

Приборы и техника физического эксперимента

Научная статья

УДК 534, 53.072

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19307>

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

**Е. В. Гольдберг [✉], Е. Г. Апушкинский, В. А. Кожевников,
Л. П. Круковская, Т. А. Тихонова**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

[✉]goldberg_ev@spbstu.ru

Аннотация. Представлено описание установки, которая позволяет проводить эксперименты по эффекту Доплера для акустических волн и измерению скорости звука в воздухе. Описание включает принцип работы установки и ее отдельных узлов, а также их основные технические характеристики. Представлены результаты испытаний объекта и их сравнение с расчетными данными (установлено их качественное совпадение). Созданный комплекс применяется в качестве учебной лабораторной установки, а также может применяться как прототип оборудования для измерения скорости воздушного потока. Его можно использовать как для оценки расхода газа, так и для автономного определения либо мониторинга скорости летательного аппарата. Ключевой особенностью системы является возможность работы дистанционно.

Ключевые слова: эффект Доплера, акустические волны, скорость воздушного потока, дистанционный доступ

Для цитирования: Гольдберг Е. В., Апушкинский Е. Г., Кожевников В. А., Круковская Л. П., Тихонова Т. А. Установка для исследования эффекта Доплера // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 3. С. 73–81. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19307>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19307>

A SETUP FOR INVESTIGATING THE DOPPLER EFFECT

**E. V. Goldberg [✉], E. G. Apushkinskiy, V. A. Kozhevnikov,
L. P. Krukovskaya, T. A. Tikhonova**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

[✉]goldberg_ev@spbstu.ru

Abstract. This article presents the description of a setup for conducting experiments on the Doppler effect for acoustic waves and measuring the speed of sound in air. The description covers the operation principle of the setup and its individual components as well as their main technical characteristics. The test results and their comparison with calculated data have been presented for this unit. A qualitative match between them was established. This developed system is used as an educational laboratory setup and can also serve as an equipment prototype for measuring the airflow velocity. It can also be used both to estimate gas consumption and to autonomously determine or monitor the aerial vehicle speed. A key feature of the system is the ability to operate remotely.

Keywords: physics, Doppler effect, acoustic waves, air flow velocity, remote access

For citation: Goldberg E. V., Apushkinskiy E. G., Kozhevnikov V. A., Krukovskaya L. P., Tikhonova T. A., A setup for investigating the Doppler effect, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (3) (2026) 73–81. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19307>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Лабораторные занятия – это одна из разновидностей практического обучения студентов, эффективная форма освоения учебного материала, который преподается им на лекциях, семинарах и составляет важную часть учебного процесса. Возрастают требования к модернизации оборудования учебных лабораторий, поскольку молодые специалисты должны нести на свои новые места работы последние научные достижения. При этом важно учитывать возможности дистанционной работы на экспериментальных установках, что на сегодняшний день становится весьма актуальной задачей.

Настоящая публикация посвящена описанию работы по созданию и тестированию экспериментальной установки, сконструированной и созданной на кафедре физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ).

Лабораторная работа состоит в практическом ознакомлении с эффектом Доплера на волнах акустического диапазона и определении скорости звука, который распространяется в воздухе. Аналоги такой лабораторной работы для студентов известны, в частности с применением установки, разработанная фирмой “PHYWE Systems”. Долгое время указанная установка эксплуатировалась и на кафедре физики СПбПУ Петра Великого для обучения студентов; однако, будучи сделанной на базе аналоговых приборов, она окончательно устарела и не позволяла ее использовать как прототип для практических приложений.

Наша работа состояла в глубокой модернизации лабораторной установки как в техническом, так и методическом плане, что позволяет говорить фактически об абсолютно новой системе, которая использует цифровые измерительные приборы, допускает дистанционное управление и позволяет ее применять как для обучения студентов по курсу общей физики и исследовательской работы магистров, так и для практических приложений, которые излагаются далее.

