


Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 1. С. 25–31  
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 1, pp. 25–31

Научная статья  
УДК 536.212  
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187439>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/NGTXNM>

## Температурное поле цилиндра с внутренним стационарным источником теплоты и оболочки эллиптических сечений при смешанных граничных условиях

А.И. Канарейкин 

*Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Российская Федерация*  
*kanareykina@mail.ru *

**Аннотация.** В статье производится расчет температурного поля цилиндра с внутренним источником теплоты и окружающей его оболочки эллиптических сечений при граничных условиях четвертого рода. На поверхности оболочки происходит конвективный теплообмен с окружающей средой. Кроме того, оболочка подвергается одностороннему нагреву лучистым тепловым потоком. При этом сама задача является стационарной. Решение находится аналитически при переходе к системе эллиптических координат. Установлено, что температурное поле по сечению цилиндра и окружающей его оболочки меняется по закону косинуса. Из решения получено соотношение для расчета распределения температуры по поверхности оболочки. Предложенная математическая модель и алгоритм ее решения предназначен для проведения в инженерных расчетах теплообменных аппаратов, солнечных коллекторов и топливных стержней ядерных реакторов, использующих каналы эллиптической формы.

**Ключевые слова:** теплообмен, температурное поле, эллиптическое сечение, граничные условия четвертого рода, тепловой поток, уравнение баланса тепловых потоков, эллиптический интеграл

**Для цитирования.** Канарейкин А.И. Температурное поле цилиндра с внутренним стационарным источником теплоты и оболочки эллиптических сечений при смешанных граничных условиях // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 1. С. 25–31. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187439>

Original article

## Temperature field of a cylinder with an internal stationary heat source and an elliptical shell under mixed boundary conditions

A.I. Kanareykin 

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation  
kanareykins@mail.ru 

**Abstract.** Heat exchangers are widely used in many areas of economic activity, aerospace, energy, chemical, oil refining, food industry, refrigeration and cryogenic equipment, heating systems, hot water supply, air conditioning, various heat engines. Due to the increase in the energy armament of spacecraft, the energy intensity of devices, and the increased requirements for possible modes of regulating systems, the issue of studying possible processes of heat exchange intensification is quite relevant. It is especially important to reduce the weight and size characteristics of heat exchangers due to the intensification processes.

As you know, for the best cooling of the elements, a large surface for heat transfer is required. The surface can be increased either by finning, or by replacing rods of circular cross-section, which have a minimum area, with other rods with an increased cross-section, for example, with an oval or elliptical cross-section.

Elliptical tube heat exchangers occupy a special place. Elliptical tube heat exchangers are increasingly being used in various industrial products. Their peculiarity is that by manipulating the length of the semi-axes of the ellipse, it is possible to obtain accurate analyses of stationary thermal conductivity problems for a very wide range of shape changes: from a cylinder (the semi-axes of the ellipse are equal) to a thin plate (one of the semi-axes is significantly larger than the other).

However, the temperature distribution in a body of elliptical cross-section under given boundary conditions has not been sufficiently studied. The article calculates the temperature field of a cylinder with an internal heat source and an elliptical shell surrounding it under boundary conditions of the fourth kind. Convective heat exchange with the environment takes place on the shell surface. In addition, the shell is subjected to unilateral heating by a radiant heat flow. At the same time, the task itself is stationary. The solution is found analytically when moving to the elliptical coordinate system. It is established that the temperature field along the section of the cylinder and its surrounding shell varies according to the law of cosine. From the solution, a ratio is obtained for calculating the temperature distribution over the shell surface. The proposed mathematical model and its solution algorithm are intended for engineering calculations of heat exchangers, solar collectors and fuel rods of nuclear reactors using elliptical channels.

