

УДК 536.2.023:519:669:699.86

**Анатолий Константинович Соколов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-44, e-mail: aks2411@yandex.ru

## **Использование охранных нагревателей для создания адиабатных условий в теплофизических экспериментах**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Теплофизические характеристики материалов определяются в основном решением обратных задач теплопроводности по температурным полям, полученным в результате теплофизических экспериментов. Для упрощения последующей обработки измеренных значений параметров температурных полей в большинстве случаев стараются использовать одномерные температурные поля неограниченных пластин или цилиндров, которые создаются путем организации симметричного нагрева или применения специальных охранных нагревателей. В связи с этим задача исследование влияния охранных нагревателей на температурное поле пластины является весьма актуальной.

**Материалы и методы.** Анализ и проверка эффективности способа создания адиабатных условий выполнены с помощью охранных нагревателей. Для исследования влияния охранных нагревателей на температурное поле исследуемого материала разработана численно-аналитическая модель процесса и компьютерная программа.

**Результаты.** Проведены расчеты температурных полей материала (стали) в форме усеченного цилиндра и кольца с охранным нагревателем. Выполнена оценка погрешности создания адиабатных условий для нескольких способов регулирования мощности охранных нагревателей.

**Выводы.** Установлено, что ни один из режимов работы охранных нагревателя в принципе не может создать условия идеальной адиабаты. Показана возможность подбора параметров физического эксперимента, при которых погрешность создания адиабатных условий можно снизить до приемлемых значений.

**Ключевые слова:** теплофизический эксперимент, адиабатные условия, охранный нагреватель, задачи теплопроводности, численно-аналитическая метод

**Anatoly Konstantinovich Sokolov**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Professor of Health and Safety Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-44, e-mail: aks2411@yandex.ru

## **On the use of guarding heaters to create adiabatic conditions in thermophysical experiments**

### **Abstract**

**Background.** The thermophysical characteristics of materials are mainly determined by solving inverse problems of thermal conductivity over temperature fields obtained as a result of thermophysical experiments. To simplify the subsequent processing of the measured values of the temperature field parameters, in most cases they try to use one-dimensional temperature fields of unlimited plates or cylinders, which are created by organizing symmetrical heating or using special guarding heaters. Thus, the task to study the influence of guarding heaters on the temperature field of the plate is very relevant.

**Materials and methods.** The paper analyzes and checks the effectiveness of the method for creating adiabatic conditions using guarding heaters. To study the effect of guarding heaters on the temperature field of the material under study, a numerical-analytical model of the process and a computer program have been developed.

**Results.** Calculations of the temperature fields of a material (steel) in the form of a truncated cylinder and a ring with a guarding heater have been carried out. The error of creating adiabatic conditions for several methods of regulating the power of a guarding heater has been estimated.

**Conclusions.** It is established that none of the operating modes of the guarding heater can in principle create conditions of perfect adiabatic operation. It is shown that it is possible to select the parameters of a physical experiment at which the error of creating adiabatic conditions can be reduced to acceptable values.

**Key words:** thermophysical experiment, adiabatic conditions, guarding heater, heat conduction problems, numerical-analytical method

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2025.6.028-035

**Введение. Постановка задачи.** Термофизические эксперименты проводятся для исследования температурных полей, а также для определения теплофизических характеристик металлов и материалов (огнеупорных, теплоизоляционных, строительных).

В процессе специфических тепловых воздействий при определенных начальных и граничных условиях производятся измерения температур поверхностей или температур в определенных точках внутри тел.

Для упрощения теплофизического эксперимента и последующей обработки численных значений параметров температурных полей, например, для определения теплофизических характеристик (ТФХ) материалов [1–7] в большинстве случаев стараются использовать одномерные температурные поля пластины или цилиндра неограниченных размеров. Для расчета таких полей имеются аналитические решения [8, 9], более простые математические модели и программные средства [10].

Неограниченной пластиной принято считать такую пластину, ширина и длина которой является бесконечной или во много раз больше толщины пластины [8, 9]. Для реальных технических систем и экспериментальных установок, в которых используются тела конечных размеров, понятие бесконечного размера неприменимо.

В известной нам литературе [8, 9] понятие неограниченной пластины характеризуется нечеткими терминами (толщина мала по сравнению с длиной, ширина значительно или во много раз больше толщины и т.п.). При этом не указано, как принять размеры пластины (длина, ширина), которые должны соответствовать понятию неограниченной пластины.

С точки зрения теории теплопроводности на некотором расстоянии от центра неограниченной пластины поток теплоты по второй координате должен быть равен нулю.

Другими словами, пластину с размерами  $R_x$ ,  $R_y$ , где  $R_x$  – толщина, а  $R_y$  – длина или ширина пластины, можно считать неограниченной, если в ее центре или на некотором удалении от него будут созданы адиабатные условия по оси  $y$ :

$$dT(x, y) / dy = 0.$$

Применение понятия неограниченной пластины к реальным телам позволяет обоснованно ограничивать размеры тел в физических экспериментах и решать дифференциальные уравнения теплопроводности в одномерной постановке.

