



УДК 536.5

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-РАЗНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ МОНИТОРИНГЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛИДАРА

К.А. Клюквин<sup>а</sup>, Н.В. Пилипенко<sup>а</sup><sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская ФедерацияАдрес для переписки: [klukvins@mail.ru](mailto:klukvins@mail.ru)**Информация о статье**

Поступила в редакцию 11.10.16, принята к печати 05.12.16

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-172-177

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Клюквин К.А., Пилипенко Н.В. Параметрическая идентификация дифференциально-разностных моделей теплопереноса при мониторинге температуры лидара // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 1. С. 172–177. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-172-177**Аннотация**

Рассмотрено использование метода параметрической идентификации дифференциально-разностных моделей теплопереноса в объекте при определении температурного состояния лидара. Задача решена для наружного фланца корпуса – той части устройства, на которую оказывается наибольшее внешнее тепловое воздействие. При исследовании в климатической камере установлено несоответствие истинной температуры фланца и температуры смонтированного на нем термодатчика. Обоснована необходимость компенсации тепловой инерционности измерительной системы с целью уменьшения погрешности. Составлен алгоритм определения нестационарной температуры фланца путем решения прямой задачи теплопереноса. Проведена обратная процедура с целью минимизации несоответствия между истинной температурой объекта и результатами ее измерения. В компьютерной программе проведены вычислительные эксперименты по расчету температурного поля фланца корпуса лидара при известных внешних условиях теплообмена с использованием экспериментальных данных. Результаты экспериментов позволяют судить о величине ошибки, возникающей по причине тепловой инерционности термоизмерительной системы. Показана целесообразность использования предлагаемого метода параметрической идентификации дифференциально-разностной модели теплопереноса в объекте для уменьшения погрешности при мониторинге и контроле температуры устройства.

**Ключевые слова**

температура лидара, тепловой поток, тепловая инерционность, параметрическая идентификация, погрешность

## PARAMETRICAL IDENTIFICATION OF DIFFERENTIAL-DIFFERENCE HEAT TRANSFER MODEL DURING LIDAR TEMPERATURE MONITORING

К.А. Klyukvin<sup>а</sup>, N.V. Pilipenko<sup>а</sup><sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian FederationCorresponding author: [klukvins@mail.ru](mailto:klukvins@mail.ru)**Article info**

Received 11.10.16, accepted 05.12.16

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-172-177

Article in Russian

**For citation:** Klyukvin K.A., Pilipenko N.V. Parametrical identification of differential-difference heat transfer model during lidar temperature monitoring. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 172–177. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-172-177**Abstract**

The paper deals with the parametrical identification method of differential-difference heat transfer models during determining of lidar temperature condition. The problem is solved for enclosure external flange that is the most thermally influenced device part. During researches carried out in a climatic chamber, discrepancy of the both flange temperature and mounted on it sensor temperature is detected. The need of measuring system thermal inertia compensation for the purpose of error decrease is proved. The algorithm for transient flange temperature determining by forward heat transfer problem solution is formed. The inverse procedure is carried out for the purpose of discrepancy minimizing between true object temperature and measured temperature. Computational experiments are carried out for calculating lidar enclosure flange temperature field under known external heat transfer conditions with the use of special computer program and experimental data. The experiment results enable to conclude about the value of error emerging because of temperature measuring system thermal

inertia. We show application feasibility for proposed method of parametrical identification of differential-difference heat transfer model in object for error decrease during the device temperature monitoring and control.

### Keywords

lidar temperature, heat flux, thermal inertia, parametrical identification, error

### Введение

Лидар – оптико-электронное устройство, предназначенное для зондирования жидкой или газообразной светорассеивающей среды [1, 2]. Его компоненты – источник и приемник излучения, платы управления и контроля и иные оптические элементы – требуют контроля и поддержания заданного теплового режима работы [3–6]. При лабораторных исследованиях прибора были выявлены сильные изменения пропускных характеристик фильтрующих и поляризирующих оптических элементов при изменении температуры окружающей среды в рабочем диапазоне (от  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). В связи с этим возникла необходимость детального исследования тепловых режимов работы опытных образцов непосредственно в условиях, близких к рабочим.