**Keywords:** heat transfer, temperature field, elliptical cross section, boundary conditions of the fourth kind, heat flow, heat flow balance equation, elliptic integral

**For citation.** Kanareykin A.I. Temperature field of a cylinder with an internal stationary heat source and an elliptical shell under mixed boundary conditions. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 1, pp. 25–31. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187439>

### 1. Введение

Теплообменные аппараты нашли широкое применение во многих областях хозяйственной деятельности, авиационно-космической, энергетической, химической, нефтеперерабатывающей,

пищевой промышленности, холодильной и криогенной технике, в системах отопления, горячего водоснабжения, кондиционирования, различных тепловых двигателях. В связи с ростом энерговооруженности космических аппаратов, энерго-

напряженности устройств, повышением требований к возможным режимам регулирования систем достаточно актуально стоит вопрос изучения возможных процессов интенсификации теплообмена. Особенно имеет большое значение уменьшение массогабаритных характеристик теплообменников за счет процессов интенсификации.

Для оптимального охлаждения элементов необходима большая поверхность для теплоотдачи. Поверхность может быть увеличена либо оребрением, либо посредством замены стержней круглого сечения, которые имеют минимальную площадь, на другие стержни с увеличенным сечением, например, с овальным или эллиптическим сечением [1–8].

Особое место занимают теплообменники с эллиптическими трубами. Эллиптические трубчатые теплообменники находят все большее применение в различных промышленных изделиях [9–11]. Их особенность состоит в том, что, манипулируя изменением длины полуосей эллипса, удается получить точные аналитические решения стационарных задач теплопроводности для весьма широкого диапазона изменения формы: от круглого цилиндра (полуоси равны) до вытянутого эллипса (одна из полуосей существенно превышает другую) [12–17].

Основной задачей данной работы является нахождение распределения температурного поля цилиндра с эллиптическим поперечным сечением с внутренним источником теплоты, а также окружающей его оболочки. При этом предполагается, что тепловой контакт между цилиндром и оболочкой в системе твердое тело – покрытие является идеальным [18]. Также между оболочкой и окружающей средой происходит конвективный теплообмен по закону Ньютона. При этом происходит нагрев оболочки плоскопараллельным лучистым тепловым потоком от бесконечно удаленного источника излучения.

Научная новизна исследования заключается в том, что в работе учтен лучистый тепловой поток, излучаемый бесконечно удаленным источником.

## 2. Материалы и методы

В качестве материала исследования использованы публикации в научных журналах по теме статьи. Решение поставленной задачи проводится аналитически при переходе от декарто-

вой системы к системе эллиптических координат. Основными методами решения являются метод дифференцирования, интегрирования, подстановки и разложения в ряд.

## 3. Результаты

В решении, в качестве элемента конструкции рассматривается цилиндр бесконечной длины, сечение которого представляет собой эллипс с полуосями  $a_1$  и  $b_1$ , внутри которого действует источник теплоты с удельной мощностью  $q_v$ . При этом эллиптический цилиндр находится внутри оболочки с полуосями  $a_2$  и  $b_2$ , внутри которой отсутствует источник теплоты. На поверхности оболочки происходит конвективный теплообмен с окружающей средой. Кроме того, оболочка подвергается одностороннему нагреву лучистым тепловым потоком плотностью  $q_{v, \text{луч}}$  (рис. 1).

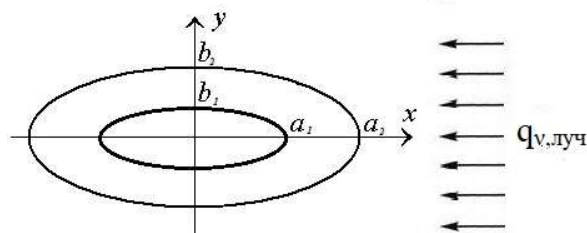


Рис. 1. Эллиптический цилиндр в оболочке

Распределение плотности лучистого теплового потока  $q_{\text{луч}}$  по поверхности эллиптической стенки представляется законом:

$$q_{v, \text{луч}} = q_{\text{луч}} \cos \nu. \quad (1)$$

где:  $q_{\text{луч}}$  – максимальный лучистый тепловой поток при угле падения потока  $\nu = 0$ .

