

УДК 536.6

Восстановление температуры воды погружным измерительным комплексом путем решения нелинейной нестационарной обратной задачи теплопроводности методом параметрической идентификации

Д-р техн. наук Н. В. ПИЛИПЕНКО¹, П. А. КОЛОДИЙЧУК^{1,2*}

¹Университет ИТМО

²АО «Концерн «Океанприбор»

*E-mail: pkolodiychuk@mail.ru

В работе рассмотрена проблема методической неопределенности измерения неравномерной по глубине температуры воды погружающимся измерительным комплексом. Проведено сравнение двух методов определения температуры — классический контактный на основе показаний высокоточного термистора, находящегося в контакте с корпусом измерительного прибора, и параметрической идентификации дифференциально-разностной модели переноса тепла с решением обратной задачи теплопроводности. При этом на основе восстановленного теплового потока, скорости погружения и заранее рассчитанной гидродинамической модели обтекания измерительного комплекса восстанавливается температура воды с учетом тепловой инерции, свойственной контактному методу. Метод параметрической идентификации по сравнению с классическим показал значительное снижение неопределенности температуры воды и рассчитываемой на её основе скорости звука. Полученные результаты могут быть использованы для более точного исследования морского дна и определения расстояния до далеких объектов под водой.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, скорость звука в воде, погружной измерительный комплекс, методическая погрешность контактного метода, обратная задача теплопроводности.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 23.10.2024, одобрена после рецензирования 22.01.2025, принята к печати 13.02.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-82-88

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Пилипенко Н. В., Колодийчук П. А. Восстановление температуры воды погружным измерительным комплексом путем решения нелинейной нестационарной обратной задачи теплопроводности методом параметрической идентификации. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 1. С. 82–88. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-82-88

Restoration of water temperature using a submersible measuring complex by solving the nonlinear nonstationary inverse heat conduction problem using the parametric identification method

D. Sc. N. V. PILIPENKO¹, P. A. KOLODIYCHUK^{1,2*}

¹ITMO University

²Okeanpribor Concern JSC

*E-mail: pkolodiychuk@mail.ru

The paper considers the problem of methodical uncertainty of measuring water temperature uneven by depth by a submersible measuring complex. A comparison for two methods of temperature determination has been made — the classical contact method based on readings of a high-precision thermistor in contact with the body of the measuring device, and parametric identification of a differential-difference model of heat transfer with a solution of the nonlinear nonstationary inverse heat conduction problem. In this case, based on the restored heat flux, immersion speed, and a pre-calculated hydrodynamic model of flow around the measuring complex, the water temperature is restored taking into account the thermal inertia inherent in the contact method. The parametric identification method, compared with the classical method, showed a significant reduction in the uncertainty of water temperature and the speed of sound calculated on its basis. The results obtained can be used for a more accurate study of the seabed and determination of the distance to distant objects under water.

Keywords: parametric identification, speed of sound in water, submersible measuring complex, methodical uncertainty of the contact method, inverse heat conduction problem.

Article info:

Received 23/10/2024, approved after reviewing 22/01/2025, accepted 13/02/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-82-88

Article in Russian

For citation:Pilipenko N. V., Kolodychuk P. A. Restoration of water temperature using a submersible measuring complex by solving the nonlinear nonstationary inverse heat conduction problem using the parametric identification method. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 1. p. 82-88. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-82-88**Введение**