Из-за сложности задачи определения теплового режима всего прибора считается возможным на первом этапе исследований определить температуру той части корпуса лидара, на которую оказывается наибольшее внешнее тепловое воздействие. Полученные результаты позволят в дальнейшем вносить поправки при обработке сигналов и проводить диагностику работы прибора.

В настоящее время мониторинг температурного состояния прибора осуществляется путем непосредственного автоматизированного снятия показаний терморезистора, расположенного в заглиблении на внутренней поверхности наружного фланца корпуса лидара, который непосредственно контактирует с внешней исследуемой средой (рис. 1).

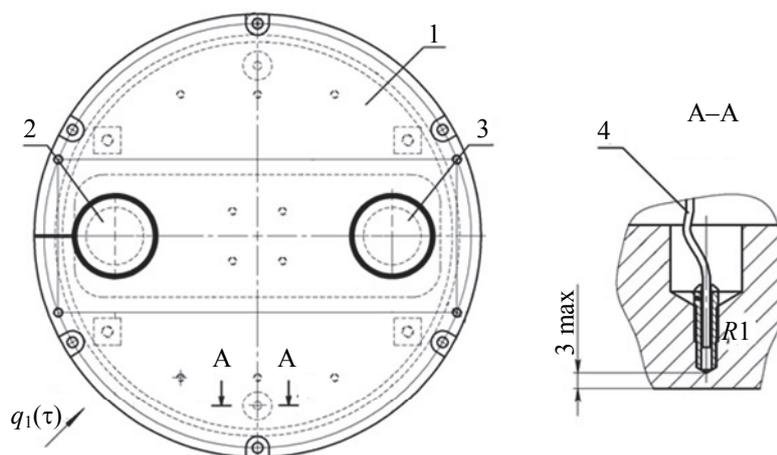


Рис. 1. Общий вид объекта исследования: 1 – фланец; 2, 3 – входное и выходное окна; 4 – терморезистор;  $q_1(\tau)$  – внешнее тепловое воздействие

Такой способ характеризуется погрешностью, появляющейся в значительной степени по причине высокой инерционности системы [7]. В связи с этим возникает необходимость решения модельной тепловой задачи с целью компенсации тепловой инерционности объекта и определения истинных значений температуры корпуса прибора.

Задачу предлагается решать с использованием метода параметрической идентификации дифференциально-разностной математической модели теплопереноса. Такой способ позволяет в режиме реального времени получать распределения температуры по толщине фланца; снизить величину ошибки, возникающей из-за низкой скорости прохождения температурной волны через материал корпуса прибора; автоматизировать процесс мониторинга теплового состояния лидара; оценивать погрешность восстановления теплового состояния системы [8, 9].

### Описание предлагаемого способа

Параметрическая идентификация математической модели теплопереноса состоит в одновременном решении следующих задач: прямой задачи теплопереноса с целью определения расчетного распределения температуры по объекту в каждый из моментов времени и обратной процедуры с целью корректирования расчетных значений на основании данных, получаемых от измерительного преобразователя температуры [8, 9].

Для удобства компьютерной реализации выбрана дифференциально-разностная модель (ДРМ) теплопереноса с последующей ее параметрической идентификацией [3, 4, 8, 10, 11]. Для минимизации

функции невязки [8–13], характеризующей разницу между результатом измерения и расчета температуры, предложен алгоритм фильтра Калмана.

Дифференциально-разностная модель составлена при тех допущениях, что результирующий тепловой поток распространяется только по толщине фланца, глухие технологические отверстия, проточки, а также входное и выходное окна слабо влияют на температурное поле фланца в окрестности точки измерения температуры, а теплофизические свойства всех материалов не зависят от температуры.

