

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ СВАРКИ
ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ СОЕДИНЕНИЙ.
ЧАСТЬ I. РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА**

Николаева Мария Александровна

*кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории климатических испытаний,
Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия
E-mail: eowa@mail.ru*

Данзанова Елена Викторовна

*кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории климатических испытаний,
Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия
E-mail: dhv4071@mail.ru*

Старостин Николай Павлович

*доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории климатических испытаний,
Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия
E-mail: nikstar56@mail.ru*

*Работа выполнена в рамках Госзадания
Министерства науки и высшего образования РФ № 122011100162-9
и государственного контракта № 5304
ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»*

Предмет исследования: тепловой процесс приварки седловых отводов ПЭ100 к полиэтиленовым трубам действующих газопроводов при низких температурах.

Цель исследования: разработка эффективного способа приварки седловых отводов к полиэтиленовым трубам газопроводов при температурах окружающего воздуха до минус 50 °С на основе управления тепловым процессом путем введения в технологический процесс предварительного подогрева с последующим остыванием для выравнивания температуры и охлаждения соединения под слоем теплоизоляционного материала расчетной толщины.

Методы и объекты исследования: в первой части работы объектом исследования является нестационарный тепловой процесс сварки. Математическая модель теплового процесса учитывает теплоту фазового превращения полиэтилена в интервале температур, зависимость теплофизических характеристик от температуры и степени кристалличности материала.

Основные результаты исследования: расчетами определены параметры приварки седлового отвода, при которых обеспечивается протекание теплового процесса по закономерности, свойственной сварке в условиях допустимой температуры окружающего воздуха. Ожидается, что управление тепловым процессом позволит получить структуру материала сварного соединения, обеспечивающую прочность шва соответствующую прочности шва, полученного при сварке в условиях допустимых температур.

Ключевые слова. Седловой отвод, полиэтиленовая труба, приварка, математическое моделирование, тепловой процесс, фазовый переход, метод конечных элементов, охлаждение.

**INFLUENCE OF TEMPERATURE AND TIME MODES OF POLYMER PIPES WELDING
AT LOW TEMPERATURES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF
MATERIALS OF COMPOUNDS.
PART I. CALCULATION OF THE HEAT PROCESS**

Maria A. Nikolaeva

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher, Laboratory of Climate Tests
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS
Yakutsk, Russia
E-mail: eowa@mail.ru*

Elena V. Danzanova

*Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher, Laboratory of Climate Tests
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS
Yakutsk, Russia
E-mail: dhv4071@mail.ru*

Nikolai P. Starostin

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Chief Researcher, Laboratory of Climate Tests
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS
Yakutsk, Russia
E-mail: nikstar56@mail.ru*

*The work was carried out within the framework
of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation No. 122011100162-9 and State Contract No. 5304
of the State Budgetary Institution "Academy of Sciences
of the Republic of Sakha (Yakutia)"*

Subject of research: thermal process of welding PE100 saddle branches to polyethylene pipes of existing gas pipelines at low temperatures.

Purpose of research: development of an effective method for welding saddle branches to polyethylene pipes of gas pipelines at ambient temperatures up to minus 50 °C based on thermal process control by introducing preheating into the technological process with subsequent cooling to equalize the temperature and cool the joint under a layer of thermal insulation material of calculated thickness.

Methods and objects of research: in the first part of the work, the object of study is the non-stationary thermal process of welding. The mathematical model of the thermal process takes into account the heat of the phase transformation of polyethylene in the temperature range, the dependence of thermophysical characteristics on temperature and the degree of crystallinity of the material.

Main results of research: calculations have determined the welding parameters of the saddle branch, which ensure the flow of the thermal process according to the regularity inherent in welding under conditions of permissible ambient temperature. It is expected that the control of the thermal process will make it possible to obtain a structure of the welded joint material that ensures the strength of the seam corresponding to the strength of the seam obtained by welding under conditions of acceptable temperatures.

