

ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД РАЗМОРОЗКИ НАДЗЕМНЫХ ВОДОВОДОВ С ВНУТРЕННИМ ОБЛЕДЕНЕНИЕМ

Абдурахманов ¹ Р.Н., Богущкая ² А.Ю., Каркищенко ³ Я.И., Редзанова ⁴ Н.М., Бекиров Э.А ⁵

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского

295007, Республика Крым, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4.

E-mail: ¹ rechator@gmail.com; ² abogutskaya2004@mail.ru; ³ yaroslav.karkischenko@yandex.ru; ⁴ n.redzanova@gmail.com,
⁵ bekirov.e.a@cfuv.ru.

Аннотация. Целью работы является определение тепловых полей в стенке трубы разного диаметра от поверхностного нагрева и нахождение вкладываемой и изменяющейся со временем мощностей.

Предмет исследования: теплофизические процессы в стальной неограниченной пластине изучение распределения температурных полей в стенке трубы разного диаметра, при использовании уравнений Фурье.

Материалы и методы: в основу положены методы математического моделирования теплофизических процессов. Метод заключается в использовании модернизированной математической модели уравнения теплопроводности Фурье, при этом, в ходе расчета и для его упрощения стальная труба мысленно разрезается и представляется в виде неограниченной пластины. При построении графика распределения температур по толщине трубы использовалось ПК ЛИРА САПР-2022.

Результаты: метод позволяет быстро определять вкладываемую и изменяющиеся со временем мощностей.

Выводы: методика определения распределения тепла на основе модернизированного метода тепловых источников Фурье позволяет гибко моделировать и быстро решать практические задачи по оценке распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностного нагрева и охлаждения с заданными вкладываемыми положительными удельными мощностями.

Ключевые слова: тепловые расчеты, термообработка труб, индукционный нагрев, метод тепловых источников, положительные тепловые источники.

ВВЕДЕНИЕ

Важной частью логистики и транспортной инфраструктуры является система водоснабжения. При транспортировке жидких веществ в трубопроводе на открытых участках при отрицательных температурах окружающей среды, неизбежно изменение физических свойств транспортируемой жидкости. Появляется риск, связанный с опасностью их замерзания и разрушения, вследствие которого транспортировка становится затруднительной. При этом, после достижения критического уровня, транспортировка перестает быть возможной, что приводит к понижению эффективности водоснабжения, а также вызывает дополнительные затраты, которые связаны с очисткой труб. Так как при индукционном нагреве теплота выделяется в проводящем теле — слое, равном глубине проникновения электромагнитного поля, то появляются возможности точного управления температурой для обеспечения качественного нагрева при высокой производительности. Другим преимуществом является бесконтактность нагрева.

Индукционный нагрев основан на явлении магнитной индукции, открытой Майклом Фарадеем еще в 1831 году. При этом развили эту теорию О. Хевисайд, С. Ферранти, С. Томпсон, Ивинг.

При проведении местной термообработки сварных соединения технологических трубопроводов и оборудования применяют следующие способы нагрева:

- радиационный (электронагревателями сопротивления и газопламенным нагревом);
- индукционный (токами промышленной частоты 50 Гц и средней частоты 1000-8000 Гц);
- комбинированный;
- термохимический.

Радиационный способ заключается в том, чтобы переносить тепло посредством излучения от источника нагрева к телу за счет нагретого воздуха. К недостаткам этого метода, как следует из краткого описания можно отнести неравномерный нагрев трубы (то есть тела).

При комбинированном нагреве применяют электронагреватели комбинированного действия, в которых используется способ нагрева электрическим сопротивлением и нагревом индукционным током частотой 50 Гц.

При термохимическом методе нагрев осуществляется путем образования теплоты посредством сгорания экзотермических смесей, в основном в состав которых входит оксид алюминия, соединения серы и фосфора, однако способ имеет существенный недостаток в виде невозможности полноценного контроля температуры при проведении нагрева, из-за чего возможен значительный перепад температур.

С каждым днем становится все более актуальной разработка технологий и средств, которые были бы направлены на устранение появления замерзших участков. Необходимость в постоянном источнике воды может быть представлена как со стороны

бытовых нужд населения, так для поддержания функционирования предприятий.