В этом случае упрощенная геометрическая модель фланца имеет вид цилиндра, а ДРМ состоит из 36 дифференциальных уравнений первого порядка для температуры и двух уравнений для неизвестной внешней нестационарной плотности теплового потока.

Подробное описание процесса составления и структуры дифференциально-разностных моделей теплопереноса дано в [8–11]. Для рассматриваемой системы ДРМ теплопереноса имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{R}(\tau) = \mathbf{F}_R \cdot \mathbf{R}(\tau) + \mathbf{G}_R \cdot \mathbf{U}(\tau), \quad (1)$$

где  $\mathbf{R}(\tau)$  – вектор состояния, куда входят распределение температуры по толщине фланца и плотность внешнего теплового потока;  $\mathbf{U}(\tau)$  – вектор управления, содержащий также плотности тепловых потоков, действующих на фланец изнутри и снаружи корпуса прибора;  $\mathbf{F}_R$  – матрица обратных связей, содержащая информацию о теплофизических свойствах материалов системы;  $\mathbf{G}_R$  – матрица управления, содержащая информацию о том, насколько легко система откликается на управляющие воздействия, определяемые вектором  $\mathbf{U}(\tau)$ .

При компьютерной реализации алгоритма необходима дискретизация времени. В этом случае общее решение уравнения (1) будет иметь следующий вид [8–11]:

$$\mathbf{R}_{k+1/k} = \Phi_{R,k+1} \cdot \mathbf{R}_{k/k} + \frac{1}{2} (\mathbf{I} + \Phi_{R,k+1}) \cdot \mathbf{G}_R \cdot \mathbf{U}_k \cdot \Delta\tau, \quad (2)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Важной величиной является переходная матрица  $\Phi_{R,k+1}$ , составляющие которой описывают переходный от текущего к следующему моменту времени процесс для каждого из блоков разбиения (дискретизации) модели системы при единичном управляющем воздействии. Данная матрица позволяет предсказывать температурное состояние объекта в следующий момент времени по имеющейся информации на текущий момент времени.

В качестве связки между измеренным значением температуры и ее расчетным значением для точки измерения выступает вектор измерения  $\mathbf{Y}_{k+1}$ , определяемый следующим векторно-матричным выражением [8–11]:

$$\mathbf{Y}_{k+1} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{R}_{k+1/k} + \boldsymbol{\varepsilon}_k,$$

где  $\mathbf{H}$  – матрица измерений, содержащая информацию о том, где расположены измерительные преобразователи температуры, сколько их, какая температура ими измеряется (среднеобъемная, перепад температур, локальная температура в точках и т.д.),  $\boldsymbol{\varepsilon}_k$  – вектор измерительных погрешностей.

Разработанный алгоритм решения задачи параметрической идентификации является важной частью определения температурного состояния корпуса лидара и представлен ниже.

1. С использованием априорно заданных начальных оценок состояния системы (так называемые условия входа в алгоритм) – для первого момента времени, либо с использованием значений, полученных на предыдущих шагах цикла, – для второго и последующих моментов времени оценивается вектор теплового состояния для следующего момента времени по формуле (2).
2. Оценивается ковариационная матрица ошибок оценок вектора состояния:

$$\mathbf{P}_{k+1/k} = \Phi_{R,k+1} \cdot \mathbf{P}_{k/k} \cdot \Phi_{R,k+1}^T.$$

3. Рассчитывается весовая матрица, определяющая вес разницы между результатами измерения и расчета температуры:

$$\boldsymbol{\kappa}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1/k} \cdot \mathbf{H}_R^T \cdot (\mathbf{H}_R \cdot \mathbf{P}_{k+1/k} \cdot \mathbf{H}_R^T + \mathbf{R}),$$

где  $\mathbf{H}_R$  – матрица функций чувствительности результатов расчета вектора состояния  $\mathbf{R}_{k+1}$  к малому изменению внешнего управляющего воздействия (неизвестного теплового потока),  $\mathbf{R}$  – ковариационная матрица случайного измерительного шума.