Keywords. Saddle branch, polyethylene pipe, welding, mathematical modeling, thermal process, phase transition, finite element method, cooling.

Введение

Полимерные трубы получили широкое распространение при монтаже водопроводных и канализационных коммуникаций, строительстве газопроводов. Во многих случаях такие трубы успешно используются вместо традиционных чугунных, керамических, стальных, асбестоцементных и бетонных труб. В данной работе будут рассматриваться вопросы сварки наиболее распространенных среди полимерных труб для газоснабжения – труб из полиэтилена высокой плотности. Температура окружающего воздуха, при которой рекомендуется выполнять сварку полиэтиленовых труб, имеет ограничения, регламентируемые нормативными документами. Сварку полиэтиленовых труб допускается выполнять в интервале температур от -10 до +40 °С. В зимних условиях северных регионов на месте аварии газопровода стенка трубы быстро охлаждается до температуры ниже допустимых для проведения сварочных работ. В связи с этим рекомендуется использовать временные укрытия (палатки) для подогрева и достижения на стенке трубы температуры, допустимой для выполнения сварочных работ. Время, затрачиваемое на все процедуры, варьируется от 4 до 16 часов в зависимости от типоразмера труб. Естественно, способ сварки с такими затратами времени не пригоден для выполнения ремонтных работ на таких ответственных объектах, как газопроводы.

Для допустимого для сварки ПЭ труб интервала температур воздуха температурно-временные режимы обуславливают формирование структурных образований в материале зоны термического влияния (ЗТВ) и сварного шва, обеспечивающих необходимую прочность всего соединения. Основная гипотеза данной работы заключается в следующем. При сварке ПЭ труб в условиях низких температур обеспечение в ЗТВ температурно-временных режимов близких к динамике изменения температуры в нормативных условиях сварки, позволит получить структуру материалов сварного соединения, при которой достигается прочность сварного шва на соответствующем уровне.

В данной работе будет показана возможность сокращения времени, затрачиваемого на приварку при низких температурах воздуха седлового отвода к газопроводу под давлением и достижения прочностных показателей сварных соединений не ниже, чем при сварке в условиях допустимых температур.

В первой части работы на основе математического моделирования будет показана возможность введением дополнительных операций обеспечения в ЗТВ при низких температурах динамики температурного поля, как и при стандартной сварке в нормальных условиях. Выбор седлового отвода в качестве примера обусловлен тем, что при математическом моделировании теплового процесса при его приварке необходимо учитывать такие особенности теплового процесса сварки ПЭ труб деталями с закладными нагревателями, как трехмерность процесса и конвективный теплообмен внутренней поверхности трубы с движущимся газом. Такие особенности не рассматривались, например, при моделировании теплового процесса электродуговой сварки [1].

Во второй части намечается изложить результаты исследований прочностных свойств сварных соединений, выполненных при естественно низких температурах по различным температурно-временным режимам. Также планируется изучение влияния рассчитанных параметров сварки на формирование структурных образований в материале сварных соединений различными методами исследований.

Для сварки полиэтиленового седлового отвода при низкой температуре воздуха предлагается выполнить следующие операции:

- обернуть внешние свободные поверхности отвода слоем теплоизоляции;
- перед сваркой подогреть свариваемый участок подачей на клеммы закладного нагревателя напряжения, не допускающего оплавления полимерного материала в течение процесса подогрева;

- свободным охлаждением произвести выравнивание температур в сварном соединении до достижения средней температуры в зоне термического влияния значений из нормативного интервала проведения сварочных работ;
- произвести нагрев (оплавление) серийным сварочным аппаратом в регламентированном режиме, имитируя на датчике достигнутую среднюю температуру в зоне термического влияния;
- все операции, включая охлаждение сварного соединения, произвести под теплоизоляционным слоем для обеспечения скорости охлаждения, как при стандартной сварке.