Для создания адиабатных условий применяют симметричный нагрев или специальные дополнительные нагреватели [7, 11].

В патенте на изобретение [7] предложено создавать адиабатные условия с помощью тепловой изоляции части поверхности пластины и охранных нагревателей (рис. 1).

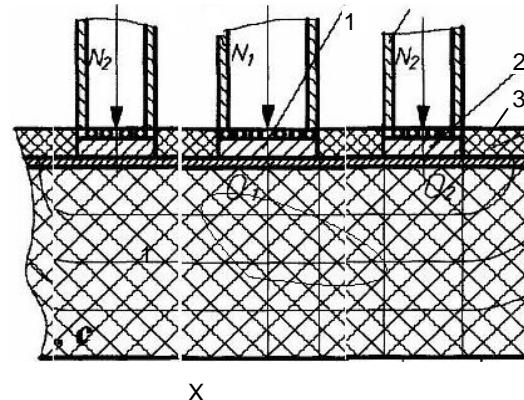


Рис. 1. Схема создания адиабатных условий для температурного поля под нагревателем  $N_1$ :  $N_1$ ,  $N_2$  – зонды с нагревателями; 1 – основной дисковый нагреватель ( $N_1$ ); 2 – кольцевой охранный нагреватель ( $N_2$ ); 3 – тепловая изоляция

Такая схема с охранными нагревателями использовалась для того, чтобы к пластине ограниченных размеров можно было применить понятие неограниченной пластины и полуограниченного тела. Это позволило в методике определения теплофизических характеристик материала решать обратную задачу теплопроводности в одномерной постановке.

Согласно [7], мощность кольцевого охранных нагревателя 2 должна поддерживаться такой, чтобы его температура была равна температуре нагревателя центрального зонда 1 (рис. 1) для исключения теплоотдачи в окружающую среду.

Был проведен теоретический анализ работы устройства и возможности его практической реализации путем использования охранных нагревателей с определенным режимом их работы. В результате проведенного анализа возникли сомнения о возможности практической реализации использования охранных нагревателей в таком виде и методики определения теплофизических характеристик решением обратной задачи теплопроводности.

Патент на изобретение [7] имеет следующие основные недостатки.

1. Очевидный недостаток заключается в том, что поток теплоты  $Q_1$  от первого зонда будет идти от него не только вниз, но и вверх через тепловую изоляцию между зондами 1 и 2. Следовательно, величина теплового потока в расчетной модели будет меньше потока, измеряемого в эксперименте, на неопределенную величину. Естественно, это приведет к погрешности расчетов ТФХ.

2. Не доказано, что между зондами 1 и 2 устанавливаются адиабатные условия, а условный цилиндр под нагревателем 1 является неограниченной пластиной и полуограниченным телом.

3. Линии изотерм показаны неадекватно.

Идея использования охранных нагревателей для создания адиабатных условий достаточно интересна, поэтому была поставлена

задача проверки такой схемы организации нагрева и оценки ее возможностей.

Для определения способности охранных нагревателей создавать граничные условия, соответствующие условиям адиабаты, необходимо исследовать температурные поля тел, образующиеся при тепловых воздействиях источников тепловых потоков 1 и 2 (см. рис. 1).

**Методика исследования.** Исследование температурных полей целесообразно выполнить с помощью программных средств, которые могли бы решать не только прямые задачи теплопроводности, но и обратную задачу теплопроводности: подбирать мощность охранного нагревателя для создания адиабатных условий.

На рис. 2 представлена расчетная схема теплообмена для исследования температурных полей. Рассмотрим, сможет ли охранный нагреватель 1 создать на условной образующей цилиндра 4 распределение температур  $T_2(X, Y = 0)$ , эквивалентное температурному полю  $T_1(X)$ , создаваемому дисковым нагревателем 2.

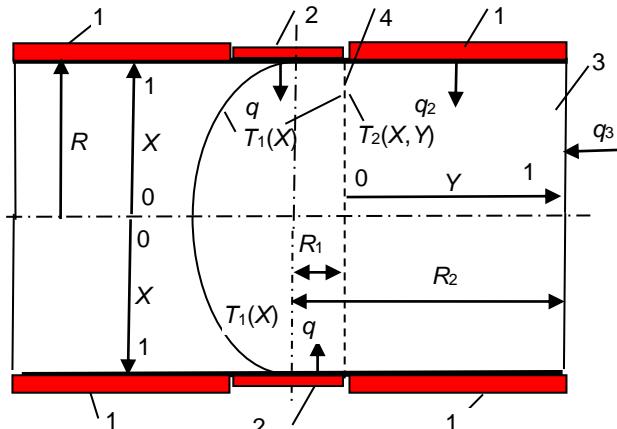


Рис. 2. Схема симметричного нагрева усеченного цилиндра: 1 – кольцевой охранный нагреватель; 2 – основной дисковый нагреватель; 3 – материал (сталь); 4 – условная образующая цилиндра, на которой должна создаваться адиабата

Таким образом, необходимо выполнить расчет одномерного температурного поля, создаваемого потоком  $q$ , и двумерного температурного поля, создаваемого потоками теплоты  $q_2$  и  $q_3$ , где  $q_3$  имеет отрицательное значение.