В настоящее время, индукционный нагрев находит большее применение. Электрический нагрев позволяет контролировать температуру, так же электрический нагрев трубопроводов проще, чем прочие методы нагрева.

Индукционный нагрев характеризуется выделением тепла в проводящем нагреваемом объекте и бесконтактной передачей энергии, поэтому индукционный метод нагрева труб является предпочтительным.

В статье решается проблема разморозки стальных труб с внутренним обледенением и предлагается способ, основанный на методе тепловых источников Фурье для определения распределения температур в стенке стальных труб разных диаметров путем поперечного поверхностного нагрева.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Для комплексного исследования данной темы был проведен анализ отечественной и международной научной литературы. В работах Fourier J. B. [1], Лыкова А. В. [3], Luikov A. V. и др. [4, 5, 6, 7, 8], рассматривается метод тепловых источников Фурье при определении распределения температур в плоских неограниченных пластинах. В работе Рыкалина Н. Н. [2] приводятся, также, Эти данные по изучению тепловых процессов при сварке. Вопросом решения задач определения распределения тепла в стенках труб большого диаметра при узком полосовом поверхностном нагреве поперечных сварных соединений индуктором посвящены работы А. С. Письменный, О. М. Иванцов и др. [11, 12, 13]. Эти исследования заложили основу для понимания тепловых процессов при сварке и предоставили методики для расчета температурных полей в различных условиях. Благодаря труду известного французского математика и физика Жана-Батиста Фурье [1], которым был сформулирован закон теплопроводности, показывающий взаимосвязь между передаваемым количеством теплоты, градиентом температуры, времени, за которое происходит процесс передачи энергии по площади и ввели понятие коэффициента теплопроводности (1).

Основываясь на этих знаниях, понимание процессов, происходящих при передаче тепла в разных условиях развивалось, в результате были получены уравнения для математической физики, позволяющие описать процесс теплопроводности, основываясь на трудах по математическому анализу О. Коши и Ж. Б. Фурье.

Понятие дифференциальных уравнений, выраженных вышеупомянутыми математиками, сыграло огромную роль в математической физике, многократно дополнив и позволив решить еще несколько веков назад абсолютно невозможные задачи аналитическим способом [6, 9].

В следствие, основываясь на трудах Пентегова И. В [4, 5], в статье представлен расчет мощности, рассчитанной для поверхностного нагрева по диаметру трубы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Равномерное нагревание вдоль всего участка трубы ведет к разогреву прилегающих слоев льда, вызывающих его таяние. Во время всего процесса необходимо контролировать температуру нагреваемой трубы, не допуская превышения 60°C (появление накипи).

Данные размеров труб приняты по ГОСТ 3262-75 Трубы стальные водогазопроводные [10] и представлены в таблице 1. Сечение показано на рисунке 1. Длина отрезка трубы $l = 1\text{ м}$. Расчетное время нагрева $t = 1\text{ ч}$.

Таблица 1. Параметры выбранных стальных труб

Table 1. Parameters of selected steel pipes

Условный проход	Наружный диаметр d, мм	Толщина стенки труб Δ, мм	Масса 1 м труб, кг
10	17,0	2,2	0,80
25	33,5	3,2	2,39
50	60,0	3,5	4,88
100	114,0	4,5	12,15

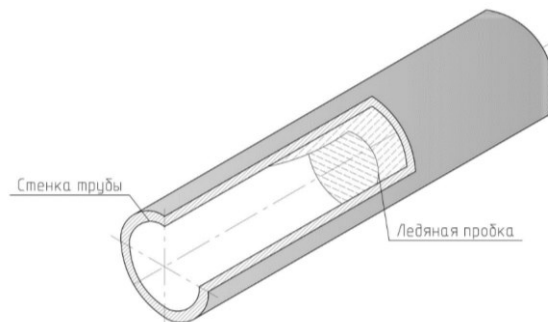


Рис. 1. Сечение трубы
Fig. 1. Pipe section

Труба имеет наружный диаметр d и толщину стенки Δ , смотри таблицу 1. Поверхностный нагрев труб осуществляется с внешней стороны трубы по ее периметру с шириной нагрева 1 м : $X_1 = -500\text{ мм}$, $X_2 = 500\text{ мм}$. На рисунке 2 показан участок стенки трубы 1, распрямленной по образующей - вдоль оси z , направленной перпендикулярно вглубь рисунка.