Точные сведения о величине температуры являются определяющими при исследованиях ряда технологических процессов и явлений, таких как обжиг руды, химический синтез, переработка нефти и так далее. При этом температура является контрольным значением теплового режима оборудования и перерабатываемого сырья. В некоторых случаях измерение температуры может использоваться как промежуточный шаг для расчетов других величин, например, в области гидроакустики при расчете значения скорости звука (СЗ) в воде. Его значение позволяет определять расстояние до объектов в водной среде, глубину, а также детально анализировать рельеф морского дна [1]–[3]. В случае большой удаленности до исследуемого объекта требуется высокий уровень точности данных о СЗ, причем не только в точке измерений, но и на всем пути распространения звука [4, 5]. Совокупность таких данных образует карту распределения СЗ в водном пространстве по глубине [6]. Отметим, что в большинстве случаев нет возможности использования стандартных методов измерения СЗ, которые требуют заранее известные расстояния от измерительного прибора до объекта, поэтому используется метод расчета по формуле Вильсона, включающей в себя местную соленость, электрическую проводимость и температуру. При измерении температуры приборный комплекс погружается в воду на расстояние вплоть до 1000 м и постоянно проводит измерения характеристик воды. Значения солености и электрической проводимости не зависят от текущего состояния прибора, в то время как температуры подвержены большому неопределенностям, которые возникают из-за тепловой инерции комплекса [7]. Тепло, запасенное в его массе, передается на термистор, искажая его показания. Из-за этого его температура может отличаться от температуры окружающей среды (воды) на величину вплоть до 0,5°C при погружении со скоростью 1 м/с. Такой уровень отклонения увеличивает неопределенность расчета СЗ до 2,4 м/с, что при измерении расстояния акустическим методом для дистанции 10 км дает ошибку порядка 16 м. Имеется необходимость в снижении такой высокой неопределенности для увеличения точности гидроакустического пеленгования [8, 9].

Существующие методы измерения температуры воды погружными приборными комплексами основаны только на контактном методе, в котором температура воды передается на термистор с помощью конвекции [5, 7]. Имеются модификации, связанные с коррекцией случайных погрешностей [10], однако проблема методических неопределенностей, описанных ранее, до сих пор не разрешена. Очевидное решение заключается в умень-

шении скорости погружения измерительного комплекса, однако такой способ не позволяет оперативно получать информацию о вертикальном профиле температуры и, соответственно, о скорости звука.

Постановка задачи и цель исследований

Необходимо восстановить значение нестационарной температуры воды при погружении измерительного комплекса и оценить уменьшение методической неопределенности восстанавливаемой величины при использовании метода параметрической идентификации. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи.

1. Выполнить моделирование процесса погружения измерительного комплекса в условиях снижения температуры воды в пакете SolidWorks FlowSimulation для получения графика изменения температуры термистора.

2. На основе расчетных температур осуществить восстановление температуры воды с помощью решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) методом параметрической идентификации.

3. Провести сравнение неопределенности температуры при ее измерении контактным методом и восстановлении методом параметрической идентификации.

Для создания геометрической модели (рис. 1), определения нестационарной температуры всего измерительного комплекса и, в частности, термистора используется программа Solid Works FlowSimulation 2021.

Отметим, что модель выбрана простой для облегчения расчетов. Оба метода измерения температуры, которые рассмотрены в работе — контактный и параметрической идентификации — позволяют усложнять геометрическую модель и уточнять параметры на основе имеющего образца.

Измерительный комплекс в начальный момент времени поддерживается на поверхности воды до установления температурного равновесия. Затем начинает погружаться с постоянной скоростью 1 м/с. Температура

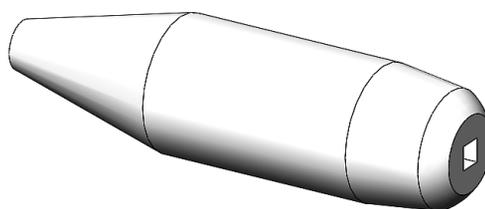


Рис. 1. Геометрическая модель и чертеж погружного измерительного комплекса, черный — чувствительный элемент (термистор)

Fig. 1. Geometric model and drawing of a submersible measuring complex, black rectangle insensitive element (thermistor)

воды и ее давление изменяется по приведенному закону (табл. 1).

Тело измерительного комплекса целиком выполнено из титанового сплава ВТ 1–0, корпус термистора — сталь 20. Свойства выбранных материалов приведены в табл. 2 [11, 12].

Таблица 1

Распределение температуры и давления воды по глубине

Table 1

Distribution of water temperature and pressure by depth

Глубина, м	Температура воды, °С	Давление, МПа
0	16	0,1
200	15,5	2,1
1000	3,8	10,1

Таблица 2

Теплофизические свойства используемых материалов

Table 2

Thermophysical properties of the materials used

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м³
ВТ1-0	18,8	540	4505
Сталь 20	51	486	7860

Моделирование процесса погружения

В программе FlowSimulation поведение однофазной неизотермической жидкости описывается уравнениями сохранения движения, массы и энергии. Для сжимаемой жидкости уравнение сохранения массы примет следующий вид [13]:

$$\frac{d\rho}{d\tau} + \nabla(\rho v) = 0, \quad (1)$$

где ρ — плотность, τ — время, v — скорость.