4. С использованием рассчитанной по п. 3 весовой матрицы, а также информации, полученной на текущий момент времени с датчика температуры, уточняется вектор состояния для текущего момента времени:

$$\mathbf{R}_{k+1/k+1} = \mathbf{R}_{k+1/k} + \boldsymbol{\kappa}_{k+1} \cdot (\mathbf{Y}_{k+1} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{R}_{k+1/k}).$$

5. Также с использованием весовой матрицы уточняется оцененное по п. 2 значение ковариационной матрицы ошибок оценок вектора состояния:

$$\mathbf{P}_{k+1/k+1} = \mathbf{P}_{k+1/k} - \mathbf{K}_{k+1} \cdot \mathbf{H}_R \cdot \mathbf{P}_{k+1/k}.$$

В описанном алгоритме индексация некоторых величин двойная: первый индекс показывает, для какого момента дискретного времени определяется оценка, второй – до какого момента времени включительно имеется входная информация.

### Основные результаты работы

Для рассматриваемой системы был проведен ряд вычислительных экспериментов в компьютерной программе Heat Identification, реализующей выполнение изложенного выше алгоритма решения.

В расчетную программу вводятся все параметры решаемой задачи: начальные оценки вектора температурного состояния, матрицы измерений и ошибок, теплофизические свойства материалов моделируемой системы, граничные условия теплообмена, показания датчика температуры и другие.

Показания датчика температуры получены при исследовании прибора в климатической камере, причем в первые 8000 с эксперимента температура воздуха в камере снижалась от комнатной до  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ , а в оставшиеся 3400 с повышалась от  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  до  $+30\text{ }^\circ\text{C}$ . Скорость изменения температуры воздуха – около 1,5 К/мин.

В рассматриваемом случае граничные условия на внутреннем торце фланца известны – постоянная плотность теплового потока (собственные тепловыделения в функциональных элементах лидара)  $q(\tau) = 14\text{ Вт}$ . На наружном торце фланца действуют граничные условия теплообмена III рода (конвективный теплообмен), ориентировочное значение коэффициента теплоотдачи составляет  $\alpha = 30\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , температура окружающей среды задается в виде следующих импульсов:

$$\begin{cases} t_{\text{ср}}(\tau) = -20\text{ }^\circ\text{C}, & \tau \in [0; 8000); \\ t_{\text{ср}}(\tau) = 30\text{ }^\circ\text{C}, & \tau \in [8000; 11401]. \end{cases}$$

Теплофизические свойства материалов соответствуют справочным данным для нержавеющей стали, приведенным, например, в [14].

Показания датчика температуры, снимавшиеся в процессе исследования, графически представлены на рис. 2 (отмечены крестиком).

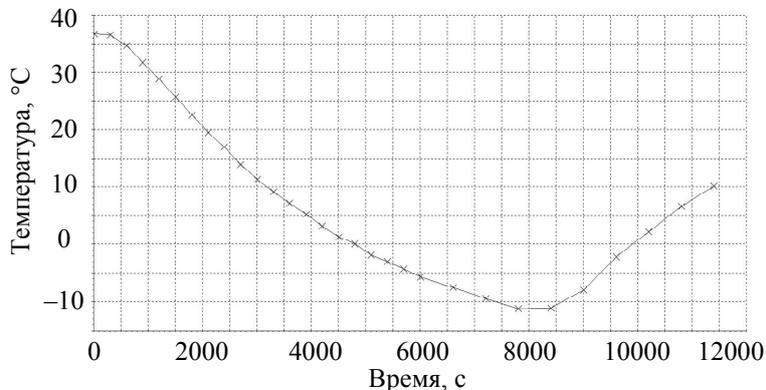


Рис. 2. Показания датчика температуры

Поскольку расчетная программа требует, чтобы показания датчика были приведены для каждого момента времени (т.е., с учетом шага по времени 0,1 с, должно быть 114010 значений), в математическом пакете Scilab 5.5.2 было выполнено интерполирование значений, результат которого представлен на рис. 2.