Представление таким образом исходной трубы имеет смысл, так как задача сводится к интегрированию лишь по времени, что облегчает расчет.

При индукционном нагреве токами высокой частоты глубина проникновения будет мала.

Этого достаточно для того, чтобы при переходе от объемного распределения источников тепла к приближению с плоским расположением источников тепла не изменялось количество

тепла, которое поступает в нагреваемое тело. Так же мы пренебрегаем кривизной трубы [14].

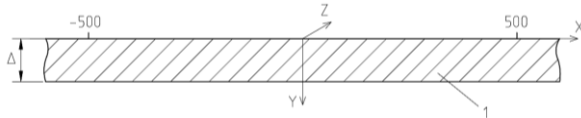


Рис. 2. Участок стенки трубы, распрямленной по образующей (вдоль оси z)

Fig. 2. A section of the pipe wall straightened along the generatrix (along the z axis)

В расчете используем средние значения теплофизических параметров за время нагрева. Средние значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности на интервале нагрева от начальной температуры T_0 до температуры T_1 , где λ_{st} – теплопроводность стали, Вт/(м•К), α_{st} – температуропроводность стали, м²/с:

$$\lambda = \frac{1}{T_1 - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_1} \lambda_{st}(T) dT;$$

$$\alpha = \frac{1}{T_1 - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{st}(T) dT \quad (1)$$

В ходе расчета пренебрегаем потерями на конвекцию и излучение с поверхности трубы.

Распределяемая температура описывается уравнением Фурье, для получения значения истинной температуры вводится коэффициент τ , который представляет собой распределение приращения температур с координатами x и y в пространстве, в которой вводится функция ошибок Erf.

Чтобы рассчитать приращение распределения температуры, воспользуемся формулой:

$$\theta(x, y, X_1, X_2, t) = \frac{p_s(\tau)}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \cdot e^{-\frac{(y-2\Delta)^2}{4a(t-\tau)}} \cdot Erf(x, y, X_1, X_2, a, t, \tau) d\tau, \quad (2)$$

где t - время, которое прошло с момента введения в систему источника тепла, τ - время, которое потребовалось для возникновения импульса энергии, отсчитываемое от момента введения в систему источника тепла, $(t - \tau)$ - время, которое распространяется тепло от текущего импульса энергии, $p_s(\tau)$ - вкладываемая постоянная мощность, x, y - координаты в пространстве [3, 6].

$$\theta = \Delta T$$

В свою очередь, при необходимости вместо нагрева трубы прибегнуть к её охлаждению, то знак функции θ изменится на противоположный, вследствие чего значение p_s (3) будет отрицательным.

Для упрощения расчета введем функцию F , которая будет являться отношением распределения приращения температур к постоянной удельной мощности p_s (2), тогда дополнительная функция $F(x, y, X_1, X_2, t)$ будет иметь вид:

$$p_s = \frac{\theta}{F(x, y, X_1, X_2, t)} \quad (3)$$

Преобразуя выражение (3), выразим $F(x, y, X_1, X_2, t)$:

$$F(x, y, X_1, X_2, t) = \frac{1}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \cdot e^{-\frac{(y-2\Delta)^2}{4a(t-\tau)}} \cdot Erf(x, y, X_1, X_2, a, t, \tau) d\tau \quad (4)$$

Преобразование функции $F(x, y, X_1, X_2, t)$, позволит вычислить мощность при известных значениях коэффициентов теплоемкости, температуропроводности и длины отрезка трубы.

При $X \rightarrow \infty$ функция $Erf(x, y, X_1, X_2, a, t, \tau)$ будет равна 2. Исходя из формулы (3), при повышении значения $F(x, y, X_1, X_2, t)$, значение постоянной мощности будет уменьшаться. Значение p_s вкладываемой удельной мощности, и, как следствие, вкладываемой постоянной мощности p'_s будет напрямую зависеть от выбора времени, необходимого для нагрева внешней стороны трубы по периметру (8).

Задача (4) сводится к вычислению интеграла Пуассона для неоднородного уравнения теплопроводности [8].