Реализация предлагаемой технологии сварки седлового отвода к трубе приводит к определению следующих параметров: напряжения предварительного подогрева, продолжительностей подогрева и выравнивания температур, толщину теплоизоляционного слоя. Поскольку экспериментальное определение совокупности технологических параметров, зависящих от температуры окружающего воздуха, типоразмеров труб и седловых отводов достаточно сложно, необходимо привлекать методы математического моделирования теплового процесса приварки. Тогда параметры могут быть определены из условия обеспечения протекания теплового процесса приваривания при низких температурах по закономерностям, свойственным для допустимых для сварки температур окружающего воздуха.

Результаты и обсуждение

Постановка задачи

Введение концентрированной энергии в зону соединения при сварке сопровождается сложными физическими и химическими процессами. Приоритетным из них является тепловой, являющийся ключевым для остальных процессов, происходящих при сварке. Поэтому решению тепловой задачи сварки всегда уделяется особое внимание [2]. На тепловой процесс сварки существенное влияние оказывает скрытая теплота фазового перехода. При плавлении и кристаллизации термопластов не существует четко выраженной границы раздела фаз. Фазовый переход происходит в интервале температур. В связи с этим, при математическом моделировании тепловых процессов в изделиях из термопластов скрытую теплоту фазового перехода зачастую учитывают, используя уравнения кинетики кристаллизации полимеров. При этом параметры уравнения кинетики идентифицируются по данным, например, дифференциального сканирующего калориметра (ДСК). В данной работе теплота фазового перехода учитывается, непосредственно используя данные ДСК.

На рисунке 1 представлена расчетная область Ω седлового отвода (подобласть D_1) и участка полиэтиленовой трубы (подобласть D_2). Для сокращения времени расчета рассматривалась четвертая часть трубы с седловым отводом. Нагревательный элемент (подобласть D_3), вмонтированный в тело седлового отвода, представляет собой кольцо с толщиной равной диаметру проволоки нагревателя.

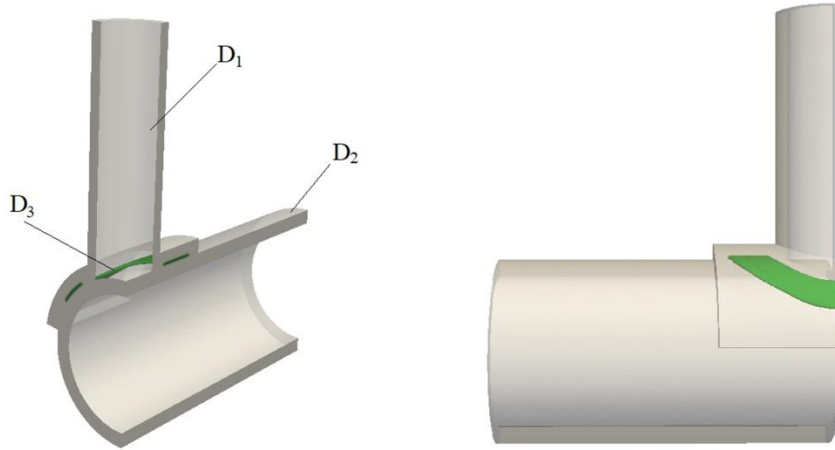


Рисунок 1 – Расчетная область седлового отвода и участка трубы

Для описания теплового процесса приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе использовалось уравнение теплопроводности, учитывающее теплоту фазового перехода в интервале температур [3-6]:

$$\left(c(T) - \rho^- L^{100\%} \frac{dX_C}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad} T) + Q(T),$$

$$(r, z) \in \Omega, \quad 0 < t \leq t_m, \quad (1)$$

где

$$X_C(T) = \begin{cases} X_C^\infty, & T \leq T_1, \\ X_C^\infty - \frac{\int_{T_1}^T q(u) du}{L^{100\%} v_T}, & T_1 < T < T_2, \\ 0, & T \geq T_2, \end{cases} \quad (2)$$