Для определения параметров температурных полей  $T_1(X)$  и  $T_2(X, Y)$  используем чрезвычайно простой численного аналитический метод моделирования температурных полей [10]. Суть метода заключается в использовании аналитических решений дифференциального уравнения теплопроводности для интервала времени  $\Delta\tau$ , в конце которого распределение температур  $T(X)$  аппроксимируется параболическим или степенным [10] уравнениями. Численное интегрирование этих решений по времени осуществляется при условии, что средняя температура тела в начале каждого последую-

щего  $i+1$ -го интервала времени  $\Delta\tau_{i+1}$  равна средней температуре в конце  $i$ -го интервала  $\Delta\tau_i$ .

Дифференциальное уравнение теплопроводности для усеченного цилиндра как для неограниченной пластины толщиной  $R$

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau}(X, \tau) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial X} \lambda \frac{\partial T}{\partial X}(X, \tau) \quad (1)$$

запишется при следующих краевых условиях:

$$T(X, \tau = 0) = T_h, 0 \leq X \leq 1, X = x/R; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X}(X = 0, \tau) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X}(1, \tau) = \frac{R}{\lambda} q, \quad (4)$$

где  $c$  – теплоемкость материала, Дж / (м<sup>3</sup>·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт / (м·К);  $q$  – поток теплоты, Вт / м<sup>2</sup>;  $T_h$  – начальная температура в момент времени  $\tau = 0$ .

Представим распределение температур в конце расчетного интервала времени  $\Delta\tau_{i+1} = \Delta\tau_i + \Delta\tau$  в виде

$$T_1(X) = a_0 + a_2 X^2. \quad (5)$$

Тогда значения температуры поверхности круга цилиндра  $X = 1$ , термического центра  $X = 0$  и средней массовой температуры определяются по формулам [10], полученным из уравнения (5):

$$T_1(X = 1) = a_0 + a_2; \quad (6)$$

$$T_1(X = 0) = a_0; \quad (7)$$

$$T_{1,ср} = a_0 + a_2 / 3, \quad (8)$$

где

$$a_0 = T_{ср.ни} + \frac{q\Delta\tau}{cR} - \frac{qR}{6\lambda}; \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{qR}{2\lambda}, \quad (10)$$

где  $T_{ср.ни}$  – средняя температура в начале интервала времени  $\Delta\tau_{i+1}$ .

Для второго тела (условного кольца) необходимо не только рассчитать температурное поле, но и решить обратную задачу теплопроводности, а именно рассчитать динамику изменения  $q_2$ , при которой распределение температур на границе цилиндра и кольца будет одинаковым или будет соблюдаться равенство некоторых температур, например температуры поверхности, температуры центра или средней массовой температуры.

Это значит, что температуры усеченного цилиндра на вертикальной поверхности образующей цилиндра 4 (рис. 2) будут равны температурным параметрам на внутренней поверхности кольца.

Двумерное температурное поле кольца в конце  $i+1$ -го интервала  $\Delta\tau$  времени аппроксимируем функцией [10]

$$T_2(X, Y) = a_0 + a_2 X^2 + b_2 Y^2. \quad (11)$$

С учетом функции (11) начальные и граничные условия кольца могут быть представлены в следующем виде:

$$T_2(X, Y, \tau=0) = T_h = a_0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial X}(X=1, Y=0, \tau) \frac{\lambda}{R} = q_2 = \frac{2a_2\lambda}{R}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial X}(X=0, Y, \tau) = 0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial Y}(X, Y=0, \tau) = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial X}(X, Y=1, \tau) \frac{\lambda}{\Delta R} = q_3 = \frac{2b_2\lambda}{\Delta R}, \quad (16)$$

где  $\Delta R = R_2 - R_1$ .

Параметры температурного поля несложно определить по функции (11), если знать коэффициенты  $a_0$ ,  $a_2$  и  $b_2$  на каждом временном интервале расчета.

Формулы для расчета коэффициентов функции (11) можно найти по краевым условиям (12)–(16) и уравнениям баланса теплоты на интервале времени  $\Delta\tau$ .