Нетрудно заметить, что функция ошибок (4) будет равна:

$$Erf(x, y, X_1, X_2, a, t, \tau) = erf\left[\frac{x-X_1}{2\sqrt{a\pi(t-\tau)}}\right] - erf\left[\frac{x-X_2}{2\sqrt{a\pi(t-\tau)}}\right] \quad (5)$$

С учетом выражения (3) выражение (4) примет вид:

$$F(x, y, X_1, X_2, t) = \frac{T_1 - T_0}{p_s(x, y, X_1, X_2, t)} \quad (6)$$

Выразим значение p_s :

$$p_s(x, y, X_1, X_2, t) = \frac{T_1 - T_0}{F(x, y, X_1, X_2, t)} \quad (7)$$

С учетом выражения (3), подставив значение $F(x, y, X_1, X_2, t)$ в формулу (6), находим значение постоянной, неизменяемой во времени мощности.

Тогда вкладываемая мощность для участка трубы будет равна:

$$p'_s = p_s \cdot \pi \cdot l \cdot d, \quad (8)$$

где l - длина участка трубы, p_s - вкладываемая постоянная мощность, d - внешний диаметр трубы.

Фазовый переход «вода– лед» возникает в результате охлаждения воды, когда её температура будет совпадать с температурой кристаллизации. Между молекулами воды возникают более устойчивые для данных термодинамических условий конфигурации водородных связей, так как вода представляет собой жидкость, молекулы в которой связаны водородной связью. Наличие минимального количества примесей в воде будет существенно повышать её температуру кристаллизации.

В соответствии с современными представлениями кристаллизация воды начинается в некоторых дискретных локальных объемах, для которых выполняются соответствующие термодинамические условия [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В статье определяются мощности для четырех труб разного диаметра с условным проходом 10, 25, 50, 100, в каждой из которых соблюдается соотношение $d \gg \Delta$. Значения длины, l и функции $F(x, y, X_1, X_2, t)$ являются постоянными величинами, что позволяет провести расчет $p_s(\tau)$ для стальных труб. Способ Фурье, предлагаемый в расчете является крайне быстрым за счет упрощения, заключающегося в обязательном интегрировании тела в соответствии его координатам в пространстве, а лишь используя интеграл Пуассона (4), для нахождения функции F , и как следствие, удельной вкладываемой мощности (7), облегчающей весь расчет и позволяя найти значение при нагреве стальной или любой другой трубы, начиная от значения температуры T_0 до отметки T_1 , за время, заданное параметром t в декартовом пространстве. Так же, в случае необходимости охлаждения материала в результате перегрева, по определению вкладываемой мощности, значение p_s будет отрицательным.

После нахождения постоянной вкладываемой мощности удельной мощности (7), мы можем перейти на нахождение мощности с учетом площади поверхностного нагрева (8), и, с учетом выражения (4), сможем сделать расчет:

$$p_s(\tau) = p'_s \cdot \theta(x, y, X_1, X_2, t) \quad (9)$$

Результаты вкладываемой мощности для каждой трубы приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета постоянной вкладываемой мощности и силы тока для выбранных стальных труб

Table 2. The results of calculating the constant input power and current strength for selected steel pipes

Условный проход	Мощность p_s , кВт*ч	Сила тока I , А	Установка
10	1,63	54,3	Трансформаторы СТЭ-24-У
25	3,1	103	
50	6,05	201,6	
100	12	400	

По нашим значения постоянной вкладываемой мощности и силы тока сделали вывод и определились с трансформаторной установкой. На основе полученных значений, представленных в таблице 2, постоянной вкладываемой мощности p_s , кВт*ч, и силы тока I , А, мы пришли к следующему выводу, что трансформаторы СТЭ-24-У обеспечивают оптимальную производительность и эффективность.

На рисунке 3-6 показаны результаты расчета стенок труб с условным проходом 10, 25, 50 и 100 в ПК ЛИРА САПР 2022. Температура на поверхности трубы – 60°C, на нижней части стенки трубы температура достигает - 60°C и не превышает ее, что соответствует нашим требованиям. Результаты, получаемые в процессе определения распределения температур в стенке трубы методом

тепловых источников Фурье, соотносятся с результатами расчета в программе.