$$c(T) = \rho^+ c^+ + X_C(T) \cdot (\rho^- c^- - \rho^+ c^+),$$

$$\lambda(T) = \lambda^+ + X_C(T) \cdot (\lambda^- - \lambda^+).$$

T – температура; t – время; t_m – расчетное время; c^-, ρ^-, λ^- и c^+, ρ^+, λ^+ – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность для твердой и жидкой фазы полиэтилена соответственно; $Q(t)$ – плотность теплового источника (нагревателя); $L^{100\%}$ – удельная теплота фазового перехода полностью кристаллического полиэтилена; X_C, X_C^∞ – текущее значение степени кристалличности полиэтилена и до начала процесса сварки; T_1, T_2 – температуры начала и конца фазового превращения; $q(T)$ – зависимость теплового потока от температуры, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК); v_T – скорость изменения температуры.

Дифференцируя интеграл в формуле (2) по переменному верхнему пределу, имеем:

$$L^{100\%} \frac{dX_C}{dT} = \begin{cases} 0, & T \leq T_1, \\ -\frac{q(T)}{v_T}, & T_1 < T < T_2, \\ 0, & T \geq T_2. \end{cases} \quad (3)$$

Формула (3) позволяет определять эффективный коэффициент теплоемкости в уравнении (1), учитывающий теплоту фазового превращения при различных скоростях изменения температуры.

На свободных боковых поверхностях трубы и седлового отвода задается условие конвективной теплоотдачи в окружающую среду (воздух) с температурой T_0 . На внутренней поверхности трубы – условие конвективной теплоотдачи в транспортируемый газ с температурой T_{gas} . На торцах трубы задается температура окружающего воздуха T_0 .

Результаты расчетов

В расчетах рассматривалось приваривание седлового отвода 110/63 к полиэтиленовой трубе ПЭ 100 SDR 11 110×10,0 при $T_0 = -45$ °С. В нормативных условиях, например при температуре 10 °С, сварка проводится с напряжением 39,5 В, время нагрева (оплавления) – 210 с, время охлаждения – 30 мин. В таблице 1 приведены значения теплофизических свойств материала трубы, использованные в расчётах.

Таблица 1 – Свойства свариваемых материалов

Полиэтилен (жидкая фаза)			Полиэтилен (твёрдая фаза)		
c^+ , Дж/(кг·°С)	ρ^+ , кг/м ³	λ^+ , Вт/(м·°С)	c^- , Дж/(кг·°С)	ρ^- , кг/м ³	λ^- , Вт/(м·°С)
2200	800	0,29	1900	954	0,38

Мощность нагревателя вычислялась по формуле: $Q(T) = \frac{U^2}{R \cdot (1 + \beta(T - 20))}$, где R – сопротивление закладного нагревателя при температуре 20 °С; β – температурный коэффициент сопротивления.

Задача решалась с помощью программного комплекса Dolfin/FEniCS методом конечных элементов [7-8]. Триангуляция вычислительной расчетной области Ω осуществлялась с использованием генератора сетки Gmsh [9]. Визуализация полученных результатов проводилась графическим пакетом Paraview [10].

При приваривании седлового отвода к полиэтиленовой трубе при температурах воздуха ниже нормативных все операции выполняются с теплоизоляционным слоем на внешней поверхности отвода и участков трубы. Для того чтобы расчетная область оставалась неизменной при варьировании толщины теплоизоляционного слоя на внешней границе седлового отвода вводился эффективный коэффициент теплообмена α_{eff} , значение которого зависит от коэффициента теплообмена поверхности с воздухом α_0 , толщины h_{iz} и теплопроводности λ_{iz} теплоизоляционного материала. Значение α_{eff} определяется из формулы [11, 12]: $\frac{1}{\alpha_{eff}} = \frac{1}{\alpha_0} + \frac{h_{iz}}{\lambda_{iz}}$. В качестве теплоизоляционного материала был использован пенофол (вспененный полиэтилен). Теплофизические параметры газа внутри газопровода брались из научных работ [13]. Скорость газа внутри трубы при ремонтных работах в газопроводе принималась равной 3 м/с и при этом температура газа равна $T_{gas} = -10$ °С. Коэффициент теплообмена внутри трубы α_g вычисляется по формуле [14]:

$$\alpha_g = Nu \frac{\lambda_g}{2R_1}, \quad Nu = 0,023 Pr^{1/3} Re^{0,8} . \quad (4)$$