Уравнение количества движения:

$$\frac{d}{dt}(\rho v) + \nabla(\rho v^2) = -\nabla p + \nabla(\overset{\tau}{\tau}) + \rho g, \quad (2)$$

где p — давление; $\overset{\tau}{\tau}$ — тензор напряжений; g — ускорение свободного падения.

Уравнение сохранения энергии представляет собой закон сохранения тепла для элементарной ячейки:

$$\frac{d}{d\tau}(\rho E) + \nabla(v(\rho E + p)) = \nabla\left(\lambda_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + \left(\overset{\tau}{\tau} v\right)\right) + s, \quad (3)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2},$$

где λ_{eff} — эффективная теплопроводность среды с учетом турбулентных эффектов; J_i — скорость диффузионного потока; $\overset{\tau}{\tau}$ — тензор вязких напряжений; s — источник

теплоты, в том числе теплоты плавления; T_i — температура элементарной ячейки; h — удельная энтальпия ячейки за счет теплоемкости.

$$h = h_i + \int_{T_i}^T c_p dT,$$

здесь h_i и T_i — начальное значение энтальпии и средне-объемной температуры ячейки, соответственно; c_p — удельная теплоемкость.

Уравнения (1)–(3) образуют систему уравнений Навье — Стокса. Для описания конвективных эффектов используется приближение Буссинеска, особенностью которого является замена функциональной зависимости плотности от температуры в уравнениях сохранения импульса, массы и энергии на постоянную плотность, за исключением члена, отвечающего за плавучесть в уравнении импульса:

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g,$$

где ρ_0 и T_0 — начальные значения плотности и температуры; β — коэффициент теплового расширения.

Это приближение является точным, пока изменения плотности несущественны.

В результате значение температуры каждой расчетной ячейки является следствием итерационного расчета уравнений (1)–(3). Расчет плотности теплового потока от измерительного комплекса к воде ведется по закону Ньютона — Рихмана по следующей формуле [14, 15]:

$$q = \alpha(T_a - T), \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{eff}}{D},$$

где Nu — число Нуссельта, $Nu = 0,825Re^{0,62}$; Re — число Рейнольдса, $Re = D \cdot v / \mu$; α — коэффициент теплоотдачи от измерительного комплекса к воде; T_a — температура термистора; T — температура воды; D — характерный размер.

При решении задачи используется симметричная постановка, моделируется только четверть всего объема модели. Среднеквадратичное отклонение измерения температуры чувствительным элементом 0,01 °С [16]. Скорость звука в воде определяется формулой Вильсона [17]:

$$c = c_0 + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_P + \Delta c_{T,S,P},$$

где $c_0 = 1449,14$ — опорная величина скорости звука.

$$\Delta c_T = 4,7521T - 4,4532 \cdot 10^{-2}T^2 - 2,6045 \cdot 10^{-4}T^3;$$

$$\Delta c_S = 1,398(S - 35) + 1,692 \cdot 10^{-3}(S - 35)^2;$$

$$\Delta c_P = 0,1603P + 1,0268 \cdot 10^{-5}P^2 + 3,5216 \cdot 10^{-9}P^3;$$

$$\Delta c_{T,S,P} = (S - 35) \left(-1,1244 \cdot 10^{-2}T + 7,7711 \cdot 10^{-7}T^2 + 7,7016 \cdot 10^{-5}P - 1,2943 \cdot 10^{-7}P^2 \right) + P \left(-1,8607 \cdot 10^{-4}T + 7,4812 \cdot 10^{-6}PT \right) - 2,5294 \cdot 10^{-7}TP^2,$$

где Δc_i — коррекция скорости звука в воде по i -му параметру; S — соленость, ‰; P — давление.

