(\Pi)$.

В случае установившегося поля скоростей траектория движения частичек газа становится линией тока (см. рис. 1). Согласно теореме Бернулли [6] сумма кинетической энергии на единицу массы газа, функции давления и приведенного к единице массы потенциала объемных сил $\left(B = \frac{V^2}{2} + \Psi + \Pi \right)$ сохраняет постоянное значение вдоль линии тока. Для стационарного, изотермического и баротропного движения газа имеем

$$\Psi(P) = \frac{P}{\rho} + \text{const}, \quad (3)$$

$$\Pi = gz + \text{const}, \quad (4)$$

где ρ – плотность газа; g – ускорение свободного падения; z – ось, направленная вертикально вверх.

Пусть вращающийся маховик имеет относительную линейную скорость V . Предположим, что система координат XYZ жестко связана с опорами маховика 2 (см. рис. 1), совершает вращательное движение с угловой скоростью $\bar{\omega}_e$ относительно неподвижной системы координат $\zeta\eta\zeta$, тогда частичка газа будет совершать сложное движение. В результате на частичку с единицей массы газа будут действовать дополнительные силы. Это сила инерции Кориолиса

$$\bar{F}_k = -2\bar{\omega}_e + \bar{V}, \quad (5)$$

и центробежная сила

$$\bar{F}_ц = \frac{1}{2} \overline{\text{grad}(\bar{\omega}_e \times \bar{r})^2}, \quad (6)$$

где $\bar{r}$ – радиус-вектор точки массы газа.

Центробежная сила $\bar{F}_ц$ войдет в выражение потенциала объемных сил Π , а сила Кориолиса в правую часть уравнения (2). Согласно выражениям (3), (4), (5) и (6) уравнение (2) примет вид

$$\text{grad} \left[\frac{V^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gz + \frac{1}{2} (\bar{\omega}_e \times \bar{r})^2 \right] = -2(\bar{\omega} + \bar{\omega}_e) \times \bar{r}. \quad (7)$$

Сумма $2(\bar{\omega} + \bar{\omega}_e)$ в уравнении (7) является локальной завихренностью газа по отношению к подвижной системе координат XYZ . Вектор завихренности $\bar{\omega}$ параллелен угловой скорости вращения маховика $\bar{\Omega}$ и вдоль линии l (см. рис. 1) будет равен нулю. Линейная скорость V и сила веса gz вдоль линии l не изменит своей величины. Градиент от центробежной силы по l обратится в ноль. С учетом этого вдоль линии l уравнения (7) примет вид

$$\frac{d(P/\rho)}{dl} = 2\omega_e V. \quad (8)$$

Сделав разделение переменных и взяв интеграл по линии, образующей маховика l и перепаду давления ΔP , получим

$$\Delta P \approx 2\omega_e V L \rho. \quad (9)$$

Согласно линейной скорости газового потока между пограничными слоями (см. рис. 2) имеем

$$V = \frac{1}{2} R_M \Omega,$$

где R_M – радиус маховика.

В результате перепад давления в выражении (9) примет вид

$$\Delta P \approx R_M L \Omega \rho \omega_e. \quad (10)$$

Если локальная завихренность газа $2(\bar{\omega} + \bar{\omega}_e)$ равна нулю, то величина B будет постоянной согласно теореме Бернулли, так же как и в установившемся движении в неподвижной системе координат $\xi\eta\zeta$, а перепад давления ΔP станет равным нулю.

Результаты

Метод, заложенный в измерении переносной угловой скорости воздушного потока $\bar{\omega}_e$, сводится к получению перепада давления. Перепад давления определяется с помощью ввода дополнительных устройств.

Из выражения (10) видно, что перепад давления ΔP прямо пропорционален угловой скорости возмущения ω_e . Если установить две струйные трубки 3 и 4 (см. рис. 1), то на выходе будем иметь информацию об угловой скорости ω_e , выраженную через давление по формуле (10). Измеритель угловой скорости, построенный на струйных трубках 3, будет более чувствителен к угловой скорости возмущения, чем на струйных трубках – 4, так как он замеряет заторможенный поток газа, течение которого вызвано силой Кориолиса. Для воздушного потока перепад давления имеет небольшую величину (порядка 10 Па). Следовательно, при использовании такого измерителя необходимо применить многокаскадные струйные усилители, которые имеют коэффициент усиления по давлению порядка 10^4 и выше. Изменение давлений многокаскадного струйного усилителя может быть представлено системой уравнений

$$P_2 = P_0 - K_1^* R_M L \Omega \rho \omega_e; \quad (11)$$

$$P_2' = P_0 + K_1^* R_M L \Omega \rho \omega_e,$$

где P_0 – максимальное давление в приемном канале окончательного каскада усиления; P_2 и P_2' – выходные давления многокаскадного усилителя, построенного по дифференциальной схеме; K_1^* – коэффициент усиления струйного усилителя.

