

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 519.63:539.373

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-500-509>



Оригинальная статья

### Управление температурным режимом сварки полиэтиленовых труб в условиях низких температур

Р. С. Тихонов✉, Н. П. Старостин

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация*

✉[roman\\_tikhon@mail.ru](mailto:roman_tikhon@mail.ru)

#### Аннотация

Для широкого применения полиэтиленовых труб при строительстве газопроводов в регионах очень холодного климата необходима разработка оперативной технологии сварки с целью выполнения ремонтно-восстановительных работ без использования теплых укрытий. Предлагается технология оперативной электромужфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах на открытом воздухе с управляемой кристаллизацией материала сварного шва. Сокращение времени выполнения соединения достигается предварительным подогревом с помощью закладного нагревателя и выравнивания температур путем свободного охлаждения. Расчет температурного режима сварки методом конечных элементов показал, что при последующем нагреве по режиму сварки в нормальных условиях объем расплава соответствует объему расплава сварки при допустимой температуре воздуха. Для соблюдения режима кристаллизации расплава полиэтилена в условиях низких температур, характерных для сварки при допустимых температурах воздуха, предлагается изменение мощности нагревателя по времени. Для определения временной зависимости мощности закладного нагревателя, обеспечивающей соответствующую кристаллизацию материала сварного шва и зоны термического влияния, решена обратная задача теплопроводности методом градиентной минимизации функционала. На основе решения несвязанной термоупругой задачи с использованием программного средства Dolphin/FEniCS проведен сравнительный анализ влияния распределений температур на сварочные напряжения при сварке по предлагаемой и стандартной технологиям. Расчетами показано, что при сварке с управляемой кристаллизацией напряжения между трубой и муфтой находятся в допустимом диапазоне. Исследования с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F надмолекулярных структурных образований в материале зоны термического влияния показали, что предлагаемая технология управляемой кристаллизации обеспечивает формирование в зоне термического влияния сферолитов с размерами, характерными для сварки в нормальных условиях.

**Ключевые слова:** полиэтиленовая труба, сварка, тепловой процесс, управление кристаллизацией, надмолекулярная структура, напряжения

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда «Разработка основ сварки полиэтиленовых труб деталями с закладными нагревателями при низких температурах» № 24-29-20135, <https://rscf.ru/project/24-29-20135/>.

**Для цитирования:** Тихонов Р.С., Старостин Н.П. Управление температурным режимом сварки полиэтиленовых труб в условиях низких температур. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):500–509. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-500-509>

## Temperature control for welding polyethylene pipes in low-temperature conditions

Roman S. Tikhonov✉, Nikolay P. Starostin

*Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yakutsk, Russian Federation  
✉roman\_tikhon@mail.ru*

### Abstract

To promote the widespread use of polyethylene pipes in constructing gas pipelines in cold climates, it is essential to develop a welding technology that enables repair and restoration without the need for heated shelters. This article investigates the operational electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures in open air, focusing on controlling the crystallization of the weld material. To reduce the time required for making a joint in low temperatures, we propose using a preheating method using an embedded heater, followed by equalizing temperatures through free cooling. Calculations of the welding temperature regime, performed using the finite element method, indicate that subsequent heating, according to the welding parameters under standard conditions, results in a melt volume that corresponds to the weld melt volume at acceptable air temperatures. To maintain the appropriate crystallization conditions for the polyethylene melt during welding in low-temperature environments, we suggest varying the heater power over time. To determine the time dependence of the embedded heater's power required for proper crystallization of the weld material and heat-affected zone, we solve the inverse problem of thermal conductivity through the gradient minimization of the functional. Using Dolfin/FEniCS software, we conducted a comparative analysis of temperature distributions and their effects on welding stresses during the implementation of the proposed method versus standard technology. Our calculations demonstrate that when utilizing controlled crystallization, the stresses between the pipe and coupling remain within permissible limits. Studies conducted with a JEOL JSM-7800F scanning electron microscope on supramolecular structural formations in the heat-affected zone revealed that the proposed controlled crystallization technique enables the formation of spherulites in the heat-affected zone, with sizes comparable to those observed in welding under normal conditions.

**Keywords:** polyethylene pipe, welding, thermal process, crystallization control, supramolecular structure, stress

**Funding.** This study was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 24-29-20135, titled “Fundamentals of electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures”, <https://rscf.ru/project/24-29-20135/>.

**For citation:** Tikhonov R.S., Starostin N.P. Temperature control for welding polyethylene pipes in low-temperature conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):500–509. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-500-509>

### Введение

Соединения полиэтиленовых (ПЭ) труб для газопроводов выполняются двумя методами сварки: сваркой встык нагретым инструментом и сваркой с закладными нагревателями (ЗН) [1–3]. Сварка с ЗН незаменима при выполнении ремонтных работ на газопроводах в стесненных условиях, когда нет возможности перемещения труб вдоль оси. Нормативные документы рекомендуют сварку с ЗН выполнять в интервале температур окружающего воздуха (ОВ) от –10 до 40 °С. При более низких температурах воздуха необходимо выполнять сварку в укрытиях, где поддерживается температура из допустимого интервала. При этом для

начала проведения сварочных работ концы труб и сварные детали должны выдерживаться при допустимой температуре длительное время в зависимости от толщины стенки. При толщине стенки, превышающей 8 мм, минимальное время кондиционирования составляет 6 ч, при толщине более 16 мм – 10 ч. При выполнении ремонтно-восстановительных работ на газопроводах в зимний период в регионах холодного климата такие длительные подготовительные работы недопустимы. Актуальной является разработка существенно сокращающих затраты времени на выполнение соединения технологий оперативной сварки ПЭ труб при низких температурах.