Чтобы найти распределение температуры по сечению цилиндра, необходимо решить дифференциальное уравнение Пуассона в частных производных:

$$\Delta T + \frac{q_v}{\lambda_1} = 0, \quad (2)$$

где:  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности материала цилиндра.

Для получения соотношения, описывающего температурное поле, перейдем к эллиптической системе координат. Уравнение Пуассона (2) в данной системе имеет вид

$$\frac{1}{c_1^2(ch^2\mu - \cos^2\nu)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \mu^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \nu^2} \right) = -\frac{q_v}{\lambda_1}, \quad (3)$$

где  $c_1 = \sqrt{a_1^2 - b_1^2}$ .

Температурное поле оболочки определяется уравнением Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \mu^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial \nu^2} = 0. \quad (4)$$

Уравнение баланса тепловых потоков на поверхности оболочки имеет вид

$$\lambda_2 \text{grad} T = q_{v, \text{вн}} - \alpha(T - T_0), \quad (5)$$

где:  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи между средой и поверхностью цилиндра  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности оболочки,  $T_0$  – температура окружающей среды.

Подстановка вида

$$T = U(\mu, \nu) - \frac{q_v c_1^2}{4\lambda_1} (sh^2\mu + \cos^2\nu) \quad (6)$$

преобразует уравнение Пуассона (3) в уравнение Лапласа (4). Решение уравнения (4) будем искать в виде ряда

$$U(\mu, \nu) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n chn\mu \cos n\nu + B_n shn\mu \sin n\nu). \quad (7)$$

Из соображений симметрии следует положить  $B_n = 0$ , тогда

$$U(\mu, \nu) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n chn\mu \cos n\nu. \quad (8)$$

Тогда выражение для определения температурного поля цилиндра примет вид

$$T_1 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n chn\mu \cos n\nu - \frac{q_v c_1^2}{4\lambda_1} (sh^2\mu + \cos^2\nu). \quad (9)$$

Температурное поле оболочки определяется уравнением Лапласа (4), решение которого имеет вид

$$T_2(\mu, \nu) = \sum_{n=0}^{\infty} D_n chn\mu \cos n\nu + E\mu. \quad (10)$$

Воспользуемся условием равенства температурных полей на границе их соприкосновения

$$T_1|_{\mu=\mu_1} = T_2|_{\mu=\mu_1}, \quad (11)$$

тогда

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n chn\mu_1 \cos n\nu - \frac{q_v c_1^2}{4\lambda_1} (sh^2\mu_1 + \cos^2\nu) = \sum_{n=0}^{\infty} D_n chn\mu_1 \cos n\nu + E\mu_1. \quad (12)$$

Откуда выражение для определения температурных полей цилиндра и оболочки примут вид

$$T_1(\mu, \nu) = Ach2\mu \cos 2\nu - \frac{q_v c_1^2}{4\lambda_1} (sh^2\mu + \cos^2\nu) + C, \quad (13)$$

$$T_2(\mu, \nu) = Dch2\mu \cos 2\nu + E\mu + F, \quad (14)$$

где с учетом применения тригонометрических формул коэффициенты  $A$  и  $F$  равны

$$F = C - E\mu_1 - \frac{q_v c_1^2}{4\lambda_1} \left( sh^2\mu_1 + \frac{1}{2} \right), \quad (15)$$

$$A = \frac{q_v c_1^2}{8\lambda_1 ch2\mu_1} + D. \quad (16)$$

В силу того, что на границе соприкосновения должны быть одинаковы тепловые потоки, поэтому получим еще одно граничное условие

$$-\frac{\lambda_1}{c_1 \sqrt{ch^2\mu_2 - \cos^2\nu}} \frac{\partial T_1}{\partial \mu} \Big|_{\mu=\mu_1} = -\frac{\lambda_2}{c_2 \sqrt{ch^2\mu_2 - \cos^2\nu}} \frac{\partial T_2}{\partial \mu} \Big|_{\mu=\mu_1}, \quad (17)$$