Коэффициенты  $a_2$  и  $b_2$  выразим из граничных условий (13) и (16) для конца интервала времени  $\tau_{i+1}$ :

$$a_2 = q_2 R / (2\lambda); \quad (17)$$

$$b_2 = q_3 \Delta R / (2\lambda). \quad (18)$$

Коэффициент  $a_0$  определится из уравнения баланса теплоты на интервале времени  $\Delta\tau$ :

$$c_i V (T_{cp,i+1} - T_{cp,i}) = \\ = (q_2 \pi \Delta(R^2) + q_3 2\pi R R_2) \Delta\tau, \quad (19)$$

где

$$\Delta(R^2) = R_2^2 - R_1^2; \quad (20)$$

$V$  – объем условного кольца,  $\text{м}^3$ :

$$V = \pi R \Delta(R^2); \quad (21)$$

$T_{cp,i}$  и  $T_{cp,i+1}$  – среднемассовые температуры в начале и конце интервала времени  $\Delta\tau$  [10]:

$$T_{cp,i+1} = a_0 + a_2 / 3 + b_2 S, \quad (22)$$

$$\text{где } S = (R_1 + 3 R_2) / 6 / (R_1 + R_2). \quad (23)$$

Поток теплоты  $q_3$  для конвективного (или радиационного, приведенного к конвективному) теплообмена запишется в виде

$$q_3 = \alpha (T_{oc} - T_{cp,Y=1}), \quad (24)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $T_{oc}$  – температура окружающей среды,  $\text{К}$ ;  $T_{cp,Y=1}$  – средняя температура наружной образующей поверхности кольца:

$$T_{cp,Y=1} = \int_0^1 T_2(X, Y=1) dX = a_0 + \frac{q_2 R}{6\lambda} + b_2. \quad (25)$$

С учетом выражений (17) и (25) и приведения подобных уравнение (24) примет вид

$$q_3 = \alpha [T_{oc} - (a_0 + q_2 R / (6\lambda))] / (1 - \alpha \Delta R / (2\lambda)). \quad (26)$$

Поток теплоты, согласно (24), имеет отрицательной значение, поэтому фактически будет направлен в окружающую среду (см. рис. 2).

Подставив выражения (22) и (26) в уравнение баланса теплоты (19), получим из него формулу для расчета  $a_0$ :

$$a_0 = \frac{S_1 - S_2 A - q_2 R / (6\lambda) + T_{cp,i}}{1 - \alpha \cdot A / [\Delta R \cdot \alpha / (2\lambda)]}, \quad (27)$$

где

$$S_1 = \pi q_2 - \Delta(R^2) \Delta\tau / (c_i V); \quad (28)$$

$$S_2 = \frac{\alpha A (T_{oc} - q_2 R / (6\lambda))}{1 + \Delta R \alpha / (2\lambda)}; \quad (29)$$

$$A = \frac{\Delta R S}{2\lambda} - \frac{2\pi R_2 R \Delta\tau}{c_i V}. \quad (30)$$

Зная величины коэффициентов  $a_0$ ,  $a_2$  и  $b_2$  в функции (11), можно рассчитать параметры температурного поля кольца:

– среднюю температуру внутренней образующей

$$T(X, Y=1) = a_0 + a_2 / 3; \quad (31)$$

– температуры на поверхности кольца с координатами  $[X=1, Y=0]$  и  $[X=0, Y=0]$ :

$$T(X=1, Y=0) = a_0 + a_2; \quad (32)$$

$$T(X=0, Y=0) = a_0. \quad (33)$$

Для расчета параметров температурных полей усеченного цилиндра и кольца разработана программа ADIAB в среде Microsoft Excel. При расчете полей было условно принято (см. граничные условия), что между ними располагается адиабатная поверхность, поэтому температурные поля рассчитывались по приведенным выше формулам независимо друг от друга.

Для проверки правильности вывода формул и программирования по рекомендациям [12] выполнены следующие тесты.

Расчеты для усеченного цилиндра проведены по программам TRT [10] и ADIAB.

По программе ADIAB выполнены расчеты:

1) для кольца как неограниченной пластины при  $\alpha = 0$  и  $q_2 = 60 \text{ кВт}/\text{м}^2$ ;

2) кольца как неограниченного цилиндра при  $R_1 = 0,00001$  м,  $R_2 = 0,03$  м  $q_2 = 0$ ,  $\alpha = 250$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $T_{oc} = 800$  К.

Вычисления проводились как при постоянных, так и при зависящих от температуры теплофизических характеристиках.

Аналогичные расчеты проведены по программе TRT, а также по формулам и номограммам [8, 9, 13, 14].

Обратим внимание, что поток теплоты  $q_2$ , входящий в формулу (27) для расчета  $a_0$ , должен создавать адиабатные условия на границе цилиндра и кольца 4 (рис. 2), а также компенсировать потери теплоты  $q_3$ . Следовательно,

$$q_2 = q - q_{3n}, \quad (34)$$

где  $q_{3n}$  – поток  $q_3$ , приведенный к площади кольца, равной  $\pi \Delta(R^2)$ :

$$q_{3n} = q_3 \cdot 2R_2 R / (\Delta(R^2)). \quad (35)$$

Зависимость

$$a_0 = f(q_2(q, q_{3n}))$$

является нелинейной и должна решаться методом последовательных приближений.