Расчет методом параметрической идентификации

В общем случае решение ОЗТ методом параметрической идентификации имеет некоторую особенность, заключающуюся в том, что минимизация функции невязки проводится итерационным одношаговым методом, требующим рассмотрение большого массива данных. Для ускорения расчетов был выбран рекуррентный фильтр Калмана (ФК), позволяющий проводить многошаговое решение. При этом тепловой поток q представляется в виде обобщенного полинома, неизвестные коэффициенты которого определяются с помощью математической модели и результатов измерений [18]:

$$q(\tau) = \sum_{j=1}^r q_j \phi_j(\tau),$$

где $\phi_j(\tau)$ — система базисных функций; q_j — неизвестные коэффициенты, составляющие вектор искомых параметров; r — количество разбиений временной шкалы.

В университете ИТМО разработана программа «Heat Identification» [19], позволяющая решать ОЗТ методом параметрической идентификации с помощью классического ФК. Решение начинается с построения дифференциально-разностной модели, которая представляет из себя систему однородных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями, описывающих процессы теплопереноса в исследуемом теле. Такой модели достаточно для восстановления нестационарного теплового потока в исследуемом объекте [20, 21].

Температура термистора становится известна в ходе его работы, тепловой поток на его поверхности вычисляется методом параметрической идентификации.

В отличие от FlowSimulation, метод параметрической идентификации имеет ряд ограничений. В частности, расчет в одномерных координатах, невозможность расчета гидродинамики.

При моделировании процесса охлаждения измерительного комплекса было отмечено, что изолинии температурного поля в сечении модели имеют примерно одинаковый характер распределения в независимости от скорости погружения и изменения температуры воды (рис. 2). Этот эффект изображен ниже в расчетах с различными внешними условиями. Отметим, что точка на границе раздела твердого тела и жидкой среды, где во внутреннем канале тепловой поток перпендикулярен потоку воды, является наиболее оптимальной для расположения терморезистора. Это связано с тем, что по принципу расчета методом параметрической идентификации тепловой поток должен быть перпендикулярен лицевой поверхности преобразователя теплового потока.

Так как необходимым условием геометрического упрощения от трехмерной к одномерной постановки для задачи теплопроводности является перпендикулярность тепловых потоков каждому расчетному слою, было решено разбить модель вдоль изоповерхностей температуры. Аналогичный подход был использован в работах [22, 23], в котором такое разбиение было проведено без предварительного анализа изолиний из-за очевидности их распределения благодаря цилиндрической и шаровой симметрии геометрической и тепловой моделей. Итоговое разбиение модели изображено на рис. 3, количество расчетных слоев — 20. Члены матрицы управления рассчитываются с учетом площадей контакта слоев и их объема аналогично работам [22, 23].

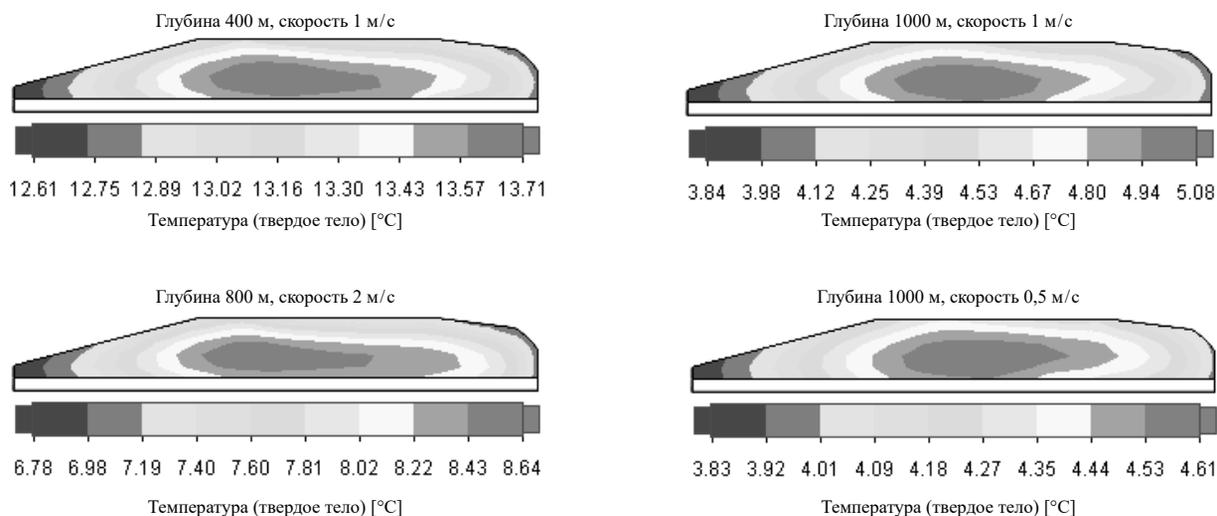


Рис. 2. Температурные поля в сечении измерительного комплекса при различных условиях погружения
Fig. 2. Temperature fields in the cross-section of the measuring complex under different immersion conditions

