

## ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПРИ ЭЛЕКТРОМУФТОВОЙ СВАРКЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ГАЗОПРОВОДОВ

Старостин Н.П., Егорова М.П., Герасимов А.И.

*Институт проблем нефти и газа СО РАН*

*e-mail: nikstar56@mail.ru*

*В математической модели теплового процесса при сварке полиэтиленовых труб для газопроводов предлагается учитывать протекание фазового перехода в интервале температур. Сопоставлением теоретических зависимостей температур от времени с экспериментальными показана эффективность такого подхода определения динамики температурного поля в сварном соединении.*

*Ключевые слова: сварка, фазовый переход, полиэтилен, диапазон температур, плавление, кристаллизация, муфта, задача Стефана, сглаживание коэффициентов.*

Согласно нормативным документам сварку полиэтиленовых труб для газопроводов можно проводить при температурах окружающего воздуха (ОВ) от минус 15 °С до плюс 45 °С [1]. При более широком интервале температур сварочные работы рекомендуется выполнять в помещениях (укрытиях), обеспечивающих соблюдение заданного температурного интервала. Однако такая сварка связана с большими энергетическими, непроизводительными затратами и длительной подготовкой, что недопустимо в аварийных ситуациях. Актуальной проблемой является разработка методов и средств оперативной сварки полиэтиленовых труб в зимних условиях в регионах с холодным климатом, где температуры ОВ достигают значений ниже минус 15 °С.

В работе [2] предложен способ стыковой сварки полиэтиленовых труб при температурах ниже нормативных. При низких температурах ОВ технологические режимы, обеспечивающие такую же динамику температурного поля, что и при допустимых температурах ОВ, определяются на основе математического моделирования теплового процесса сварки [3-4]. Перспективным является развитие предложенного подхода регулирования динамикой температурного поля с использованием математического моделирования тепловым процессом для электромужфтовой сварки. Эффективность технологических режимов, найденных на основе такого подхода, во многом определяется адекватностью математической модели

реальному тепловому режиму. Динамика температурного поля при электромуфтовой сварке теоретически изучена недостаточно. Работы по ее изучению носят преимущественно экспериментальный характер. Теоретические результаты расчетов динамики температур хорошо совпадают с экспериментальными данными только на этапе нагрева [5], на этапе охлаждения достоверных сопоставлений теоретических и экспериментальных данных в литературе не приводится, что свидетельствует о недостаточной изученности процесса остывания при электромуфтовой сварке, при котором происходит формирование сварного соединения. Для учета теплоты фазового перехода обычно используют классическую постановку задачи Стефана. В этой постановке предполагается, что фазовый переход происходит мгновенно и есть четко выраженная граница фазового перехода [6]. В полиэтилене не существует такой четко выраженной границы, фазовый переход происходит в интервале температур. Целью данной работы является математическое моделирование теплового процесса при электромуфтовой сварке полиэтиленовых труб с учетом фазового перехода в интервале температур на основе решения задачи Стефана в неклассической постановке.