Предварительные сведения

Согласно модели идеального газа, скорость звука в воздухе v_s можно определять по следующей формуле [1]:

$$v_s = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (1)$$

где γ – показатель адиабаты воздуха, $\gamma = 1,40$; M – его молярная масса, $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; T , К, – его температура; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж/(К·моль).

Рассчитанное значение скорости звука при конкретной температуре предлагается сравнить со значением, экспериментально найденным при обработке результатов наблюдения эффекта Доплера [1]. Если воспользоваться информацией, приведенной в книге [2] или статье [3], то несложно заключить, что скорость звука v_s связана со скоростью движения приемника звука v_r , его частотой f_0 и частотой f , регистрируемой перемещаемым приемником, соотношением вида

$$v_s = v_r f_0 / (f - f_0). \quad (2)$$

Описание установки

В данной работе исследуется эффект Доплера на ультразвуковых волнах. Человеческое ухо не слышит ультразвука, и в этом отношении проведение эксперимента является достаточно комфортным. К другим важным преимуществам ультразвука можно отнести



пропорциональность доплеровского сдвига частоты $\Delta f = f - f_0$ частоте f_0 , и, следовательно, эффект Доплера проявляется сильнее, чем на звуковых частотах.

Блок-схема экспериментальной установки и ее фотография приведены на рис. 1. Установка содержит генератор 1 с функцией измерения частоты и усилитель электрических колебаний ультразвукового диапазона. Генератор работает на фиксированной частоте $f_0 = 40$ кГц. Выходное напряжение генератора, которое можно изменять, подается на неподвижный источник ультразвука 2. Последний преобразует электрические колебания в акустические. Все приборы, используемые в нашей комплектации установки, являются цифровыми измерительными и снабжены соответствующими сертификатами.

Приемник ультразвука (микрофон 3) преобразует акустические ультразвуковые колебания, генерируемые источником 2, в электрические колебания той же частоты. Приемник установлен на каретке, перемещающейся по направляющей. Для надежной работы установки необходимо, чтобы источник и приемник находились на одинаковой высоте и были точно направлены навстречу друг другу. В начале и конце направляющей установлены концевые выключатели, предназначенные для остановки каретки. Каретка с приемником перемещается по направляющей посредством шагового двигателя (устройство, которое преобразует электрические импульсы в механическое вращательное движение, причем каждый импульс поворачивает ротор двигателя на определенное число градусов, составляющих шаг) и зубчатой ременной передачи. Микроконтроллер, расположенный внутри блока управления, осуществляет локальное и дистанционное управление шаговым двигателем.

Электрический сигнал с приемника 3 поступает на усилитель сигнала и далее на измерительный вход генератора 1. Когда источник и приемник неподвижны, измеряемая частота равна частоте излучателя f_0 . Если же приемник движется относительно источника, то измеряемая доплеровская частота f будет определяться формулой (2). Таким образом, один и тот же прибор может измерять как частоту f_0 , так и f .

Усилитель 6 и термометр 7 на рис. 1, 6 не видны, так как усилитель скрыт за установкой, а термометр (один на несколько установок) расположен на стене аудитории.