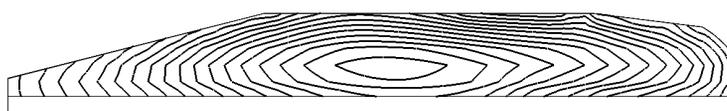


Рис. 3. Разбиение геометрической модели измерительного комплекса на расчетные слои
Fig. 3. Division of the geometric model of the measuring complex into calculation layers

Как и в работе [23], предварительный гидродинамический расчет предоставляет данные о коэффициенте теплоотдачи, которые передаются в качестве входных данных в решение методом параметрической идентификации. Для расчетов была использована модификация классического фильтра Калмана — Unscented Kalman filter, позволяющая решать обратные нелинейные задачи теплопроводности, в частности, те, в которых теплофизические свойства твердых тел зависят от температуры. Так как в данной работе используется коэффициент теплоотдачи, зависящий от температуры и скорости погружения, приведенная задача так же является нелинейной — вектор управления заполняется не числами, а формулами с корректирующими коэффициентами. Их величина зависит от площади смачивания и локальной скорости потока. Как формула, так и корректирующие коэффициенты вычисляются для конкретного измерительного комплекса и меняются при внесении изменения в модель, поэтому эта особенность не является недостатком при анализе теплового состояния серийного изделия.

На (рис. 4) показан график зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры термистора и скорости погружения при корректирующем коэффициенте равном 1.

Полученная формула среднего коэффициента теплоотдачи α с поверхности измерителя скорости звука приведена ниже:

$$\alpha = 149,3 + 3423v + 17,57T - 157v^2 - 5,542vT - 394,6v^3 + 15,39v^2T. \quad (5)$$

На основании приведенного на рис. 4 графика, каждый элемент вектора управления заполняется формульной зависимостью, включающей формулу (5) и корректирующий коэффициент.

Ранее было отмечено, что тепловой поток от измерительного комплекса к воде подчиняется закону Ньютона — Рихмана. Выразим из (4) температуру воды:

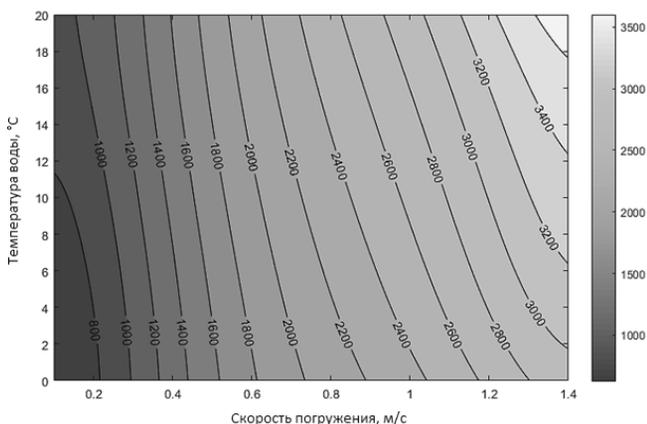


Рис. 4. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи с поверхности измерительного комплекса от температуры термистора и скорости погружения

Fig. 4. Dependence of the average heat transfer coefficient from the surface of the measuring complex on the thermistor temperature and immersion speed

$$T = T_a - \frac{q}{\alpha S}.$$

Таким образом, вычисление температуры воды в точке нахождения измерительного комплекса предложенным методом позволяет исключить методическую неопределенность, возникающую из-за того, что тепловая инерция прибора искажает температурные данные, получаемые с термистора.

Результаты расчета

В процессе расчета было восстановлено значение температуры воды методом параметрической идентификации, а также проведен анализ отклонения восстановленного значения от действительного (рис. 5).