В программе Microsoft Excel имеется возможность организации циклических ссылок и проведения итерационных вычислений.

**Результаты исследования.** Выполнено исследование нескольких способов регулирования работы охранных нагревателей для создания адиабатных условий.

Расчеты температурных полей проведены по программе ADIAB для материала из стали, теплофизические характеристики которой  $\alpha$  и  $\lambda$  описываются ломаными линиями [10]:

$$\lambda = 63,405 - 32,56 \cdot T/1000, \quad 300 \leq T \leq 1142,72,$$

$$\lambda = 16,228 + 8,721 \cdot T/1000, \quad T > 1142,72; \quad (36)$$

$$\alpha = (18,1 - 13,4 \cdot T/1000) \cdot 10^{-6}, \quad 300 \leq T \leq 977,6,$$

$$\alpha = (3,378 + 1,1667 \cdot T/1000) \cdot 10^{-6}, \quad T > 977,6; \quad (37)$$

$$c(T) = \lambda_{ii}(T) / \alpha_{ii}(T). \quad (38)$$

Нагрев во всех рассмотренных случаях начинался от температуры  $T_h = 300$  К при размерах материала  $R = 0,015$ ,  $R_1 = 0,02$ ,  $R_2 = 0,05$  м и параметрах внешнего теплообмена  $\alpha = 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и  $T_{oc} = 300$  К.

Температурное поле усеченного цилиндра для всех вариантов рассчитывалось при  $q = 60$  кВт/м<sup>2</sup>, как в [6].

На рис. 3, 4 приведены результаты расчета при  $q_2 = q = 60$  (кВт/м<sup>2</sup>) = пост.

Величина потока теплоты  $q_{3n}$  через 1400 с достигла 20 кВт/м<sup>2</sup> (1/3 от величины  $q_2 = 60$ ), а температуры обогреваемых поверхностей ( $X = 1$ ) цилиндра и кольца – 1450 и 1240 К (рис. 3). Естественно, из-за потерь теплоты в окружающую среду температура поверхности кольца оказалась ниже.

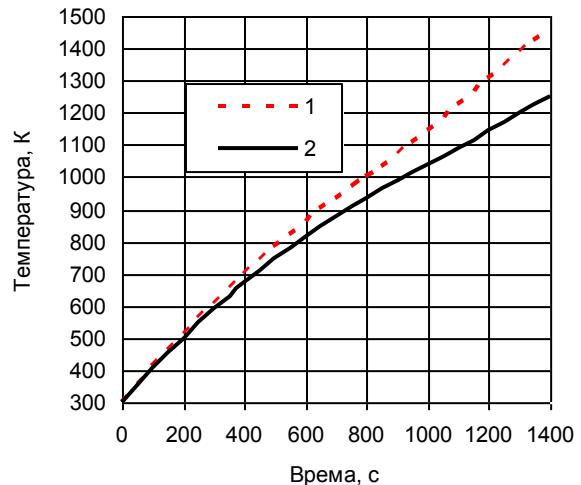


Рис. 3. Зависимости температур обогреваемых поверхностей ( $X = 1$ ) от времени нагрева: 1 – под дисковым нагревателем; 2 – под кольцевым охранным нагревателем  $T_2(X = 1, Y = 0)$

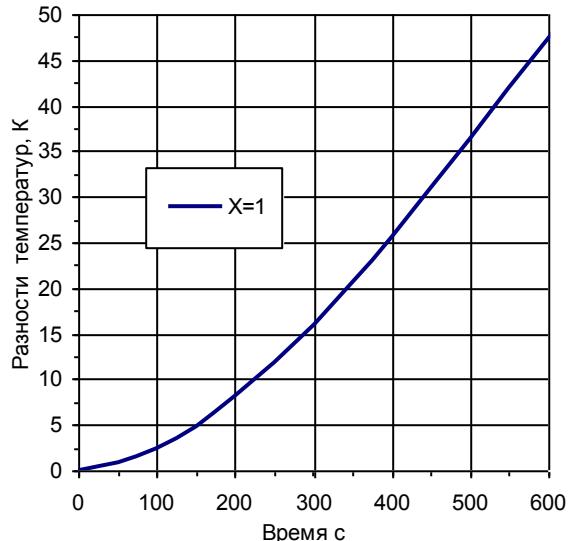


Рис. 4. Разности температур на поверхности  $X = 1$  окружности образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра и кольца

Разности температур (рис. 4) в точках  $X = 0$ ,  $X = 1$  и среднемассовой температуре на образующей цилиндра и кольца 4 (см. рис. 2) оказались одинаковыми, поэтому на рис. 4 показана температура только поверхности  $X = 1$  на окружности образующей. На рис. 4 видно, что разности температур довольно быстро возрастают по мере нагрева. При  $\tau > 500$  с они составляют более 35 К.