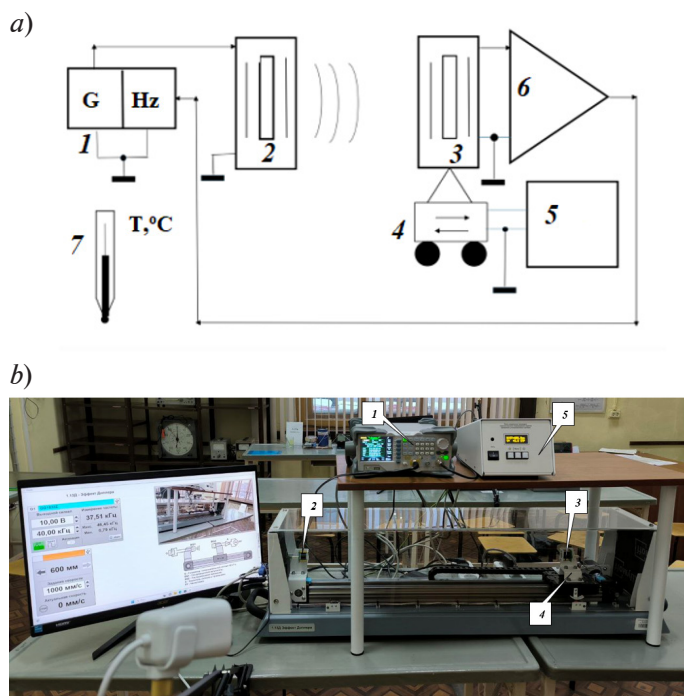


Рис. 1. Блок-схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки:
1 – задающий цифровой генератор (G) с функцией измерения частоты, 2 – неподвижный источник ультразвука, 3 – движущийся приемник ультразвука, 4 – подвижная каретка, 5 – блок управления движением каретки, 6 – усилитель, 7 – термометр (Т)

Основные технические характеристики установки следующие:

рабочий ход каретки 600 мм;
 рабочая частота приемника/излучателя 40 кГц;
 диапазон рабочих скоростей 100 – 1000 мм/с;
 габариты установки 1100 × 240 × 275 мм;
 масса лабораторной установки около 9 кг;
 напряжение и частота питания 220В, 50Гц;
 потребляемая мощность не более 100 Вт.

В дистанционном варианте работы к лабораторной установке подключается компьютер (см. рис. 1, *b*) и появляется возможность выполнять лабораторную работу дистанционно, не посещая лабораторию, где расположено оборудование. Студенты должны лишь использовать компьютеры, которые работают в режиме онлайн-конференции, позволяющем удаленно управлять установкой.

Вид рабочего стола персонального компьютера представлен на рис. 2. Панель G1 дублирует реальный генератор с функцией регистрации частоты, а другая панель – блок управления кареткой. В верхнем правом углу транслируется работа экспериментальной установки в режиме реального времени. В нижнем углу показана схема установки.

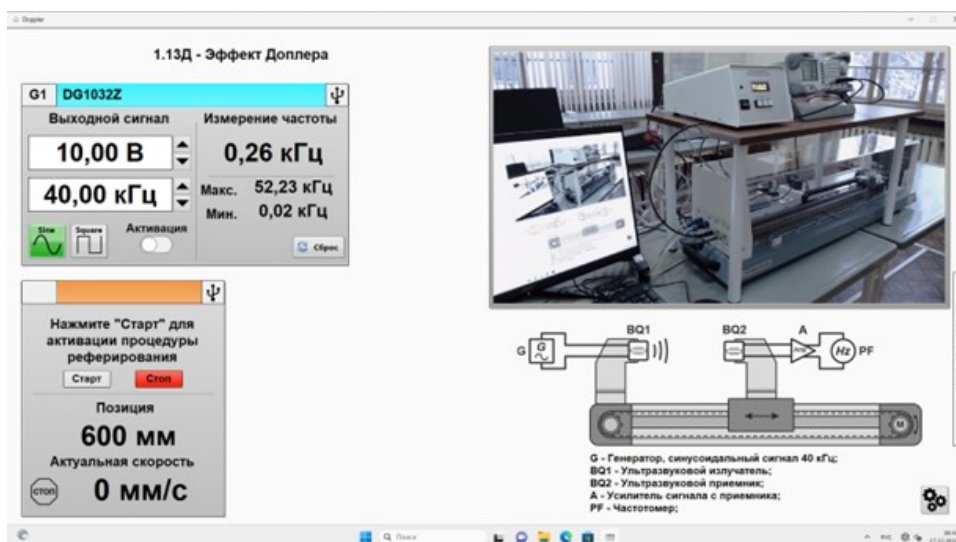


Рис. 2. Общий вид рабочего стола с запущенной программой управления

Результаты испытаний

Установка, на которой были проведены испытания и которая ныне используется для обучения студентов в лаборатории физики и математики СПбПУ, была укомплектована следующими приборами:

генератор сигнала со встроенным частотомером RIGOL DG1032;
 моноблок ACER ASPIRE C24-1800;
 веб-камера Logitech Full HD StreamCam 1920 × 1080.