Для расчета и анализа температурного состояния измерительного комплекса был выбран временной шаг $\Delta t = 0,1$ с, при этом время расчета одного такого шага длилось в несколько раз меньше. Из чего был сделан вывод о возможности использования метода параметрической идентификации для оперативной оценки вертикального профиля температуры воды.

Неопределенность температуры воды во время численного расчета выросла вплоть до 0,55 К при ее измерении термистором. При применении метода параметрической идентификации неопределенность держалась на уровне 0,05 К, увеличившись до 0,1 К в момент изменения скорости падения температуры воды с глубиной. Таким образом, в зависимости от вертикального профиля температуры, неопределенность СЗ упала с 2,4 м/с до 0,25 м/с.

Отметим, что, несмотря на вычитание методической части неопределенности, еще случайная составляющая осталась и, более того, увеличилась. Это происходит из-за математической некорректности поставленной задачи, когда малому приращению входного параметра (температуры) соответствует большое изменение выходного (теплового потока).

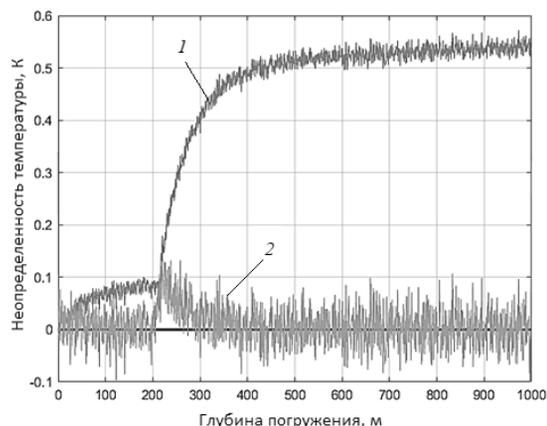


Рис. 5. Неопределенность значения температуры воды, полученного классическим контактным методом (1) и методом параметрической идентификации (2)

Fig. 5. Uncertainty of the water temperature value obtained by the classical contact method (1) and the parametric identification method (2)

Выводы

Рассмотрена проблема методической неопределенности при измерении неравномерной по глубине температуры воды погружным измерительным комплексом, установлена причина возникновения неопределенности — высокая тепловая инерция прибора. Определены величины неопределенности температуры для классического контактного метода. Проведено восстановление температуры воды путем решения обратной задачи теплопроводности методом параметрической идентификации, что позволило учесть методическую неопределенность при измерениях.

Полученные результаты показывают преимущество использования метода параметрической идентификации для восстановления температуры воды, а именно суще-

ственное уменьшение ее неопределенности с 0,55 К до 0,05 К.

Рассчитываемая с учетом температуры воды скорость звука по формуле Вильсона имеет снижает с 2,4 м/с до 0,25 м/с. К недостаткам метода отнесена необходимость в использовании специализированных программ для обработки большого массива данных и обеспечения достаточной вычислительной мощности.

Отмечено, что рост второй производной температуры воды при погружении ведет к увеличению неопределенности ее восстановленного значения при использовании метода параметрической идентификации. Такой эффект требуется дополнительно рассмотреть в работах, посвященных определению динамических доверительных интервалов измерительного комплекса.