Следовательно, на границе цилиндра и кольца при  $q_2 = 60$  кВт/м<sup>2</sup> адиабатные условия не соблюдались.

Выполнен расчет при увеличении мощности охранного нагревателя  $q_2$  с учетом потерь в окружающую среду  $q_2 = q - q_{3n}$ . По мере роста потерь  $q_3$  величину потока теплоты  $q_2$  за время нагрева 1400 с пришлось увеличить с 60 до 85 кВт/м<sup>2</sup>. Температуры обогреваемых поверхностей цилиндра и кольца за

время 1400 с достигли примерно одинаковых значений около 1450 К.

Разности температур (рис. 5)  $X = 0$ ,  $X = 1$  и среднемассовой температуры на образующей 4 (рис. 2) в данном случае оказались значительно меньше, чем при нагреве, когда  $q_2 = q$ . К моменту времени  $\tau = 1400$  с температуры кольца были ниже температур цилиндра: при  $X = 0$  на 5 К; при  $X = 1$  на 11,5 К.

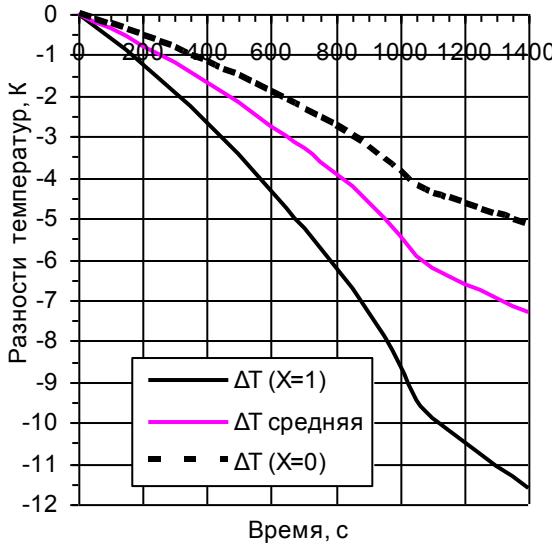


Рис. 5. Разности температур на окружности образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра и кольца при мощности охранного нагревателя  $q_2 = q - q_{3п}$  для  $X = 1$ ;  $X = 0$  и для среднемассовой температуры

Следовательно, на границе цилиндра и кольца при  $q_2 = q_1 - q_{3п}$  адиабатные условия также не соблюдались.

В патенте [7] указано, что величину  $q_2$  следует устанавливать (регулировать) по условию равенства температур цилиндра и кольца при  $X = 1$ .

Подбор  $q_2$  удалось запрограммировать в программе ADIAB путем организации циклической ссылки и расчета  $a_2$  и  $a_0$  для кольца по формулам:

$$a_2 = q_2 R/(2\lambda); \quad (39)$$

$$a_0 = T_1(X=1) - a_2. \quad (40)$$

Интересно, что потоки теплоты  $q_2$  и  $q_{3п}$  не значительно отличались от предыдущего расчета. Температуры цилиндра и кольца при  $X = 1$ , естественно, были одинаковыми. Разность температур на оси  $X = 0$  (рис. 6) уменьшилась и для  $\tau = 1400$  с составила 6,5 К, а для среднемассовых температур – 4,3 К.

Такие разности кажутся незначительными при нагреве до 1450 К, однако при решении обратных задач теплопроводности, когда для определения ТФХ используются перепады температур 20–30 К [6], относительные погрешности могут превысить 15 % и будут недопустимы.

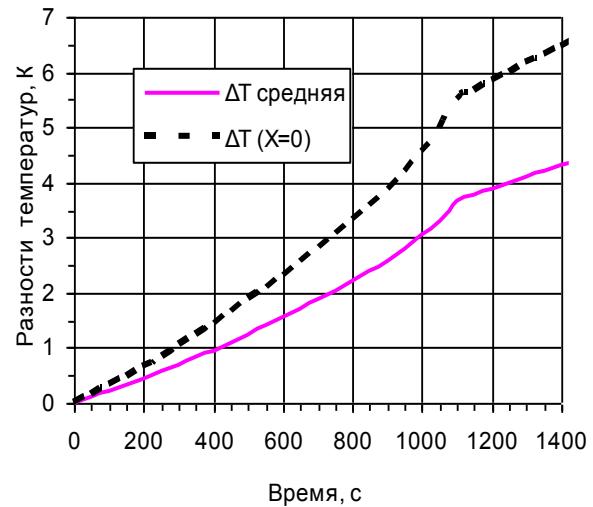


Рис. 6. Разности температур на окружности образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра и кольца для  $X = 0$  и среднемассовой температуры при мощности охранного нагревателя  $q_2 = q - q_{3п}$ , обеспечивающей равенство  $T_2(X=1, Y=0) = T_1(X=1)$

Снижение погрешности задания адиабаты можно добиться за счет изоляции наружной поверхности кольца с координатами  $[X, Y=1]$ , увеличения радиуса  $R_2$ , сокращения времени эксперимента.