Искомые параметры приварки седлового отвода при низких температурах определялись методом последовательного анализа вариантов расчета нестационарного температурного поля. В результате расчетов определены следующие технологические параметры приваривания при температуре ОВ минус 45°С: толщина теплоизоляционного слоя – 2 см; напряжение для подогрева – 17,5 В; продолжительность подогрева – 10 минут; продолжительность технологической паузы для выравнивания температур – 2,5 минуты. Сравним температурные поля при приварке в условиях низкой температуры по предлагаемой технологии и в условиях допустимой температуры по стандартной технологии.

На рисунке 2 приведено сравнение размеров оплавленной зоны, ограниченной изотермой со значением температуры 130°С, в сечении вертикальной плоскостью при сварке при температурах ОВ +10 и – 45°С по стандартному режиму, а также при – 45°С с использованием рассчитанных параметров в момент завершения нагрева. Меньший размер оплавленной зоны при сварке в условиях температуры ОВ – 45°С по стандартной технологии свидетельствует о недостаточном оплавлении и высокой скорости охлаждения шва. Как видно из рисунков, оплавленные зоны 130°С при температурах +10 и – 45°С по рассчитанным параметрам приварки практически одинаковы.

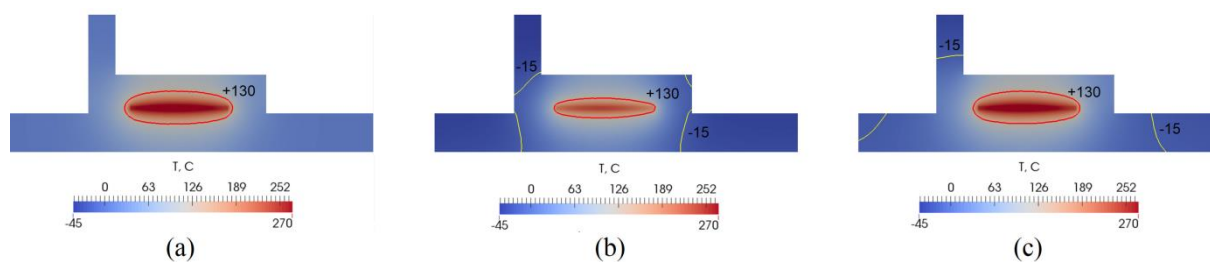


Рисунок 2 – Изотермы 130 °С в сечении седлового отвода и трубы в момент завершения нагрева при приварке по стандартной и предлагаемой технологиям:
а) 10 °С; б) -45 °С; в) – 45 °С по предлагаемой технологии

Расчеты динамики температурных полей после оплавления показали, что ЗТВ достигает максимального объема на третьей минуте охлаждения. Охлаждение ЗТВ соединения под слоем теплоизоляции с расчетной толщиной при низкой температуре ОВ протекает по закономерности, характерной при допустимой температуре на открытом воздухе. На рисунке 3 показано сравнение температур в зоне термического влияния, ограниченной изотермой 80°С, при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе при допустимой температуре воздуха 10°С по стандартной технологии и температуре ниже нормативного – 45°С по предлагаемой технологии в момент времени охлаждения 3 минуты. В обоих случаях на восьмой минуте охлаждения температуры опускаются ниже 80°С, что свидетельствует о завершении процесса кристаллизации.