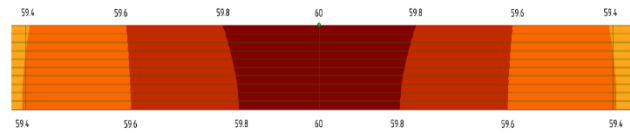


Рис. 3. Распределение температур по толщине трубы с условным проходом 10 мм

Fig. 3. Temperature distribution over the thickness of a pipe with a nominal passage of 10 mm

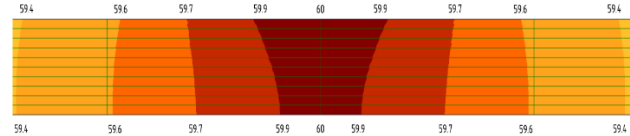


Рис. 4. Распределение температур по толщине трубы с условным проходом 25 мм

Fig. 4. Temperature distribution over the thickness of a pipe with a nominal passage of 25 mm

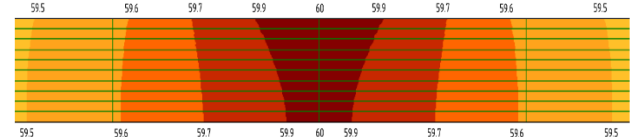


Рис. 5. Распределение температур по толщине трубы с условным проходом 50 мм

Fig. 5. Temperature distribution over the thickness of a pipe with a nominal passage of 50 mm

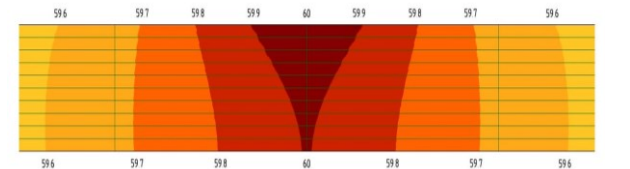


Рис. 6. Распределение температур по толщине трубы с условным проходом 100 мм

Fig. 6. Temperature distribution over the thickness of a pipe with a nominal passage of 100 mm

ВЫВОДЫ

1. Методика определения распределения тепла на основе модернизированного метода тепловых источников Фурье позволяет гибко моделировать и быстро решать практические задачи.

2. Выполнен ручной расчет и расчет численной модели фрагмента стенки трубы разного диаметра при распределении тепловых полей под поперечными полосовыми участками поверхностного нагрева с заданными вкладываемыми положительными удельными мощностями.

3. Результаты расчета могут быть использованы проектировщиками для предотвращения аварийных ситуаций в регионах Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fourier J.B. Théorie analytique de la chaleur. – Paris: Chez Firmin Didot, père et fils 1822. – 639 p.
2. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н.Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 297 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
4. Пентегов И.В., Рymar С.В., Губатюк Р.С. Применение модернизированного метода тепловых источников Фурье в случае поперечного полосового поверхностного нагрева и охлаждения трубы // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. №2.
5. Пентегов Игорь Владимирович, Рymar Сергей Владимирович, Петриенко Ольга Игоревна Сокращение времени счета в методе тепловых источников Фурье // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. №4.
6. Luikov A. V. and Mikhhalloy Y. A. Theory of Energy and Mass Transfer, Prentice — Hall Inc., New York, 1961; Pergamon Press, London.
7. Luikov.A. V. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, Advances in Heat Transfer, V.I Academic Press, 1964.
8. Свешников А. Г., Боголюбов А. Н., Кравцов В. В. Лекции по математической физике. – М.: Наука, 2004. – 416 с.
9. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 2004. – 798 с.
10. ГОСТ 3262-75 Трубы стальные водогазопроводные.
11. Индукционный нагрев для сварки и родственных технологий / А.С. Письменный / Под ред. Б.Е. Патона. - Киев: Ин-т электросварки им. Е.О. Патона, 2005. - 140 с.
12. Письменный А.С. Расчет индукционных систем электротермической гибки сварных трубопроводов // Автоматическая сварка. — 1991. - № 10. - С. 39-42.
13. Электротермическая гибка труб в полевых условиях / О.М. Иванцов, В.К. Лебедев, А.С. Письменный, М.Е. Шинлов // Строительство трубопроводов. - 1992. - 8. - С. 18-19.
14. Пентегов Игорь Владимирович К теории метода тепловых источников, используемого при анализе тепловых процессов в электротехнических системах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. №3.
15. Сазонов К.Е., Лукьянов С.В, Учебное пособие «Основы физики морского льда». Для высших учебных заведений. – СПб.: РГГМУ, 2023. – 148 с.