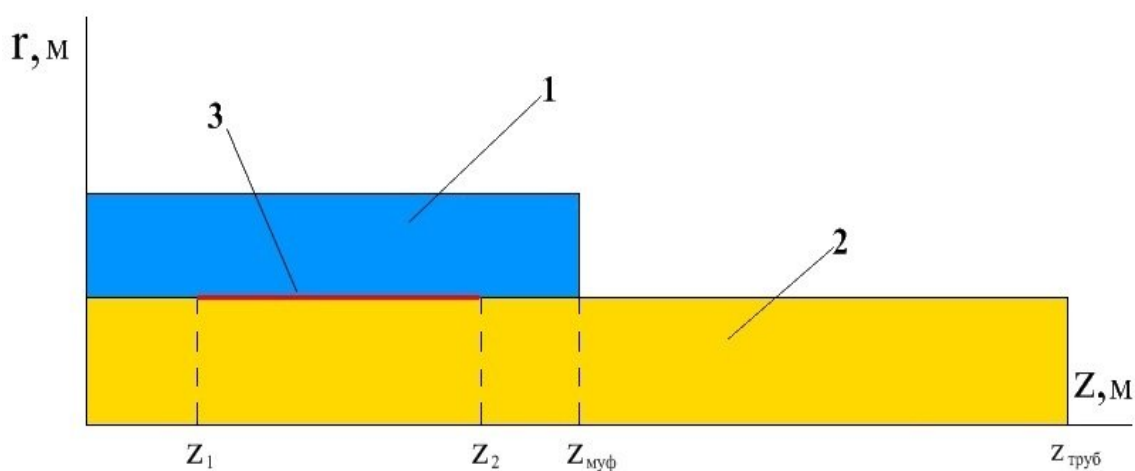


Рисунок 1. Расчетная схема трубы с муфтой:  
1 – муфта; 2 – стенка трубы; 3 – нагревательный элемент

Сначала рассмотрим классическую постановку задачи Стефана и сопоставим ее решение с экспериментальными данными. Расчетная схема трубы с муфтой представлена на рис. 1, не теряя общности, будем считать, что муфта и труба изготовлены из одного и того же материала. В силу симметрии рассматривается одна из половин соединения муфты с отрезком трубы. Предполагается, что распределение температуры по окружности любого поперечного сечения трубы и муфты однородное. Математическая задача ставится следующим образом. Область  $\Omega$ , занятая муфтой и отрезком трубы, в момент времени  $t > 0$  разбивается некоторой гладкой поверхностью  $\Gamma(t)$ , подлежащей определению, на две подобласти  $\Omega^+(t)$  и  $\Omega^-(t)$ , занятые соответственно жидкой и твердой фазами материала трубы и муфты. В каждой из областей  $\Omega^+(t)$  и  $\Omega^-(t)$  температура  $T(r, z, t)$  удовлетворяет двумерному уравнению теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} 0 < t < t_m, r_1 < r < r_3, 0 < z < z_{\text{муф}}, \\ r_1 < r < r_2, z_{\text{муф}} < z < z_{\text{труб}} \end{aligned}$$

где  $C(T)$  – удельная теплоемкость,  $\rho(T)$  – плотность и  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности берутся различными в жидкой и твердой фазах, для твердой фазы с индексом 1, для жидкой – с индексом 2.

Нагревательный элемент рассматривается как сосредоточенный источник тепла. В месте расположения источника тепла решение задачи удовлетворяет условиям сопряжения:

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}|_{r_m-0} - \lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}|_{r_m+0} = Q(t), z_1 \leq z \leq z_2, \quad (2)$$

$$T|_{r_m-0} = T|_{r_m+0}, z_1 \leq z \leq z_2, \quad (3)$$

где  $Q(t)$  – мощность источника.

На границе трубы и муфты задается условие идеального теплового контакта:

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}|_{r_2-0} = \lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}|_{r_2+0} \quad (4)$$

$$T(r_2-0, z, t) = T(r_2+0, z, t) \quad (5)$$

На левой границе рассматриваемой области выполняется условие симметрии:

$$\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=0}=0, \quad (6)$$

на правой – условие первого рода:

$$T(r, L_1, t) = T_{окр}. \quad (7)$$

На свободных поверхностях выполняются условия теплообмена с окружающей средой с температурой  $T_{окр}$ :

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_G = -a(T_G - T_{окр}). \quad (8)$$

В начальный момент времени распределение температуры однородное:

$$T(r, z, 0) = T_{окр} \quad (9)$$

На границе раздела фаз кроме равенства температуры материала температуре фазового перехода

$$T|_{\Gamma(t)} = T_f \quad (10)$$

задается условие Стефана

$$(\lambda_1 \text{grad}T - \lambda_2 \text{grad}T, \text{grad}\Phi) - L\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0, \quad (11)$$

где  $\Phi(r, z, t)$  - уравнение положения границы раздела фаз  $\Gamma(t)$  в момент времени  $t$ ;  $L$ ,  $T_f$  - удельная теплота и температура фазового перехода соответственно.