где  $c_2 = \sqrt{a_2^2 - b_2^2}$ . Имеем

$$-2\lambda_1 c_2 A sh2\mu_1 \cos 2\nu - \frac{q_v c_1^2 c_2 sh2\mu_1}{4} = c_1 \lambda_2 [-2D sh2\mu_1 \cos 2\nu + E]. \quad (18)$$

Откуда

$$A = \frac{c_1 \lambda_2}{c_2 \lambda_1} D, \quad (19)$$

$$E = -\frac{q_v c_1 c_2 sh2\mu_1}{4\lambda_2}. \quad (20)$$

Тогда

$$F = \frac{q_v c_1}{4} \times \left[ \frac{c_2 \mu_1 sh 2 \mu_1}{\lambda_2} - \frac{c_1}{\lambda_1} \left( sh^2 \mu_1 + \frac{1}{2} \right) \right] + C, \quad (21)$$

$$D = \frac{q_v c_1^2 c_2}{8 ch 2 \mu_1 (c_1 \lambda_2 - c_2 \lambda_1)}, \quad (22)$$

$$A = \frac{q_v c_1^2 (c_1 \lambda_2 - c_2 \lambda_1 + c_1 \lambda_1)}{8 \lambda_1 ch 2 \mu_1 (c_1 \lambda_2 - c_2 \lambda_1)}. \quad (23)$$

Теперь воспользуемся граничным условием (5)

$$\frac{\lambda_2}{c_2 \sqrt{ch^2 \mu_2 - \cos^2 \nu}} \times \times [-2 D sh 2 \mu_2 \cos 2 \nu + E] = \quad (24)$$

$$= q_{\text{луч}} \cos \nu -$$

$$-\alpha (D ch 2 \mu_2 \cos 2 \nu + E \mu_2 + F - T).$$

Разложим иррациональное выражение в ряд

$$\sqrt{ch^2 \mu_2 - \cos^2 \nu} = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} \cos 2n \nu, \quad (25)$$

Коэффициенты  $a_{2n}$  определяются по формуле

$$a_{2n} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{ch^2 \mu_2 - \cos^2 \nu} \cos 2n \nu d \nu =$$

$$= \frac{2 ch \mu_2}{\pi} \times \left[ B \left( \frac{2n+1}{2}, \frac{1}{2} \right) \times \right.$$

$$\times F_1 \left( \frac{2n+1}{2}, -\frac{1}{2}, n+1, \frac{1}{ch^2 \mu_2} \right) -$$

$$- C_{2n}^2 B \left( \frac{2n-1}{2}, \frac{3}{2} \right) \times$$

$$\left. \times F_1 \left( \frac{2n-1}{2}, -\frac{1}{2}, n+1, \frac{1}{ch^2 \mu_2} \right) + \dots \right], \quad (26)$$

где:  $B(\nu, z)$  – бэта-функция,  $F_1(\nu, z, m; k)$  – гипергеометрическая функция. Откуда

$$a_0 = \frac{2 ch \mu_2}{\pi} \times \times \left[ \left[ B \left( \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right) \times F_1 \left( \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, 1, \frac{1}{ch^2 \mu_2} \right) \right] \right] = 2 ch \mu_2, \quad (27)$$

$$a_2 = -\frac{1}{4 ch \mu_2}, \quad (28)$$

тогда формула (23) примет вид

$$\frac{\lambda_2}{c_2} [-2 D sh 2 \mu_2 \cos 2 \nu + E] =$$

$$= \frac{a_0 q_{\text{луч}}}{2} \cos \nu + q_{\text{луч}} \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} \cos 2n \nu \cos \nu -$$

$$- \frac{a_0 \alpha}{2} [D ch 2 \mu_2 \cos 2 \nu + E \mu_2 + F - T] - \quad (29)$$

$$- \alpha D ch 2 \mu_2 \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n} \cos 2 \nu \cos 2n \nu -$$

$$- \alpha (E \mu_2 + F - T_0) \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n} \cos 2n \nu,$$