Как авторы этой работы, так и студенты в ходе обучения уже неоднократно проводили эксперименты на данной установке, укомплектованной указанными выше приборами, и получали результаты по измерению скорости звука в воздухе с погрешностью, не превышающей таковую для промышленных приборов, а именно

$$v = (345,7 \pm 0,5) \text{ м/с при } 25^\circ\text{C}.$$

Расчет по формуле (1) дает значение скорости $v_s = (347 \pm 8) \text{ м/с}$. Подобная практика хорошо обучает студентов сравнению результатов, полученных ими путем самостоятельных измерений, с расчетными.

Чтобы исследовать влияние движущихся воздушных потоков на фазовый сдвиг между



излученным и принятым акустическими сигналами, в установку был добавлен осциллограф (в наших экспериментах это марка UTD2102С фирмы UNI-T, Китай) и демонтировались боковые крышки прозрачного короба, чтобы исключить турбулентный поток между приемником и передатчиком ультразвука. Для нагнетания воздуха использовали лабораторную воздуходувку фирмы RHYWE (Германия) с управляемой скоростью воздушного потока (диаметр выходной трубы $d = 23$ мм).

Практические приложения

Созданная установка дает возможность измерять скорость воздушного потока, обтекающего приемник и передатчик ультразвука, если они неподвижны, а также влияние направления и скорости такого потока на доплеровские сдвиги частот. Это сейчас очень важно и актуально при управлении полетами беспилотной авиации, так как по скорости воздушного потока, обтекающего летящий объект, можно судить о скорости этого объекта. Эта скорость критична для пилотирования, поскольку от нее непосредственно зависят подъемная сила и управляемость БПЛА. Когда источник звука и приемник неподвижны относительно среды, а среда (воздух) движется, это эквивалентно ситуации, когда среда неподвижна, но источник и приемник двигаются в среде. Скорость распространения звуковой волны относительно неподвижного наблюдателя складывается со скоростью движения самой среды (с учетом знака). Скорость движения воздушной массы линейно связана с фазовым сдвигом ультразвукового сигнала, распространяющегося в ней. Эта разность фаз служит прямой и удобной мерой для определения скорости потока, что широко применяется в технике (расходомеры, анемометры). Фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ (разность между фазами принятого и опорного сигналов) для одного направления следует выражению

$$\Delta\varphi = 2\pi f L(1/v_{\text{eff}} - 1/v_s) \approx - (2\pi f L v_{pr}) / (v_s)^2, \quad (3)$$

где $v_{\text{eff}} = v_s + v_{pr}$; v_{pr} – проекция скорости ветра на направление распространения сигнала; L – расстояние между приемником и передатчиком. Присвоение знака зависит от направления ветра относительно направления распространения звуковой волны.

Результат оценочного расчета по формуле (3) приведен графически на рис. 3, где также представлена полученная экспериментальная зависимость разности фаз $\Delta\varphi$ от скорости воздушного потока, создаваемого отградуированным компрессором в месте нахождения передатчика звукового сигнала. В позиции расположения приемника скорость потока значительно ниже. Наши оценки показали, что скорость падает очень быстро на первых десяти сантиметрах. На расстоянии 0,23 м, равном $10d$ (d – диаметр выходной трубы компрессора), скорость должна снизиться примерно до 8 – 10 м/с, а на расстоянии 0,6 м она уже составит приблизительно (0,5 – 0,6) м/с. Поэтому полная дистанция между

приемником и передатчиком при расчетах была разбита пополам. Начальный участок, составляющий примерно $6d$ (0,14 м), для которого использовалась формула (3), и основной, который простирался от 0,14 до 0,60 м. На этом участке зависимость скорости потока v_{pr} от расстояния x следовала выражению

$$v_{pr} = v_0 k d / x,$$

где v_0 – скорость потока после начального участка, k – числовой коэффициент, $k = 0,25$.