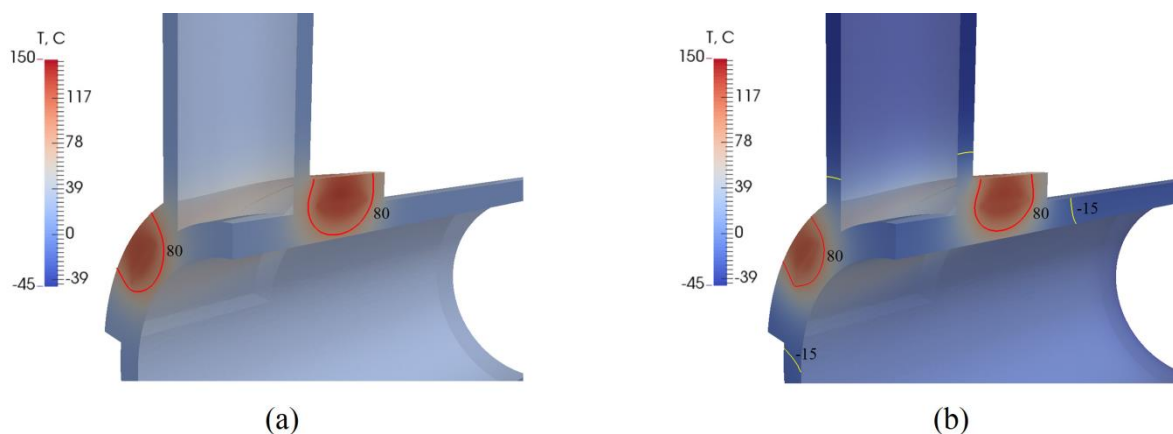


Рисунок 3 – Распределение температуры в ЗТВ при приварке седлового отвода в момент времени охлаждения 3 минуты при температурах воздуха:
а) +10 °С; б) – 45 °С с предварительным подогревом и охлаждением теплоизоляцией

На рисунке 4 представлено сравнение изменений температур по времени при приварке седлового отвода к ПЭ трубе при температуре – 45 °С по предлагаемой технологии и при допустимых для сварки температурах +10 и – 10 °С по стандартному режиму.

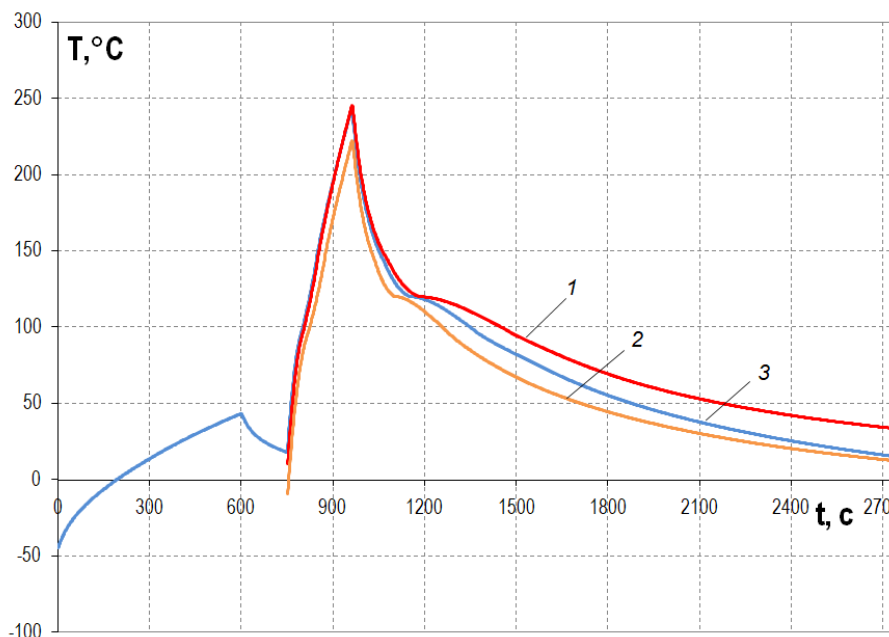


Рисунок 4 – Временные зависимости температур в точке между трубой и седловым отводом при приварке при температурах окружающего воздуха +10°C (1), -10°C (2) по стандартной технологии и минус 45 °C (3) по предлагаемой технологии