Задача Стефана в двумерной постановке решалась методом конечных разностей с использованием экономичной схемы сквозного счета [7] при следующих исходных данных:  $z_1 = 0,012$ ;  $z_2 = 0,03$ ;  $z_{\text{миф}} = 0,048$ ;  $z_{\text{мрб}} = 0,2$ ;  $r_1 = 0,025$ ;  $r_2 = 0,0315$ ;  $r_3 = 0,0395$ ;  $r_M = 0,03175$  м;  $\lambda_1 = 0,46$ ;  $\lambda_2 = 0,24$  Вт/(м·К);  $\rho_1 = 950$ ;  $\rho_2 = 800$ ;  $c_1 = 2000$ ;  $c_2 = 2400$  Дж/(кг·К); температура плавления  $T_{\text{пл}} = 128$ ; температура кристаллизации  $T_{\text{крст}} = 111$  °С;  $L = 177$  кДж/кг.

Мощность источника тепла вычислялась по формуле:

$$Q(t) = \frac{U^2}{R \cdot (1 + \beta(T(r_M, z, t) - 20)) S}, \quad (12)$$

где  $U$  – сварочное напряжение;  $R$  – сопротивление спирали при температуре 20 °С;  $\beta$  - температурный коэффициент сопротивления;  $S$  - площадь поверхности источника тепла;  $U = 32,8$  В;  $R = 1,6$  Ом;  $\beta = 0,00433 \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

Полуинтервал сглаживания  $\Delta$  выбирался различным так, чтобы область определения дельтообразной функции охватывала 2-3 соседних узла расчетной сетки. Для сопоставления теоретических и экспериментальных температурных зависимостей проведена сварка труб ПЭ 80 ГАЗ SDR11 63×5,8 ГОСТ Р 50838-95 с помощью муфты с закладным нагревателем ПЭ 100 SDR 11 при комнатной температуре. Значения температур в муфте и трубе регистрировались в 8 точках медь-константановыми термопарами  $\varnothing 0,2$  мм с помощью многоканального программного регулятора температуры с графическим дисплеем ТЕРМОДАТ-17ЕЗ.

Результаты расчетов показывают, что теоретические зависимости температуры от времени, полученные решением задачи Стефана в классической постановке, сильно отличаются от экспериментальных (рис. 2, кривые 1 и 2).

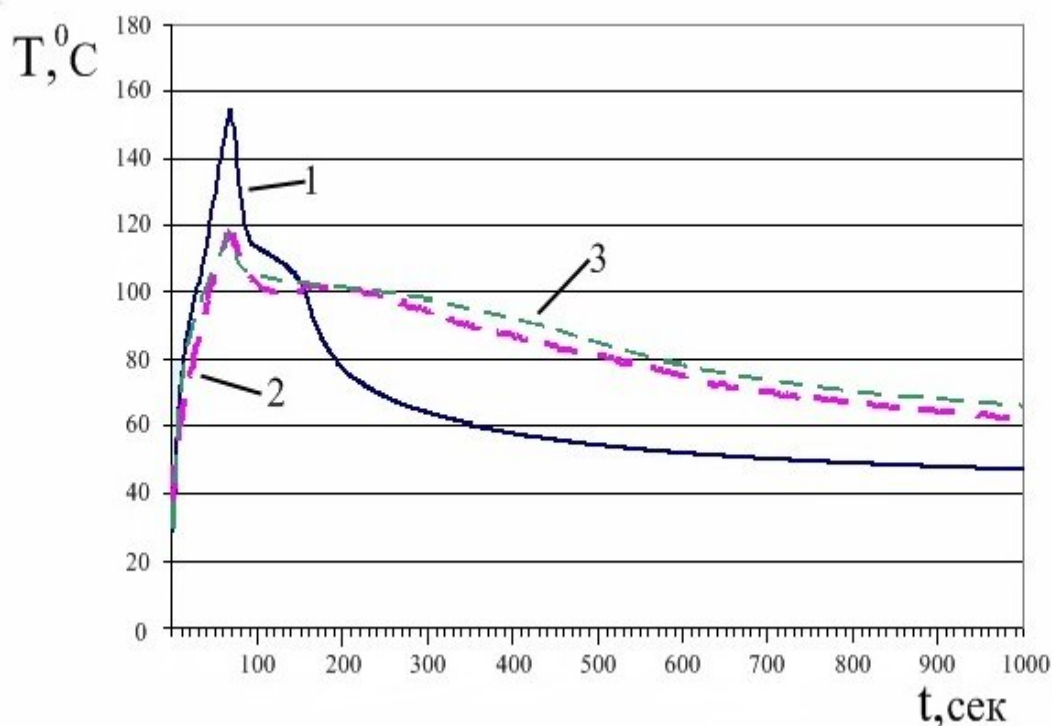


Рисунок 2. Экспериментальные и расчетные зависимости температур от времени:

- 1,3 – расчетные зависимости, полученные решением задачи Стефана традиционным методом и предлагаемым способом соответственно,  
2 – экспериментальные зависимости

Во-первых, максимальная температура, достигаемая в конце этапа нагрева, существенно превышает значение температуры, полученное в эксперименте, что свидетельствует о том, что при математическом моделировании теплового процесса недостаточно учитывается поглощение теплоты при плавлении свариваемых материалов. Во-вторых, на стадии охлаждения в расчетной кривой температура после плато достаточно резко падает, чего не наблюдается в экспериментальной зависимости температуры от времени. Такое изменение температуры указывает на то, что процесс кристаллизации резко не обрывается, а продолжается с меньшей интенсивностью.

Причина расхождения теоретических и экспериментальных зависимостей температуры заключается в том, что при решении классической задачи Стефана считается, что на границе фазового перехода поглощается при температуре плавления  $T_{пл}$  и выделяется при температуре кристаллизации  $T_{крст}$  теплота с удельным количеством  $L$ , равная усредненному значению удельной теплоты фазового перехода в интервале температур. Как показывают исследования плавления и кристаллизации полиэтилена методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), фазовый переход происходит в интервале температур  $(T_S, T_L)$  шириной примерно 50 градусов [8]. За температуру плавления и кристаллизации обычно берутся значения температур, при котором достигаются пики теплового потока. Удельная теплота фазового перехода  $L$  определяется осреднением зависимости теплового потока от температуры при постоянной скорости нагрева (охлаждения). Такое определение теплоты фазового перехода  $L$  равносильно предположению, что единица массы вещества поглощает (выделяет), если плавление (кристаллизации) происходит при изменении температуры в интервале  $(T_S, T_L)$ .

В случае фазового перехода в интервале температур в математической модели необходимо учитывать промежуточную фазу между твердым и жидким веществом, называемую двухфазной зоной, поскольку в этой зоне вещество находится как в твердом, так и в жидком состоянии [9]. Границы двухфазной зоны определяются температурами солидуса  $T_S$  и ликвидуса  $T_L$ . В работе [6, 9] температурное поле в этом случае предлагается определять из уравнения теплопроводности с эффективным коэффициентом теплоемкости:

$$\tilde{C}(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} 0 < t < t_m, r_1 < r < r_3, 0 < z < z_{\text{миф}} \\ r_1 < r < r_2, z_{\text{миф}} < z < z_{\text{мрпб}} \end{aligned},$$

где

$$\tilde{C}(T) = \begin{cases} C_1, T \leq T_L \\ C_1 - L \frac{d\Psi}{dT}, T_L < T < T_S \\ C_2, T \geq T_S \end{cases} \quad (14)$$

$\Psi(T)$  - объемная доля твердой фазы. При предположении прямой пропорциональности объема расплавленного полиэтилена количеству выделившейся теплоты,  $\Psi(T)$  определяется по формуле:

$$\Psi(T) = 1 - \frac{\int_{T_s}^T q(u) du}{\int_{T_s} q(u) du}, \quad (15)$$

где  $q(T)$  - зависимость теплового потока от температуры, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром, отнесенная к единице массы вещества.