Таким образом, изложенный метод может быть использован для построения датчиков угловой скорости движущихся объектов.

Обсуждение

С целью подтверждения предложенного метода измерения угловой скорости $\bar{\omega}_e$ через перепад давления ΔP был осуществлен натурный эксперимент. Для проведения эксперимента создан стенд, в котором использовалась поворотная установка УПГ-48, предназначенная для проверки работы гироскопических приборов навигации. Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде (рис. 3, а), состоящем из установки УПГ-48 1, на поворотном столе 2 которого закреплен прибор для измерения угловой скорости, построенный на базе двухстаторного асинхронного негерметического гиروزла ГУА-25000 3 со встроенными соплами 4. Показания перепада давления определялись с помощью водяного манометра 6 через струйный усилитель 5 [10], на который дополнительно подавался сжатый воздух с давлением P_0 согласно уравнениям (11).

Результаты испытаний представлены в виде графика (рис. 3,б). Из графика видно, что наименьшая скорость вращения поворотного стола, при которой осуществляется устойчивое измерение, составляет примерно 3 рад/с, или 0,6 Гц. Дальнейшие эксперименты показали устойчивое измерение, которое проводилось до скорости 1 Гц.

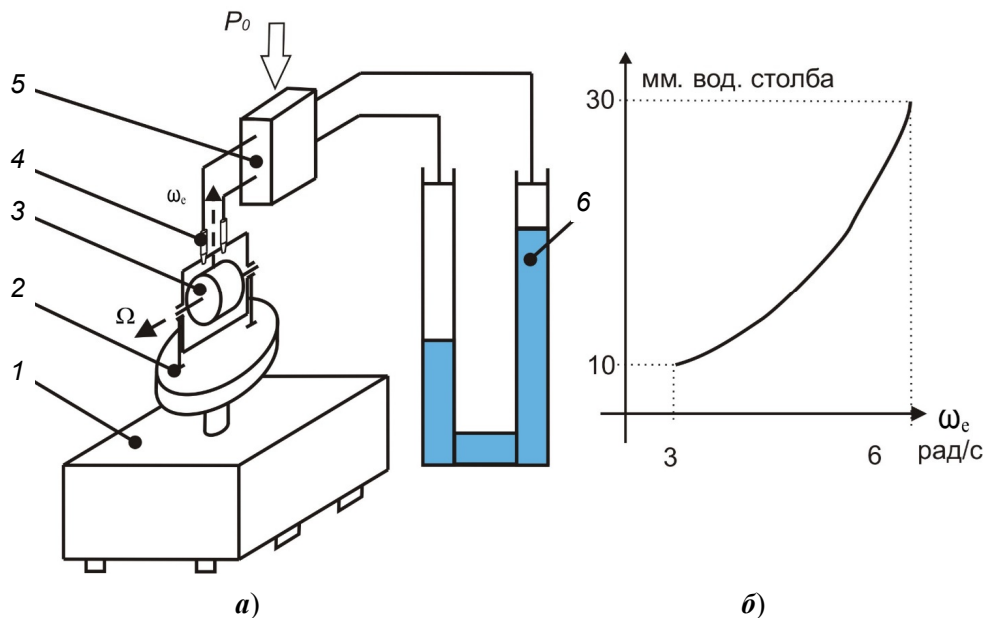


Рис. 3. Экспериментальные исследования:
а – испытательный стенд; б – результаты испытаний

Заключение

Представленный метод измерения угловой скорости $\bar{\omega}_e$ через перепад давления ΔP от газового потока вращающегося маховика имеет место. Результат испытаний на стенде (см. рис. 3,б) показал, что чувствительность такого прибора лежит в диапазоне частот от 0,6 до 1 Гц. Это объясняется физическими свойствами движущегося потока газа. При более высоких скоростях вращения маховика Ω , а следовательно, и потока газа сигнал $\bar{\omega}_e$, выраженный через перепад давления ΔP , более устойчивый и информационный.

Практическая значимость: предложенный метод может быть использован для разработки и создания гироскопических приборов и систем, где использование электрического сигнала невозможно.