и интегрируя по углу  $\nu$  от  $-\pi/2$  до  $\pi/2$ , получим

$$\frac{\pi \lambda_2}{c_2} E = a_0 q_{\text{луч}} + \frac{2}{3} a_2 q_{\text{луч}} - \quad (30)$$

$$- \frac{\pi \alpha a_0}{2} (E \mu_2 + F - T_0) - \frac{\pi \alpha}{2} D ch 2 \mu_2.$$

Откуда

$$C = T_0 + \frac{q_{\text{луч}}}{\pi \alpha} \left( 2 - \frac{1}{6 ch^2 \mu_2} \right) + \frac{q_v c_1}{4} \times$$

$$\times \left[ \frac{c_1}{\lambda_1} \left( sh^2 \mu_1 + \frac{1}{2} \right) + \frac{c_2 (\mu_2 - \mu_1) sh 2 \mu_1}{\lambda_2} + \right. \quad (31)$$

$$\left. + \frac{4 th 2 \mu_1}{\alpha} - \frac{c_1 c_2}{4 ch 2 \mu_1 (c_1 \lambda_2 - c_2 \lambda_1)} \right].$$

Тогда выражение для определения температурного поля цилиндра примет вид

$$T_1(\mu, \nu) = \frac{q_v c_1^2}{4 \lambda_1} \times$$

$$\times \left[ \frac{c_1 \lambda_2 - c_2 \lambda_1 + c_1 \lambda_1}{2 \lambda_1 ch 2 \mu_1 (c_1 \lambda_2 - c_2 \lambda_1)} ch 2 \mu (2 \cos^2 \nu - 1) - \right. \quad (32)$$

$$\left. - \cos^2 \nu - sh^2 \mu \right] + C,$$

а для оболочки

$$T_2(\mu, \nu) = \frac{q_v c_1}{4} \times \left[ \frac{c_1 c_2}{2ch2\mu_1(c_1\lambda_2 - c_2\lambda_1)} ch2\mu(2\cos^2\nu - 1) - \frac{c_2 sh2\mu_1}{\lambda_2}(\mu - \mu_1) - \frac{c_1}{\lambda_1} \left( sh^2\mu_1 + \frac{1}{2} \right) \right] + C. \quad (33)$$

#### 4. Обсуждение

Как следует из полученных выражений (32) и (33) температурное поле цилиндра и оболочки по углу меняется по закону косинуса. В случае отсутствия лучистого теплового потока и внутреннего источника теплоты температура цилиндра и оболочки будут одинаковыми по сечению и равны температуре окружающей среды  $T_0$ .

Температура оболочки снаружи  $T_{вн}$  меняется по закону

$$T_{вн}(\mu, \nu) = \frac{q_v c_1}{4} \times \left[ \frac{c_1 c_2}{2ch2\mu_1(c_1\lambda_2 - c_2\lambda_1)} ch2\mu_2(2\cos^2\nu - 1) - \frac{c_2 sh2\mu_1}{\lambda_2}(\mu_2 - \mu_1) - \frac{c_1}{\lambda_1} \left( sh^2\mu_1 + \frac{1}{2} \right) \right] + C. \quad (34)$$

#### 5. Заключение

В настоящей работе получено решение задачи о распределении температурного поля цилиндра с эллиптическим поперечным сечением при граничных условиях третьего рода и лучистого теплового потока, поступающего с внешней стороны. Решение получено для стационарного случая в системе эллиптических координат. Установлено, что температурное поле по сечению цилиндра и окружающей его оболочки меняется по закону косинуса. В результате решения задачи выведено соотношение для расчета распределения температуры по поверхности эллиптической оболочки. Математическая модель, представленная в работе, и полученные соотношения предназначены для расчета температурного поля теплообменных аппаратов, солнечных коллекторов и топливных стержней ядерных реакторов, использующих каналы эллиптической формы.