Обычно скорость v_0 считают примерно в два раза меньше исходной. Экспериментальная зависимость измерена на установке, блок-схема которой представлена на рис. 4. Наблюдается качественное совпадение расчетного и экспериментального графиков. При повторных многократных

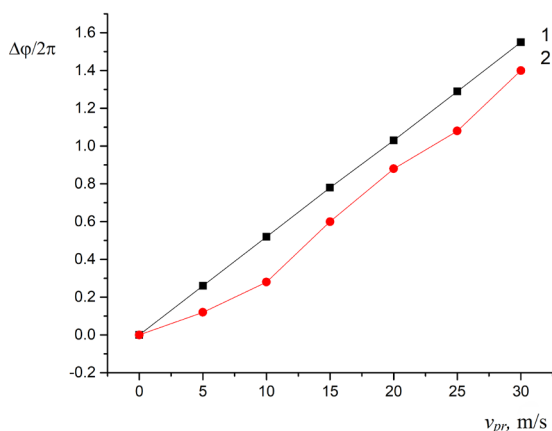


Рис. 3. Экспериментальная (кривая 1) и расчетная (2) зависимости разности фаз $\Delta\varphi/2\pi$ от скорости воздушного потока v_{pr} .
Рассчитана по формуле (3)

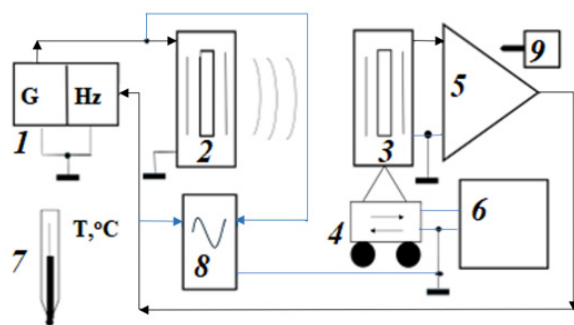


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки для исследования влияния скорости воздушного потока v_{pr} на разность фаз $\Delta\varphi$: 1 – задающий цифровой генератор с функцией измерения частоты, 2 – неподвижный источник ультразвука, 3 – движущийся приемник ультразвука, 4 – подвижная каретка, 5 – блок управления движением каретки, 6 – усилитель, 7 – термометр, 8 – двухканальный осциллограф, 9 – компрессор

вызывают случайные колебания фазы (акустический «шум»), которые необходимо усреднять во времени.

Поперечная составляющая ветра. В классической двухлучевой системе на результат измерения влияет только проекция скорости ветра на ось между датчиками. Чтобы измерять полный вектор скорости ветра, используют трехлучевые анемометры.

Диссипация и рассеяние. На больших расстояниях высокочастотный ультразвук затухает и рассеивается, что может ослабить сигнал и ухудшить точность измерения фазы.

В итоге получается, что скорость движения воздушной массы линейно зависит от фазового сдвига ультразвукового сигнала, в ней распространяющегося. Однако в чистом виде измерить этот сдвиг с высокой точностью затруднительно. Поэтому на практике используется встречно-параллельная схема измерения, которая преобразует влияние скорости в разность фаз между двумя встречными сигналами. Эта разность фаз является прямой и удобной для измерения мерой скорости потока, что широко применяется в технике (расходомеры, анемометры).