Формирование общей микроструктуры материала сварного соединения происходит при снижении температуры от 140 °C до 80 °C. Считается, что сформировавшаяся структура материала сварного шва и ЗТВ, обеспечивает необходимую прочность соединения, если кривые временных зависимостей температур, в области претерпевшей структурные изменения, лежат в «коридоре» соответствующих температурных зависимостей, получающихся при нормативных для сварки значениях температур воздуха. Из рисунка 4 видно, что кривая 3, указанным условиям соответствует. Аналогичные зависимости получаются и для других точек ЗТВ соединения. При такой динамике температурного поля в зоне термического влияния будет сформирована структура материала сварного шва, обеспечивающая прочность сварного соединения не ниже, чем при стандартной сварке.

Заключение и выводы

Расчетами установлено, что при приваривании седлового отвода к полиэтиленовой трубе действующего газопровода предварительный подогрев с выравниванием температур, нагрев (оплавление) в регламентированном режиме и охлаждение под слоем теплоизоляционного материала с расчетной толщиной обеспечивает динамику температурного поля в зоне термического влияния, характерную для стандартной сварки в нормативных значениях температуры окружающей среды.

Предложенная методика определения параметров приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе будет использована при проведении натурных экспериментов по сварке труб различных типоразмеров для дальнейших исследований структуры и свойств в определенных зонах получаемых сварных соединений.

Литература

1. Starostin, N. P. Management of thermal process for polyethylene gas pipes welding with built-in heater / N. P. Starostin, M. A. Vasileva, O. A. Ammosova. – DOI: 10.1088/1742-6596/1392/1/012086 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1392. – P. 012086.
2. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – Москва : Машгиз, 1951. – 296 с. – Текст : непосредственный.

3. Исследование кристалличности и термостабильности в трубах, полученных из различных видов полиэтилена / М. И. Гориловский, Е. В. Калугина, А. Н. Иванов, Ф. К. Сатдинова. – Текст : непосредственный // Пластические массы. – 2005. – № 4. – С. 9–12.
4. Авдонин, Н. А. Математическое описание процессов кристаллизации / Н. А. Авдонин. – Рига : Зинатне, 1980. – 180 с. – Текст : непосредственный.
5. Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes / Z. Chebbo, M. Vincent, A. Boujlal [et al]. – DOI:10.1002/pen.23878 // Polymer Engineering And Science. – 2015. – V. 55, № 1. – P. 123–131.
6. Spina, R. Simulation of Crystallization of Isotactic Polypropylene with Different Shear Regimes / R. Spina, M. Spekowius, C. Hopmann. – DOI:10.1016/j.tca.2017.10.023 // Thermochimica Acta. – 2018. – V. 659. – P. 44–54.
7. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – Москва : Мир, 1986. – 318 с.
8. Logg, A. Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method: The FEniCSBook / A. Logg, K. A. Mardal, G. Wells. – New York : Springer Sci. & Business Media, 2012. – DOI:10.1007/978-3-642-23099-8.
9. Software package GMSH. – URL: <http://geuz.org/gmsh/> (дата обращения: 31.03.2022).
10. Softwarepackage ParaView. – URL: <http://paraview.org/> (дата обращения: 31.03.2022).
11. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Изд. 2-е. – Москва : Энергия, 1969. – 440 с. – Текст : непосредственный.
12. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги / П. Н. Вабищевич, С. П. Варламов, В. И. Васильев [и др.]. – Текст : непосредственный // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 28, № 10. – С. 110–124.
13. Bondarev, E. A. Generalized mathematical model of hydrate formation in gas pipelines / E. A. Bondarev, I. I. Rozhin, K. K. Argunova. – DOI:10.1134/S002189441903012X // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2019. – V. 60, № 3. – P. 503–509.
14. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Изд. 5-е. – Москва : Атомиздат, 1979. – 416 с. – Текст : непосредственный.