#### Список источников

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Изд-во Высшая школа, 1957. 600 с.
2. Багаев А.А., Бобровский С.О. Интенсификация теплообмена в цилиндрическом змеевиковом теплообменнике электронагревателя с косвенным способом теплопередачи // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 5 (199). С. 127–131.
3. Дунайцев А.А., Солонин В.И. Процессы массообмена в пучках ореховых стержней // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 1. С. 125–134.
4. Tatsiy R.M., Pazen O.Y., Vovk S.Y. et al. Simulation of heat transfer process in a multilateral cylindrical shell taking into account the internal heat sources // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. № 3. pp. 27–32.
5. Nolasco C., Jacome N.J., Hurtado-Lugo N.A. Solution by numerical methods of the heat equation in engineering applications. A case of study: Cooling without the use of electricity // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1388. 7 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1388/1/012034
6. Eremin A.V., Kudinov V.A., Stefanyuk E.V. Heat Exchange in a Cylindrical Channel with Stabilized Laminar Fluid Flow // Fluid Dynamics. 2018. Vol. 53. pp. 29–39.
7. Садьков А.В. Расчет двумерного температурного поля в цилиндрической камере // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 12. С. 24–34.
8. Видин Ю.В., Казаков Р.В., Злобин В.С. Процесс переноса тепла в двухслойном цилиндрическом теле // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11–12. С. 93–98.
9. Семенович О.В. Моделирование теплофизических процессов в тепловыделяющих сборках и активных зонах водоохлаждаемых ядерных реакторов // Тезисы докладов и сообщений. XIV Минский международный форум по тепло и массообмену. (23–26 мая 2016 г.: в 3-х т. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Т. 3).
10. Петухов Б.С., Генин А.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1974. 408 с.
11. Канарейкин А.И. Распределение температурного поля в твэле с эллиптическим поперечным сечением // Научные труды Калужского государственного университета им. К.Э. Циолковского, серия: естественные науки, 2016. С. 230–231.
12. Канарейкин А.И. Распределение температуры в теле эллиптического сечения с внутренним источником тепла при граничных условиях первого рода // Вестник Калужского университета, серия: естественные науки. 2020. № 2. С. 74–76.
13. Kanareykin A.I. Energy calculation of the temperature field of an elliptical body without internal heat sources under boundary conditions of the third kind // IOP Conf.