REFERENCES

1. Fourier J.B. Théorie analytique de la chaleur. – Paris: Chez Firmin Didot, père et fils 1822. – 639 p.
2. Rykalin N.N. Calculations of thermal processes in welding [Text] / N.N. Rykalin. – M.: Mashgiz, 1951. – 297 p.
3. Lykov A.V. Theory of thermal conductivity [Text] / A.V. Lykov. – M.: Higher School, 1967. – 600 p
4. Pentegov I.V., Rymar S.V., Gubatyuk R.S. Application of the modernized method of Fourier thermal sources in the case of transverse strip surface heating and cooling of pipes // Electrotechnical and information complexes and the systems. 2019. №2.
5. Pentegov Igor Vladimirovich, Rymar Sergey Vladimirovich, Petrienko Olga Igorevna Reduction of counting time in the method of thermal Fourier sources // Electrotechnical and information complexes and systems. 2017. №4.
6. Luikov A. V. and Mikhhalloy Y. A. Theory of Energy and Mass Transfer, Prentice — Hall Inc., New York, 1961; Pergamon Press, London.
7. Luikov.A. V. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, Advances in Heat Transfer, V.I Academic Press, 1964.
8. Sveshnikov A. G., Bogolyubov A. N., Kravtsov V. V. Lectures on mathematical physics. – M.: Nauka, 2004. – 416 p.
9. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. Equations of mathematical physics. – M.: Nauka, 2004. – 798 p.
10. GOST 3262-75 Steel water and gas pipes.
11. Induction heating for welding and related technologies / A.S. Pisny / Ed. by B.E. Paton. - Kiev: E.O. Paton Electric Welding Institute, 2005. - 140 p.
12. Pisny A.S. Calculation of induction systems of electrothermal bending of welded pipelines // Automatic welding. — 1991. - № 10. - С. 39-42.
13. Electrothermal bending of pipes in the field / O.M. Ivantsov, V.K. Lebedev, A.S. Pisny, M.E. Shinlov // Construction of pipelines. - 1992. - 8. - pp. 18-19.
14. Pentegov Igor Vladimirovich On the theory of the method of thermal sources used in the analysis of thermal processes in electrotechnical systems // Electrotechnical and information complexes and systems. 2014. №3.
15. Sazonov K.E., Lukyanov S.V., Textbook "Fundamentals of sea ice physics". For higher education institutions. – St. Petersburg: RGGMU, 2023. – 148 p.

ELECTRO-INDUCTION METHOD OF DEFROSTING OF ABOVEGROUND AQUEDUCTS WITH INTERNAL ICING

Abdurakhmanov ¹ R.N., Bogutskaya ² A.Y., Karkishchenko ³ Ya.I., Redzanova ⁴ N.M., Bekirov E.A. ⁵

V.I. Vernadsky Crimean Federal University

295493, Republic of Crimea, Prospekt Vernadskogo 4

E-mail: ¹ rechatfor@gmail.com; ² abogutskaya2004@mail.ru; ³ yaroslav.karkischenko@yandex.ru; ⁴ n.redzanova@gmail.com; ⁵ bekirov.e.a@cfuv.ru.

Abstract. The purpose of the work is to determine the thermal fields in the wall of a pipe of different diameters from surface heating and to find the capacities invested and changing over time.

Subject: thermophysical processes in a steel unlimited plate study of the distribution of temperature fields in the wall of a pipe of different diameters, using Fourier equations.

Materials and methods: the methods of mathematical modeling of thermophysical processes are based on. The method consists in using an upgraded mathematical model of the Fourier thermal conductivity equation, while, during the calculation and to simplify it, the steel pipe is mentally cut and represented as an unlimited plate. When plotting the temperature distribution over the thickness of the pipe, the Lira CAD PC 2022 software was used.

Results: the method allows you to quickly determine the capacity invested and changing over time.

Conclusions: the method of determining heat distribution based on the modernized Fourier method of thermal sources allows you to flexibly model and quickly solve practical problems of estimating the distribution of thermal fields in the wall of a large-diameter pipe under transverse strip sections of surface heating and cooling with specified embedded positive specific capacities.

Key words: thermal calculations, heat treatment of pipes, induction heating, method of thermal sources, positive thermal sources.