Литература

1. Татаренко Е. И., Балашов Д. А. Автономное роботизированное судно для океанологических исследований // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2009. № 2 (24). С. 90–98.
2. Коваленко А. А. Проблема распространения звука в воде // Проблемы науки. 2020. № 1 (49). С. 29–31.
3. Бреховских Л. М., Гордин О. А. Акустика неоднородных сред. Т. 1. Основы теории отражения и распространения звука. М.: Наука, 2007. 442 с.
4. Milne P. H. Underwater Acoustic Positioning Systems. Gulf Publishing Company, 1983, p. 284.
5. Бабий В. И. Проблемы и перспективы измерения скорости звука в океане. Севастополь: ЭКОСИ — Гидрофизика, 2009. 142 с.
6. Каменев Г. А. Распространение акустических импульсов // Материалы VI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». 2014. С. 90–108.
7. Бренев Е. В., Кащеев А. И., Румянцев Д. П., Форошча Е. С. Измеритель скорости звука в морской воде // Геодезия и картография. 1986. № 8. С. 54–56.
8. Бутырский Е. Ю. Теоретические основы гидроакустики и акустика океана: учебное пособие. СПб.: Стратегия будущего, 2022. 738 с.
9. Вильфанд Р. М., Зеленько А. А., Реснянский Ю. Д., Струков Б. С., Цырульников М. Д. Усвоение океанографических данных как одна из ключевых задач оперативной океанологии // Научно-технический сборник «Гидроакустика». СПб: АО «Концерн «Океанприбор», 2023. Т. 53. С. 107–117
10. Греков А. Н., Греков Н. А., Шишкин Ю. Е. Исследование характеристик профилографа скорости звука и коррекция результатов измерения // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 10 (30). С. 24–30.
11. ГОСТ 19807–91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. М., 1991. 9 с.
12. ГОСТ 1050–2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. М., 2014. 36 с.
13. Павловский В. А., Никущенко Д. В. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2018. 368 с.
14. Деменок С. Л. Гидродинамика и теплообмен в шаровых укладках: монография/Деменок С. Л., Медведев В. В., Сивуха С. М. СПб.: Страта, 2012. 192 с.

References

1. Tatarenko E. I., Balashov D. A. Autonomous robotic vessel for oceanographic research. *Bulletin of Samara State Technical University. Series: Technical sciences*. 2009. No. 2 (24). pp. 90–98 (in Russian)
2. Kovalenko A. A. The problem of sound propagation in water. *Problems of science*. 2020. No. 1 (49). pp. 29–31 (in Russian)
3. Brekhovskikh L. M., Godin O. A. Acoustics of inhomogeneous media. Т. 1. Fundamentals of the theory of reflection and propagation of sound. Moscow: Nauka Publ., 2007. 442 p. (in Russian)
4. Milne P. H. Underwater Acoustic Positioning Systems. Gulf Publishing Company, 1983, p. 284.
5. Babiy V. I. Problems and prospects of measuring the speed of sound in the ocean. Sevastopol: ECOSI — Hydrophysics, 2009. 142 p. (in Russian)
6. Kamenev G. A. Propagation of acoustic pulses // Proceedings of the VI International Student Scientific Conference «Student Scientific Forum». 2014. pp. 90–108 (in Russian)
7. Brenev E. V., Kashcheev A. I., Rumyantsev D. P., Foroscha E. S. Sound velocity meter in sea water. *Geodesy and cartography*. 1986. No. 8. pp. 54–56 (in Russian)
8. Butyrsky E. Yu. Theoretical foundations of hydroacoustics and ocean acoustics: a tutorial. St. Petersburg: Strategy of the Future, 2022. 738 p. (in Russian)
9. Vilfand R. M., Zelenko A. A., Resnyansky Yu. D., Strukov B. S., Tsyruльников M. D. Assimilation of oceanographic data as one of the key tasks of operational oceanology. *Scientific and technical collection «Hydroacoustics»*. SPb: JSC «Concern «Okeanpribor». 2023. Vol. 53. pp. 107–117 (in Russian)
10. Grekov A. N., Grekov N. A., Shishkin Yu. E. Study of characteristics of sound velocity profiler and correction of measurement results. *Environmental monitoring systems*. 2017. Iss. 10 (30). pp. 24–30. (in Russian)
11. State standard 19807–91. Titanium and titanium alloys wrought. Brands. Moscow, 1991. 9 p. (in Russian)
12. State standard 1050–2013. Metal products from non-alloyed structural high-quality and special steels. General specifications. Moscow, 2014. 36 p. (in Russian)
13. Pavlovsky V. A., Nikushchenko D. V. Computational fluid dynamics. Theoretical foundations: Tutorial. SPb.: Lan Publishing House, 2018. 368 p. (in Russian)
14. Demenok S. L. Hydrodynamics and heat transfer in spherical packings: monograph/Demenok S. L., Medvedev V. V., Sivukha S. M. SPb.: Strata, 2012. 192 p. (in Russian)