Очень интересной и весьма сложной оказывается проблема измерения и интерпретации доплеровских сдвигов частот при распространении акустических волн в движущихся средах, которые перемещаются под углом по отношению к движению источника или приемника волн [4 – 6]. Данная задача является актуальной, и поэтому установка, которая представлена в этой статье, может использоваться не только для решения учебных, но и научно-технических задач. Отдельный интерес вызывают аспекты применения эффекта Доплера для решения практических и инженерных задач в газах и жидкостях. Например, это задачи, связанные с подводными объектами, между которыми осуществляется связь на акустических волнах [7], или определение местоположения и характеристик движения воздушного судна посредством пассивной локации за счет регистрации акустического сигнала с нескольких точек [8]. Иногда возникает задача «очистить» звук от эффекта Доплера; в статье [9] обсуждается, как подойти к решению этой проблемы.

Заключение

Установка, описанная в этой статье, создана и широко используется в учебной лаборатории физики и математики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого для проведения занятий со студентами и их самостоятельной научной работы. Учебная лабораторная работа рассчитана на два академических часа при работе двух студентов за одной установкой в лаборатории под наблюдением преподавателя. В дистанционном режиме в лаборатории должен находиться сотрудник, включающий и

(а значит более аккуратных) экспериментах следует ожидать лучшего совпадения.

Анализ данных на рис. 3 позволяет заключить, что измеряемая разность фаз $\Delta\varphi$ прямо пропорциональна скорости движения среды v_{pr} и не зависит от абсолютной скорости звука v_s в первом приближении (хотя v_s в формуле и присутствует, но на практике ее влияние учитывается лишь калибровкой или дополнительными измерениями температуры). Отметим факторы, которые усложняют корректное определение скорости потока через фазовый сдвиг в реальных условиях.

Температура. Скорость звука сильно зависит от температуры воздуха. Это влияет на величину фазового сдвига. В современных приборах температуру измеряют для учета этого эффекта.

Турбулентность и неоднородность потока. Ветер характеризуется неоднородным движением. Пульсации скорости и вихри

выключающий установку. Снятие показаний с приборов студенты осуществляют, руководствуясь учебным пособием [1], а обработку результатов ведут в соответствии с методическими указаниями в работе [10].

Примеры приложений, которые можно проверять и реализовывать с использованием данной установки, связаны с определением скорости воздушного потока, обтекающего установку, что можно применять как для оценки расхода газа, так и для автономного определения и мониторинга скорости летательного аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апушкинский Е. Г., Быков Н. Ю., Воробьева Т. В. и др. Физика. Молекулярная физика. Санкт-Петербург: Политех-Пресс», 2025. 82 с.
2. Иродов И. Е. Волновые процессы. Основные законы. М.: БИНОМ. Лабораторные знания, 2007. 263 с.
3. Neipp C., Hernández A., Rodes J.J., Marquez A., Beléndez T., Beléndez A. An analysis of the classical Doppler effect // *European Journal of Physics*. 2003. Vol. 24. No. 5. P. 497.
4. Богусевич А. Я. К анализу акустического эффекта Доплера в трехмерно неоднородной движущейся среде // *Оптика атмосферы и океана*. 1999. Т. 12. № 4. С. 314–320.
5. Хазиев И. Л., Устинова Е. С., Глущенко А. Г., Глущенко Е. П. Эффект Доплера в неравномерно движущихся структурах // *Современные наукоемкие технологии*. 2014. № 5. Часть 2. С. 125–128.
6. Гейстер С. Р., Гладышев А. М., Гейстер А. С., Джеки А. М. Доплеровский эффект при акустическом мониторинге движущихся автотранспортных средств // *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР)*. 2010. № 1 (47). С. 5–11.
7. Ahmad A. M., Kassem J., Barbeau M., Kranakis E., Porretta S., Garcia-Alfaro J. Doppler effect in the acoustic ultralow frequency band for wireless underwater networks // *Mobile Networks and Applications*. 2018. Vol. 23. No. 5. Pp. 1282–1292.
8. Martin S. R., Genescá M., Romeu J., Pámies T. Aircraft tracking by means of the acoustical Doppler effect // *Aerospace Science and Technology*. 2013. Vol. 28. No. 1. Pp. 305–314.
9. Iwaya Y., Suzuki Y. Rendering moving sound with the Doppler effect in sound space // *Applied Acoustics*. 2007. Vol. 68. No. 8. Pp. 916–922.
10. Агапьев Б. Д., Козловский В. В. Физика. Практическая обработка экспериментальных данных: методические указания. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 61 с.