Результат вычислительного эксперимента приведен на рис. 3. Как видно из рис. 3, при сравнительно небольшой величине внешнего теплового воздействия при  $\alpha = 30\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  перепад температуры по толщине фланца составляет около 0,5–1 °C. В этой связи при необходимости контролировать температуру поверхностей фланца с точностью хотя бы до 0,5 °C можно рекомендовать к применению рассмотренную в настоящей работе методику.

Поскольку рассматриваемый прибор предназначен для гидрологических исследований, то в условиях использования его по назначению величина внешнего теплового воздействия будет на порядок выше, так как коэффициент теплоотдачи в воде, как известно [15], имеет величину  $10^2 - 10^3\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  в зависимости от режима обтекания. Ясно, что при таком воздействии, при прочих равных условиях, пере-

пад температуры по толщине фланца будет заметно больше, чем при исследовании в климатической камере.

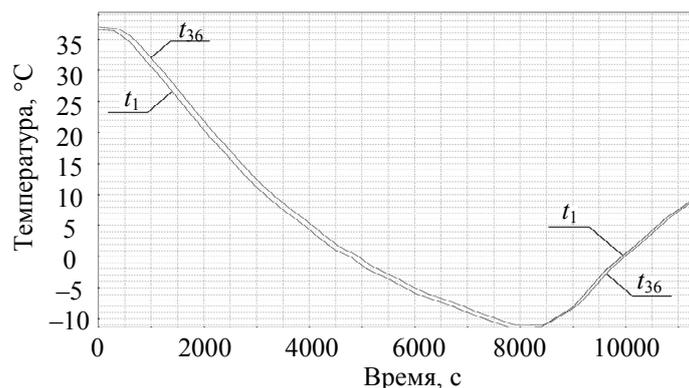


Рис. 3. Изменение температуры внутренней и наружной поверхностей фланца:  $t_1$  – температура наружной поверхности,  $t_{36}$  – температура внутренней поверхности

### Заключение

В работе рассмотрено применение метода параметрической идентификации дифференциально-разностной математической модели теплопереноса в наружном фланце корпуса лидара с целью мониторинга его температуры. Знание температуры корпуса прибора необходимо для диагностики, внесения поправок при обработке сигналов прибора, а также детального исследования режимов работы прибора в условиях его использования по назначению.

При исследовании лидара в климатической камере получен ряд показаний штатного приборного датчика температуры при известных внешних тепловых воздействиях. С использованием экспериментальных данных в компьютерной программе, реализующей метод параметрической идентификации дифференциально-разностной модели теплопереноса в объекте, проведен ряд вычислительных экспериментов, показывающих величину отклонения результатов измерений от истинных значений температуры в заданных местах корпуса лидара. На основании указанной величины отклонения сделан вывод о том, что с целью компенсации тепловой инерционности измерительной системы при мониторинге и контроле температурного состояния лидара можно рекомендовать к использованию метод параметрической идентификации дифференциально-разностной модели теплопереноса в наружном фланце его корпуса.

### Литература

1. Зуев В.Е., Зуев В.В. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 8. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 232 с.
2. Степанов А.И., Рогов С.А., Карпов С.Н., Кондрашов В.А., Мальков С.А., Сачава С.И., Самарцев М.С., Спивак Л.А., Тершуков В.А. Судовой лидар для гидрологических исследований // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 2. С. 43–49.
3. Клюквин К.А., Пилипенко Н.В. Тепловой режим лидара // Сборник трудов III Международной научно-практической конференции Sensorica-2015. СПб., 2015.
4. Клюквин К.А., Пилипенко Н.В. Исследование теплового режима лидара // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб., 2016. Т. 2. С. 307–308.
5. Мезенов А.В., Сомс Л.Н., Степанов А.И. Термооптика твердотельных лазеров. Л.: Машиностроение, 1986. 199 с.
6. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Прикладная физика: теплообмен в приборостроении. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2003. 560 с.
7. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. 2-е изд. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
8. Пилипенко Н.В. Методы и приборы нестационарной теплотерии на основе решения обратных задач теплопроводности. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 180 с.
9. Симбирский Д.Ф. Температурная диагностика двигателей. Киев: Техника, 1976. 208 с.
10. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотерии. Часть 1. // Изв. Вузов.