15. Захарова В. Ю., Файзуллин Р. О., Бараненко А. В., Кузнецов П. А. Методика расчета аккумуляторов холода с веществами с фазовым переходом // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2. С. 13–20.
16. Измеритель скорости звука в морской воде РЭ ИСЗ. Методика проверки. ТГИЮ. 416243.004ДЗ.
17. Wilson W. D. Equation for the speed of sound in sea water. // *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1960, vol. 32, N 10, p. 1357.
18. Pilipenko N. V., Zarichnyak Yu. P., Ivanov V. A., Khalyavin A. M. Parametric identification of differential-difference models of heat transfer in one-dimensional bodies based on Kalman filter algorithms. // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2020, vol. 20, no. 4, pp. 584–588. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-584-588
19. Пилипенко Н. В., Кириллов К. В. Алгоритмы программ для решения прямых и обратных задач теплопроводности при использовании дифференциально-разностных моделей // Научно-технический вестник СПб ГУ ИТМО. 2010. № 5. С. 106–110.
20. Пилипенко Н. В. Неопределенность восстановления нестационарного теплового потока путем параметрической идентификации дифференциально-разностных моделей теплопереноса // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60 № 7 С. 664–671. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-664-671
21. Pilipenko N. V., Kolodiychuk P. A., Zarichnyak Yu. P. Differential-difference model of heat transfer in solids using the method of parametric identification. // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2022. vol. 22, no. 6, pp. 1237–1240. DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1237-1240
22. Пилипенко Н. В., Колодийчук П. А., Заричняк Ю. П. Дифференциально-разностная модель теплопереноса в твердых телах с использованием метода параметрической идентификации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1237–1240. DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1237-1240
23. Пилипенко Н. В., Колодийчук П. А., Захарова В. Ю., Файзуллин Р. О. Восстановление нестационарного теплового потока от аккумулятора тепловой энергии путем решения обратной задачи теплопроводности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 3. С. 505–512. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-505-512
15. Zakharova V. Yu., Faizullin R. O., Baranenko A. V., Kuznetsov P. A. Methodology for calculating cold accumulators with substances with a phase transition. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No. 2. pp. 13–20 (in Russian)
16. Sound speed meter in sea water RE satellite. Verification method. ТГИЮ. 416243.004ДЗ (in Russian).
17. Wilson W. D. Equation for the speed of sound in sea water. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1960, vol. 32, N 10, p. 1357
18. Pilipenko N. V., Zarichnyak Yu. P., Ivanov V. A., Khalyavin A. M. Parametric identification of differential-difference models of heat transfer in one-dimensional bodies based on Kalman filter algorithms. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 584–588 (in Russian). DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-584-588
19. Pilipenko N. V., Kirillov K. V. Algorithms of programs for solving direct and inverse heat conduction problems using differential-difference models. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2010. No. 5. pp. 106–110 (in Russian)
20. Pilipenko N. V. Uncertainty in reconstructing a non-stationary heat flow by parametric identification of differential-difference heat transfer models. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering*. 2017. T. 60 No. 7 pp. 664–671 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-664-671
21. Pilipenko N. V., Kolodiychuk P. A., Zarichnyak Yu. P. Differential-difference model of heat transfer in solids using the method of parametric identification. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1237–1240 (in Russian). DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1237-1240
22. Pilipenko N. V., Kolodiychuk P. A., Zarichnyak Yu. P. Differential-difference model of heat transfer in solids using the parametric identification method. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2022. Vol. 22, No. 6. pp. 1237–1240 (in Russian). DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1237-1240
23. Pilipenko N. V., Kolodiychuk P. A., Zakharova V. Yu., Fayzullin R. O. Reconstruction of non-stationary heat flow from a thermal energy accumulator by solving the inverse problem of heat conduction. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2024. Vol. 24, No. 3, pp. 505–512 (in Russian). DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-505-512

Сведения об авторах

Пилипенко Николай Васильевич

Д. т. н., профессор, доцент Образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, pilipenko38@mail.ru

Колодийчук Павел Андреевич

Инженер, аспирант Образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, pkolodiychuk@itmo.ru

Information about authors

Pilipenko Nikolay V.

D. Sc., Professor, Associate professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, pilipenko38@mail.ru

Kolodiychuk Pavel A.

Engineer, Graduate student of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, pkolodiychuk@itmo.ru