В качестве примера выполнен расчет нагрева стали до температуры  $T(X=1, Y=0) = 1450$  К за время  $\tau = 1400$  с при задании  $R_2 = 0,1$ ,  $\alpha = 10$ .

Результаты расчета приведены на рис. 7 и рис. 8. В этом случае для сохранения равенства температур  $T(X=1)$  цилиндра и кольца поток теплоты  $q_2$  потребовалось увеличить с 60 до 63,5 кВт/м<sup>2</sup>. При этом разность температур  $T(X=0)$  за время  $\tau = 1400$  с увеличилась всего лишь с 0 К до 1 К (рис. 7).

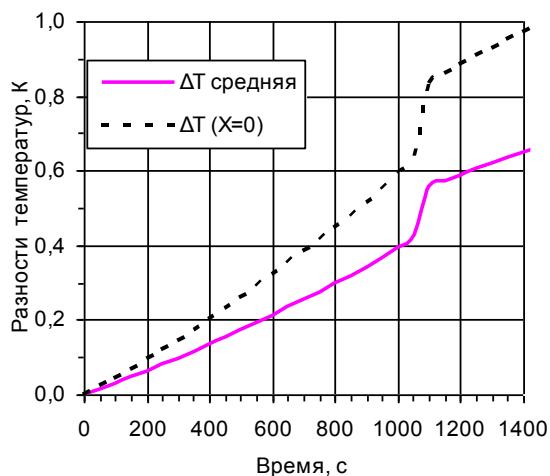


Рис. 7. Разности температур на окружности образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра и кольца с радиусом  $R_2 = 0,1$  м для  $X = 0$  и среднемассовой температуры при мощности охранного нагревателя  $q_2 = q - q_{3п}$ , обеспечивающей равенство  $T_2(X=1, Y=0) = T_1(X=1)$

На рис. 8. показано распределение температур по толщине стали  $R = 0,015$  м на образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра  $T(X)$  и кольца  $T(X=1, Y=0)$ . Видно, что разница температур по мере удаления от нагревателей увеличивается от 0 до 1 К.

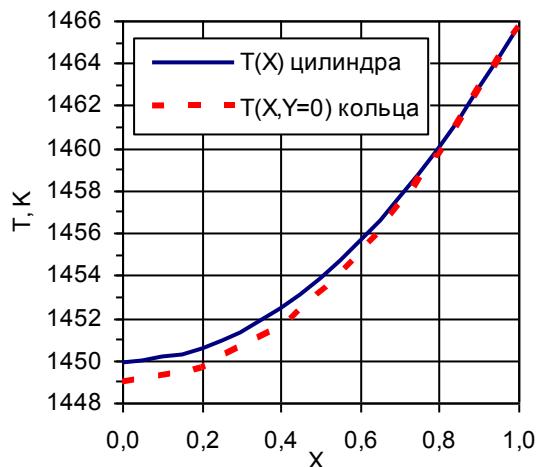


Рис. 8. Распределение температур на образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра  $T(X)$  и кольца  $T(X=1, Y=0)$  в момент времени  $\tau = 1400$  с

Таким образом, показана возможность подбора условий теплообмена, при которых с некоторой погрешностью пластину можно считать неограниченной.

Отметим, что создание абсолютной адиабаты таким способом в принципе невозможно, поскольку распределения температур  $T(X, Y=0)$  на образующей 4 (см. рис. 2) цилиндра и кольца создаются разными потоками теплоты  $q$  и  $q_2$ , причем всегда  $q_2 > q_1$  (34). Этот вывод можно считать очевидным. Однако моделирование позволило оценить возможные погрешности измерения параметров одномерных температурных полей пластины при создании адиабатных условий с помощью охранных нагревателей.

**Выводы.** Разработанная численно-аналитическая модель для исследования работы кольцевого охранного нагревателя для создания адиабатных условий на образующей цилиндрической поверхности цилиндра и исследование нескольких режимов задания мощности охранного нагревателя позволили установить, что ни один из режимов не может создать условия идеальной адиабаты.

Показано, что путем численного эксперимента по предложенной или другой математической модели и программе можно подобрать параметры физического эксперимента, при которых с некоторой удовлетворительной погрешностью температурное поле усеченного цилиндра можно будет считать одномерным и использовать решения дифференциального уравнения теплопроводности для неограниченной пластины.