REFERENCES

1. Apushkinskiy E. G., Bykov N. Yu., Vorobyeva T. V., et al., *Fizika. Molekulyarnaya fizika* [Physics. Molecular physics: Practical workshop], Politekh-Press Publishing, St. Petersburg, 2025 (in Russian).
2. Irodov I. E., *Basic laws of electromagnetism*. Translated from Russian, Mir Publishers, Moscow, 1986.
3. Neipp C., Hernández A., Rodes J. J., et al., An analysis of the classical Doppler effect, *Eur. J. Phys.* 24 (5) (2003) 497.
4. Bogushevich A. Ya., Ultrasonic methods for estimation of atmospheric meteorological and turbulence parameters, *Atmos. Ocean. Opt.* 12 (02) (1999) 164–169.
5. Khaziev I. L., Ustinova E. S., Glushchenko A. G., Glushchenko E. P., Effect Doplera v neravnomerno dvizhushchikhcya strukturakh [The Doppler effect in non-uniformly moving structures], *Modern High Technologies*. (5-2) (2014) 126–128 (in Russian).
6. Heister S. R., Gladyshev A. M., Heister A. S., Jackie A. M., Doppler effect at acoustic monitoring of moving vehicles, *Doklady BGUIR* [Reports from Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]. (1(47)) (2010) 5–11 (in Russian).
7. Ahmad A. M., Kassem J., Barbeau M., et al., Doppler effect in the acoustic ultralow frequency band for wireless underwater networks, *Mobile Netw. Appl.* 23 (5) (2018) 1282–1292.
8. Martin S. R., Genescá M., Romeu J., Pámies T., Aircraft tracking by means of the acoustical Doppler effect, *Aerosp. Sci. Technol.* 28 (1) (2013) 305–314.

9. Iwaya Y., Suzuki Y., Rendering moving sound with the Doppler effect in sound space, Appl. Acoust. 68 (8) (2007) 916–922.

10. Agap'ev B. D., Kozlovskiy V. V., Fizika. Prakticheskaya obrabotka eksperimentalnykh dannykh: metodicheskiye ukazaniya [Physics. Practical processing of experimental data: Methodological guidelines], Polytechnical Institute Publishing, St. Petersburg, 2012 (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОЛЬДБЕРГ Екатерина Владимировна — заведующая учебной лабораторией физики и математики кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
goldberg_ev@spbstu.ru
ORCID: 0009-0007-7590-3908

АПУШКИНСКИЙ Евгений Геннадиевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
apushkinsky@hotmail.com
ORCID: 0000-0003-0294-3355

КОЖЕВНИКОВ Вадим Андреевич — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
moraval@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5986-0820

КРУКОВСКАЯ Лидия Петровна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
lidia.ks@mail.ru

ТИХОНОВА Татьяна Анатольевна — ассистент кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
tikhonova_ta@spbstu.ru
ORCID: 0009-0005-9096-3744

THE AUTHORS

GOLDBERG Ekaterina V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
goldberg_ev@spbstu.ru
ORCID: 0009-0007-7590-3908

APUSHKINSKIY Evgeniy G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
apushkinsky@hotmail.com
ORCID: 0000-0003-0294-3355



KOZHEVNIKOV Vadim A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
moraval@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5986-0820

KRUKOVSKAYA Lidia P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
lidia.ks@mail.ru

TIKHONOVA Tatiana A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
tikhonova_ta@spbstu.ru
ORCID: 0009-0005-9096-3744

*Статья поступила в редакцию 12.02.2026. Одобрена после рецензирования 14.04.2026.
Принята 14.04.2026.
Received 12.02.2026. Approved after reviewing 14.04.2026. Accepted 14.04.2026.*