Так как удельная теплота фазового перехода  $L$  определяется по формуле:

$$L = \frac{(t_L - t_S) \int_{T_s}^{T_L} q(u) du}{(T_L - T_S)} = \frac{\int_{T_s}^{T_L} L^*(u) du}{(T_L - T_S)}, \quad (16)$$

то

$$L \frac{d\Psi}{dT} = -\frac{q(T)(t_L - t_S)}{(T_L - T_S)} = \frac{L^*(T)}{(T_L - T_S)}, \quad (17)$$

$t_L, t_S$  - время начала и окончания фазового перехода,

При использовании эффективной теплоемкости, рассчитанной по формулам (14)-(17), расчетные температурные кривые также сильно отличаются от экспериментальных кривых и близки к зависимостям, полученным классическим подходом решения задачи Стефана. Это связано с тем, что введение указанной эффективной теплоемкости равносильно сглаживанию в интервале температур

$(T_S, T_L)$ , как в методах сквозного счета, специальной функцией  $L \frac{d\Psi}{dT}$ . При

сглаживании коэффициента теплоемкости в широком интервале температур температурные зависимости получаются «переглаженными» и не соответствуют реальным.

Из формулы (17) следует, что существует функция  $L^*(T)$ , осреднением которой в интервале  $(T_S, T_L)$  получается удельная теплота плавления  $L$ . Функция  $L^*(T)$  представляет собой функцию удельной теплоты фазового перехода, зависящую от температуры. Предлагается объединить рассмотренные два подхода и сглаживание коэффициента теплоемкости проводить не на всем интервале  $(T_S, T_L)$  сразу, а на его разбиениях. При этом в качестве сглаживающей зависимости используется функция  $L^*(T)$ . Пусть интервал  $(T_S, T_L)$  разбит на  $N$  частей с шагом  $\Delta$ :  $\Theta = \{T_i = T_S + i\Delta, i = 0, 1, \dots, N\}$ . Эффективный коэффициент теплоемкости вычислим по формуле:

$$\tilde{C}(T) = \begin{cases} C_1, T \leq T_L \\ C_1 - \frac{L^*(T)}{\Delta}, T_i < T < T_{i+1}, i = 0, 1, \dots, N-1 \\ C_2, T \geq T_S \end{cases} \quad (18)$$

Интервалы сглаживания  $\Delta$  подбираются оценкой характерных градиентов температур, как в классическом подходе решения задачи Стефана.

На рис. 3 представлены использованные в расчетах зависимости удельной теплоты фазового перехода при кристаллизации  $L_{крисст}^*(T)$  и плавлении  $L_{пл}^*(T)$  полиэтилена от температуры, рассчитанные на основе кривых ДСК, зарегистрированных DSC 204 F1 phoenix NETZSCH. Коэффициент теплопроводности в интервале фазового перехода изменялся линейно от значения  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ .

Различие в значениях температур плавления и кристаллизации и протекания фазового перехода интервале температур приводят к тому, что в некоторых точках сварного соединения максимальная температура не достигает значения температуры окончания плавления и, соответственно, в математической модели имитируется поглощение меньшего количества теплоты. В то же время, при охлаждении температура изменяется почти на всем интервале температур кристаллизации и выделяется значительно больше теплоты. Поэтому для сохранения теплового баланса вводится коэффициент  $k_{мб}$ , на который умножается функция



$L_{крис\tau}^*(T)$ . Коэффициент  $k_{\text{мб}}$  вычисляется по следующей формуле:

$$k_{\text{мб}} = \frac{\int_{T_{\text{нл}}-40}^{T^*} L_{\text{нл}}^*(T) dT}{\int_{T_{\text{крис\tau}}-40}^{T^*} L_{\text{крис\tau}}^*(T) dT}, \quad (14)$$

где  $T^*$  - значение максимальной температуры. Если  $T^* < T_{\text{нл}} - 40$  при охлаждении кристаллизация не происходит и  $k_{\text{мб}} = 0$ , если  $T^* > T_{\text{нл}} + 10$  удельная теплота плавления равна удельной теплоте кристаллизации и  $k_{\text{мб}} = 1$