### References

1. Zuev V.E., Zuev V.V. *Modern Problems of Atmospheric Optics*. V. 8. Distance Optical Probing of Atmosphere. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992, 232 p.
2. Stepanov A.I., Karpov S.N., Kondrashov V.A., Sachava S.I., Samartsev M.S., Spivak L.A., Tershukov V.A., Rogov S.A., Mal'kov S.A. Shipborne lidar for hydrological research. *Journal of Optical Technology*, 2008, vol. 75, no. 2, pp. 101–106.
3. Klyukvin K.A., Pilipenko N.V. Heat mode of lidar. *Sbornik Trudov III Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii Sensorica-2015*. St. Petersburg, 2015. (In Russian)
4. Klyukvin K.A., Pilipenko N.V. Investigation of the thermal mode of lidar. *Al'manakh Nauchnykh Rabot Molodykh Uchenykh Universiteta ITMO*. St. Petersburg, 2016, vol. 2, pp. 307–308. (In Russian)
5. Mezenov A.V., Soms L.N., Stepanov A.I. *Thermo-Optics of Solid-State Lasers*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986, 199 p. (In Russian)
6. Kondrat'ev G.M., Dul'nev G.N., Platonov E.S., Yaryshev N.A. *Prikladnaya Fizika: Teploobmen v Priborostroenii* [Applied Physics: Heat Transfer in Instrumentation]. St. Petersburg, SPbSU ITMO, 2003, 560 p.
7. Yaryshev N.A. *Theoretical Basis of Non-Stationary Measurement of Temperature*. 2<sup>nd</sup> ed. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990, 256 p. (In Russian)
8. Pilipenko N.V. *Methods and Devices for Unsteady Heat Measuring Based on the Solution of Inverse Heat Conduction Problems*. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2011, 180 p. (In Russian)

- Приборостроение. 2003. Т. 46. № 8. С. 50–54.
11. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии. Часть 2. // Изв. Вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 10. С. 67–71.
  12. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
  13. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 284 с.
  14. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: учебное пособие. 2-е изд. М.: Издательство МЭИ, 2005. 550 с.
  15. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
9. Simbirskii D.F. *Temperaturnaya Diagnostika Dvigateli* [Thermal Diagnosis of Engines]. Kiev, Tekhnika Publ., 1976, 208 p.
  10. Pilipenko N.V. Methods of parametric identification in the non-stationary heat metering. Part 1. *Journal of Instrument Engineering*, 2003, vol. 46, no. 8, pp. 50–54. (In Russian)
  11. Pilipenko N.V. Methods of parametric identification in the non-stationary heat metering. Part 2. *Journal of Instrument Engineering*, 2003, vol. 46, no. 10, pp. 67–71. (In Russian)
  12. Alifanov O.M. *Obratnye Zadachi Teploobmena* [Inverse Problems of Heat Transfer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 280 p.
  13. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody Resheniya Nekorrektnykh Zadach* [Methods for Solving Ill-Posed Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 284 p.
  14. Tsvetkov F.F., Grigor'ev B.A. *Heat and Mass Transfer*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, MEI Publ., 2005, 550 p. (In Russian)
  15. Dul'nev G.N. *Teplo- i Massoobmen v Radioelektronnoi Apparature* [Heat and Mass Transfer in Electronic Equipment]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1984, 247 p.

### Авторы

**Клюквин Кирилл Александрович** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, klukvins@mail.ru

**Пилипенко Николай Васильевич** – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Pilipenko38@mail.ru

### Authors

**Kirill A. Klyukvin** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, klukvins@mail.ru

**Nikolay V. Pilipenko** – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Pilipenko38@mail.ru