## Список литературы

1. Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин, О.Ю. Шешуков. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.
2. Фокин В.М., Чернышев В.Н. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2004. – 212 с.
3. Жуков Н.П., Майникова Н.Ф. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2004. – 288 с.
4. Grysa Kr. Inverse heat conduction problems // Heat Conduction – Basic Research. Intech Open. URL: <https://www.intechopen.com/books/heat-conduction-basic-research/inverse-heat-conduction-problems>.
5. Соколов А.К. Метод определения температуропроводности и коэффициента теплопроводности по температурам поверхности пластины как полуграниценного тела // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2022. – Т. 65, № 1. – С. 57–65. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-57-65>
6. Метод комплексного определения зависимости теплофизических характеристик металла от температуры решением обратной задачи теплопроводности / А.К. Соколов, В.П. Жуков, Н.Н. Смирнов, Н.Н. Ярунина // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 6. – С. 23–30.
7. Пат. № 2247363 Российская Федерация МПК G01N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик изделий из металлокомпозитов / Б.Г. Варфоломеев, Н.П. Жуков, Д.Ю. Муромцев, З.М. Селиванова; опубл. 27.02.2005, Бюл. № 6.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
9. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
10. Соколов А.К. Математическое моделирование нагрева металла в газовых печах. – Иваново, 2011. – 396 с.
11. Описание изобретения к авторскому свидетельству № 399011 СССР М. Кл. F28f 13/02. Способ создания адиабатных условий на одной из поверхностей стенки / А.Ш. Дорфман, О.И. Диденко; опубл. 03.10.1973, Бюл. № 39.
12. Соколов А.К. Приемы проектирования тестов для программ, рассчитывающих температурные поля // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 7. – С. 144–147.
13. Карслу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
14. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с.

## References

1. Yur'ev, B.P., Gol'tsev, V.A., Matyukhin, V.I., Sheshukov, O.Yu. *Opryedeleniye teplofizicheskikh svoystv materialov metallurgicheskogo proizvodstva* [Determination of thermophysical properties of materials for metal-

- lurgical production]. Ekaterinburg: OOO «UIPTs», 2014. 180 p.
2. Fokin, V.M., Chernyshev, V.N. *Nerazrushayushchiy kontrol' teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov* [Non-destructive testing of thermal and physical characteristics of building materials]. Moscow: Izdatel'stvo «Mashinostroenie-1», 2004. 212 p.
  3. Zhukov, N.P., Maynikova, N.F. *Mnogomodel'nye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdeliy* [Multi-model methods and means of non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products]. Moscow: Izdatel'stvo «Mashinostroenie-1», 2004. 288 p.
  4. Grysa, Kr. Inverse heat conduction problems // Heat Conduction – Basic Research. Intech Open. Available at: <https://www.intechopen.com/books/heat-conduction-basic-research/inverse-heat-conduction-problems>.
  5. Sokolov, A.K. Metod opredeleniya temperaturoprovodnosti i koeffitsienta teploprovodnosti po temperaturam poverkhnosti plastiny kak poluogranichenного tela [Method to determine thermal diffusivity and thermal conductivity coefficient based on the surface temperatures of a plate as a semi-infinite body]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2022, vol. 65, no. 1, pp. 57–65. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-57-65>
  6. Sokolov, A.K., Zhukov, V.P., Smirnov, N.N., Yarunina, N.N. Metod kompleksnogo opredeleniya zavisimosti teplofizicheskikh kharakteristik metalla ot temperatury resheniem obratnoy zadachi teploprovodnosti [Method for comprehensive determination of the dependence of the thermophysical characteristics of a metal on temperature by solving the inverse problem of thermal conductivity]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 6, pp. 23–30.
  7. Varfolomeev, B.G., Zhukov, N.P., Muromtsev, D.Yu., Selivanova, Z.M. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik izdeliy iz metallopolimerov* [Method of non-destructive testing of thermal characteristics of metal-polymer products]. Patent RF, no. 2247363, 2005.
  8. Lykov, A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Izdatel'stvo «Vysshaya shkola», 1967. 600 p.
  9. Isachenko, V.P. Osipova, V.A., Sukomel, A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat, 1981. 416 p.
  10. Sokolov, A.K. *Matematicheskoe modelirovaniye nagreva metalla v gazovykh pechakh* [Mathematical modeling of metal heating in gas furnaces]. Ivanovo, 2011. 396 p.
  11. Dorfman, A.Sh., Didenko, O.I. *Sposob sozdaniya adiabatnykh usloviy na odnoy iz poverkhnostey stenki* [A method for creating adiabatic conditions on one of the wall surfaces]. Opisanie izobreteniya k avtorskomu svidetel'stву, no. 399011 SSSR, 1973.
  12. Sokolov, A.K. Priemy proektirovaniya testov dlya programm, rasschityvayushchih temperaturnye polya [Techniques for designing tests for programs that calculate temperature fields]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1987, no. 7, pp. 144–147.
  13. Karslou, G., Eger, D. *Teploprovodnost' tverdykh tel* [Thermal conductivity of solids]. Moscow: Nauka, 1964. 488 p.
  14. Pekhovich, A.I., Zhidkikh, V.M. *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Calculations of thermal regime of solids]. Leningrad: Energiya, 1968. 304 p.