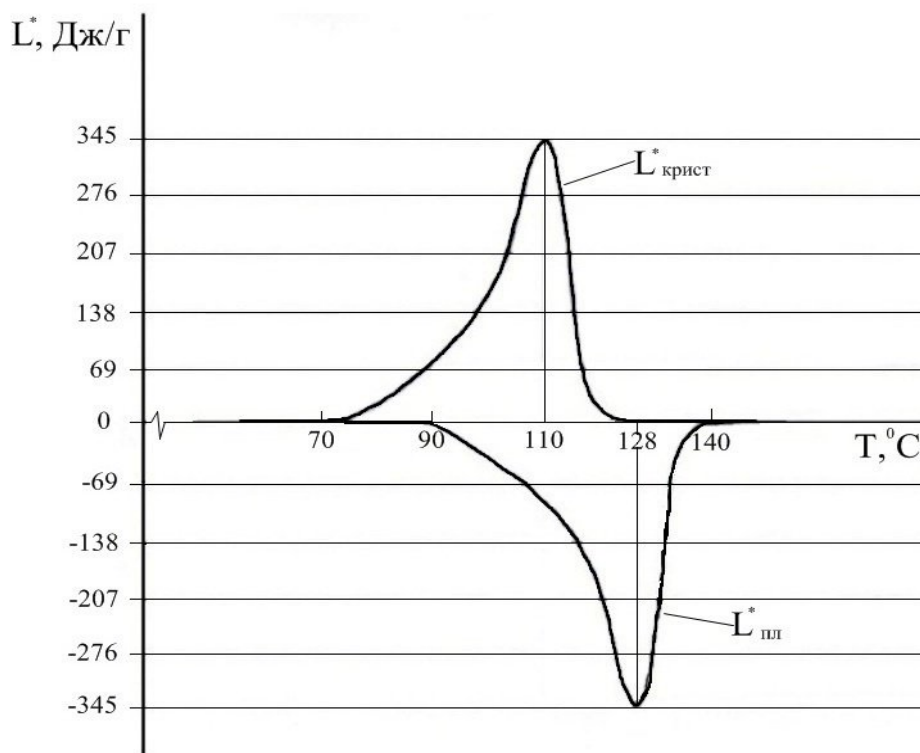


Рисунок 3. Зависимости удельной теплоты фазового перехода при кристаллизации и плавлении полиэтилена от температуры

Задача Стефана с фазовым переходом в спектре температур решалась методом конечных разностей. На рис. 2 теоретическая зависимость температуры от времени (кривая 3), полученная с помощью изложенного способа учета теплоты фазового перехода, с удовлетворительной для практического использования точностью описывает экспериментальную кривую. Такие же результаты получены и для других экспериментальных данных.

**Вывод.** При математическом моделировании теплового процесса при сварке полиэтиленовых труб для газопроводов с помощью муфт с закладными нагревателями необходимо учитывать протекание фазового перехода в интервале температур.

### Литература

1. СП 42-103-2003. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов. – М.: Полимергаз, ФГУП ЦПП, 2004. – 86 с.
2. Пат. РФ № 2343331 RU F16L 13/00, 47/00. Способ сварки полимерных труб / Старостин Н.П., Герасимов А.И., Аммосова О.А.; Инст. проблем нефти и газа СО РАН. – 2006144681/06; заявл. 14.12.2006; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1.
3. Аммосова О.А., Герасимов А.И., Старостин Н.П. Сварка полиэтиленовых труб встык при температурах воздуха ниже нормативных. Часть 1 // Пластические массы.- 2008, №9.- С. 38-41.
4. Аммосова О.А., Герасимов А.И., Старостин Н.П. Сварка полиэтиленовых труб встык при температурах воздуха ниже нормативных. Часть 2 // Пластические массы.- 2008, №10.- С. 45-46.
5. Гориславец В.М., Таран А.Г., Обвинцев В.И., Гисер Е. Ш.-М. Динамика плавления полиэтилена в сварном соединении, получаемом при помощи муфты с закладным нагревательным элементом // Автоматическая сварка, 1984, №10 (379). – С. 28-32.
6. Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач со свободной границей. М.: Изд-во МГУ, 1987.- 164 с.
7. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана //Журн. Вычисл. математики и мат. физики, 1965, Т. 5., №5. - С.816-827.
8. Горилловский М.П., Калугина Е.В., Иванов А.Н., Сатдинова Ф.К. Исследование кристалличности и термостабильности в трубах, полученных из различных видов полиэтилена // Пластические массы, 2005, №5. –С. 9-12.
9. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. – Рига: Зинатне, 1980. – 180 с.