- Series: Earth and Environmental Science. 2022. № 1045. DOI: 10.1088/1755-1315/1045/1/012068
14. Kanareykin A. Temperature distribution in an elliptical body with an internal heat source with partial adiabatic isolation, *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 258. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809071
  15. Канарейкин А.И. Распределение температуры в теле эллиптического сечения без внутренних источников тепла при граничных условиях третьего рода // *Науко-сфера*. 2022. № 7-2. С. 96–100.
  16. Канарейкин А.И. Распределение температуры в теле эллиптического сечения с внутренними стационарными источниками теплоты при граничных условиях третьего рода // *Тепловые процессы в технике*. 2021. Т. 13. № 5. С. 226–229. DOI: 10.34759/TPT-2021-13-5-226-229
  17. Канарейкин А.И. Распределение температуры в теле эллиптического сечения с внутренним источником тепла при граничных условиях третьего рода // *Вестник Калужского университета*. 2021. № 2 (51). С. 107–109. DOI: 10.54072/18192173\_2021\_2\_107
  18. Канарейкин А.И. Теплообмен между нагревательным элементом цилиндрической формы и его оболочкой при граничных условиях четвертого рода // *Вестник Международной академии холода*. 2023. № 3. С. 68–73.
  7. Sadykov AV. Calculation of a two-dimensional temperature field in a cylindrical chamber. *Byulleten' nauki i praktiki*. 2018;4(12):24–34.
  8. Vidin YuV, Kazakov RV, Zlobin VS. The process of heat transfer in a two-layer cylindrical body. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy ehnergetiki*. 2018; 20(11–12):93–98.
  9. Semenovich OV. Modeling of Thermophysical Processes in Fuel Assemblies and Active Zones of Water-Cooled Nuclear Reactors. *Abstracts of Papers and Communications. XIV Minskii mezhdunarodnyi forum po teplo i mas-soobmenu. (May 23–26, 2016: in 3 volumes. Minsk: ITMO im. A.V. Lykova NAN Belarusi. 2016. Vol. 3).*
  10. Petukhov BS, Genin AG, Kovalev SA. Heat transfer in nuclear power plants. Moscow: Atomizdat; 1974. 408 p.
  11. Kanareikin AI. Distribution of the temperature field in a fuel element with an elliptical cross-section. *Nauchnye trudy Kaluzhskogo gosudarstvennogo universiteta im. K.EH. Tsiolkovskogo, seriya: estestvennye nauki*. 2016:230–231.
  12. Kanareikin AI. Temperature distribution in a body of elliptical cross-section with an internal heat source under boundary conditions of the first kind. *Vestnik Kaluzhskogo universiteta, seriya: estestvennye nauki*. 2020;(2): 74–76.
  13. Kanareykin AI. Energy calculation of the temperature field of an elliptical body without internal heat sources under boundary conditions of the third kind // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022. № 1045. DOI: 10.1088/1755-1315/1045/1/012068
  14. Kanareykin A. *Temperature distribution in an elliptical body with an internal heat source with partial adiabatic isolation, E3S Web of Conferences*. 2021;258. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809071
  15. Kanareikin AI. Temperature distribution in a body of elliptical cross-section without internal heat sources under boundary conditions of the third kind. *Naukosfera*. 2022; (7–2):96–100.
  16. Kanareikin AI. Temperature distribution in a body of elliptical cross-section with internal stationary heat sources under boundary conditions of the third kind. *Teplovye protsessy v tekhnike*. 2021;13(5):226–229. DOI: 10.3475 9/TPT-2021-13-5-226-229
  17. Kanareikin AI. Temperature distribution in a body of elliptical cross-section with an internal heat source under boundary conditions of the third kind. *Vestnik Kaluzhskogo universiteta*. 2021;(2 (51)):107–109. DOI: 10.540 72/18192173\_2021\_2\_107
  18. Kanareikin AI. Heat exchange between a cylindrical heating element and its shell under boundary conditions of the fourth kind. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2023;(3):68–73.

#### References

1. Lykov AV. *Theory of thermal conductivity*. Moscow: Vysshaya shkola, 1957. 600 p.
2. Bagaev AA, Bobrovskii SO. Intensification of heat exchange in a cylindrical coil heat exchanger of an electric heater with an indirect heat transfer method. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021; (5 (199)):127–131.
3. Dunaitsev AA, Solonin VI. Mass transfer processes in bundles of finned rods. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2016;1:125–134.
4. Tatsiy RM, Pazen OY, Vovk SY et al. Simulation of heat transfer process in a multilateral cylindrical shell taking into account the internal heat sources. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020; (3):27–32.
5. Nolasco C, Jacome NJ, Hurtado-Lugo NA. Solution by numerical methods of the heat equation in engineering applications. A case of study: Cooling without the use of electricity. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1388:7. DOI: 10.1088/1742-6596/1388/1/012034
6. Eremin AV, Kudinov VA, Stefanyuk EV. Heat Exchange in a Cylindrical Channel with Stabilized Laminar Fluid Flow. *Fluid Dynamics*. 2018;53:29–39.