Список литературы

1. Михайлиди Д. Х., Рагуткин А. В., Скобелев Д. О., Сухатерин А. Б. Организация инжинирингового центра для импортозамещения в промышленности // Russian Technological Journal. 2023. Vol. 11, № 4. С. 105–115. doi: 10.32362/2500-316X-2023-11-4-105-115
2. Yuxiaoa C., Chunjun Ch., Chaoa D. Исследование вибрационного воздействия на пьезорезистивный датчик давления // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 4. С. 115–130.

3. Матвеев В. В., Погорелов М. Г., Хомячкова А. Н. Модифицированный метод TRIAD для решения задачи ориентации подвижного объекта // Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15, № 3. С. 195–204.
4. Караян Г. С., Гандилян С. В., Гандилян В. В. Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики // Вестник Московского энергетического института. 2017. № 5. С. 63–70. doi: 10.24160/1993-6982-2017-5-63-70
5. Романов В. А., Тараненко П. А. Оценка диссипативных свойств колебательной системы серийного образца расходомера Кориолиса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 2. С. 134–144. doi: 10.15593/perm.mech/2020.2.11
6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1973. 848 с.
7. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск : Наука, 2008. 96 с.
8. Баутин С. П., Крутова И. Ю. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса : монография. Екатеринбург : УрГУПС, 2019. 181 с.
9. Макаров К. А. О физическом смысле числа Рейнольдса и других критериев гидродинамического подобия // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1185>
10. Касимов А. М., Попов А. И. О новой концепции построения струйных устройств управления // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2024 (Москва 17–20 июня 2024). М., 2024. С. 2201–2206.

References

1. Mikhaylidi D.Kh., Ragutkin A.V., Skobelev D.O., Sukhaterin A.B. Organization of an engineering center for import substitution in industry. *Russian Technological Journal*. 2023;11(4):105–115. (In Russ.). doi: 10.32362/2500-316X-2023-11-4-105-115
2. Yuxiaoa C., Chunjun Ch., Chaoa D. Study of vibration effects on piezoresistive pressure sensor. *Pribory i tekhnika eksperimenta = Instruments and experimental technique*. 2022;(4):115–130. (In Russ.)
3. Matveev V.V., Pogorelov M.G., Khomyachkova A.N. Modified TRIAD method for solving the problem of orientation of a moving object. *Pribory i metody izmereniy = Instruments and methods of measurement*. 2024;15(3):195–204. (In Russ.)
4. Karayan G.S., Gandilyan S.V., Gandilyan V.V. Current state and development prospects of microsystem electromechanics. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2017;(5):63–70. (In Russ.). doi: 10.24160/1993-6982-2017-5-63-70
5. Romanov V.A., Taranenko P.A. Evaluation of dissipative properties of the oscillatory system of a serial sample of the Coriolis flow-era. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2020;(2):134–144. (In Russ.). doi: 10.15593/perm.mech/2020.2.11
6. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza = Fluid and gas mechanics*. Moscow: Nauka, 1973:848. (In Russ.)
7. Bautin S.P. *Tornado i sila Koriolisa = Tornado and Coriolis force*. Novosibirsk: Nauka, 2008:96. (In Russ.)
8. Bautin S.P., Krutova I.Yu. *Analiticheskoe i chislennoe modelirovanie techeniy gaza pri uchete deystviya sily Koriolisa: monografiya = Analytical and numerical modeling of gas flows taking into account the effect of the coriolis force: monograph*. Ekaterinburg: UrGUPS, 2019:181. (In Russ.)
9. Makarov K.A. On the physical meaning of the Reynolds number and other criteria of hydrodynamic similarity. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering journal: science and innovation*. 2014;(1). (In Russ.). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1185>

10. Kasimov A.M., Popov A.I. On a new concept for constructing jet control devices. *XIV Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2024 (Moskva 17–20 iyunya 2024) = All-Russian Conference on Management Problems 2024 (June 17-20, 2024, Moscow)*. Moscow, 2024:2201–2206. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Вячеслав Викторович Седышев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматики
и управления, Высшая школа
электроники и компьютерных наук,
Южно-Уральский государственный
университет (национальный
исследовательский университет)
(Россия, г. Челябинск, пр-кт Ленина, 76)

E-mail: sedyshev@susu.ru

Vyacheslav V. Sedyshev

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor of the
sub-department of automation and control,
Higher School of Electronics and Computer
Science, South Ural State University
(National Research University) (76 Lenina
avenue, Chelyabinsk, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 17.02.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 23.03.2025

Принята к публикации / Accepted 21.04.2025