При сварке полимерных материалов и изделий протекают сложные физические и химические процессы. Тепловой процесс – ключевой для всех остальных, происходящих при сварке. Поэтому его исследованию всегда уделяется особое внимание. Ограничение по температуре воздуха при сварке ПЭ труб связано с повышением скорости охлаждения в сварном соединении. В условиях низких температур при быстром охлаждении процесс формирования надмолекулярной структуры прерывается на промежуточном этапе. Образуется мелкокристаллическая структура, обуславливающая пластичность материала сварного шва [4]. При допустимых же температурах воздуха в зоне структурных изменений температурные поля обуславливают формирование надмолекулярных структурных образований, обеспечивающих прочное соединение. Получение прочного сварного соединения при низких температурах тесно связано с управлением тепловым процессом. Чтобы при сварке в условиях низких температур получить соединение с необходимой прочностью, необходимо выполнение следующих условий. Во-первых, образование такого же объема расплава, как при сварке при допустимой температуре. Во-вторых, обеспечение временного изменения температур в зоне сварного шва и зоне термического влияния, свойственного при сварке в нормальных условиях. Тогда в зоне структурных изменений будут сформированы структурные образования, обеспечивающие прочность соединения не ниже чем при сварке в нормальных условиях.

Технология сварки ПЭ труб деталями с ЗН при температуре ОВ ниже рекомендуемых предложена в работе [5]. В этой технологии для снижения потерь тепла при выполнении всех операций и скорости охлаждения сварного соединения используется слой теплоизоляционного материала. Теоретически и экспериментально установлено, что предварительным подогревом с помощью ЗН и выравниванием температур при отключенном нагревателе в зонах сварного шва и термического влияния можно обеспечить поле температур со значениями в интервале допустимых для выполнения сварки. Тогда нагрев для оплавления свариваемых поверхностей осуществляется в регламентированном режиме сварки. Толщина теплоизоляции определяется расчетным путем из условия обеспечения динамики температурного поля соединения стандартной сварки.

Установлено, что при такой сварке качество соединения не ниже, чем при стандартной сварке. В данной технологии из-за использования теплоизоляционного материала высока вероятность влияния человеческого фактора на качество сварного соединения.

Технология сварки ПЭ труб деталями с ЗН при низких температурах без использования теплоизоляции, позволяющая управлять движением фронта кристаллизации и выполнять соединение в автоматическом режиме, предложена в работе [6]. При этом выполняются подогрев, выравнивание температур дополнительно и нагрев по режиму стандартной сварки. На стадии охлаждения снижение скорости изменения температуры достигается путем обеспечения изменения мощности нагревателя по определенной закономерности. Реализация предлагаемой технологии разработанным прототипом сварочного аппарата описана в работе [7]. Поскольку отличительной особенностью данной технологии является управление процессом формирования кристаллитов, назовем ее технологией с управлением кристаллизацией.

Температурный режим, обуславливающий формирование структуры материала, необходимой для получения качественного соединения, обеспечивается в зоне сварного шва и зоне термического влияния (ЗТВ). Вне указанных зон соединения значения температур могут быть ниже, чем при сварке в условиях допустимых температур воздуха. В результате сварочные давления в соединении, возникающие в условиях неравномерного нестационарного нагрева, могут сильно отличаться от давления сварки при допустимых температурах воздуха, что может снизить качество соединения. В связи с этим наряду с тепловым процессом при сварке необходимо исследование напряженно-деформированного состояния (НДС).

В то же время, НДС сварных соединений, выполненных при низких температурах по технологии с управлением кристаллизацией, не исследовалось. Целью данной работы является исследование термоупругого состояния сварных соединений полиэтиленовых труб для доказательства протекания термомеханических процессов при сварке с управлением кристаллизацией по закономерности, характерной для сварки при допустимых температурах.

#### **Методы исследования**

Рассмотрим сварку ПЭ труб с помощью муфт, наиболее удобную для отработки методик расчета. Учитывая осевую симметрию и симметрич-

ное расположение труб относительно середины муфты, исследовалось термоупругое состояние стенок трубы и муфты, схема которых представлена на рис. 1. Нестационарное температурное поле  $T(r,z,t)$  в стенках трубы и муфты при выполнении всех операций сварки в условиях низких температур (подогрев, выравнивание температур, нагрев и охлаждение) описывалось уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах с учетом осевой симметрии:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q(t)}{V} \gamma, \quad (1)$$

$$(r, z) \in \Omega; \quad 0 < t \leq t_{\text{cool}};$$

$$\gamma = 1, (r, z) \in S; \quad \gamma = 0, (r, z) \notin S,$$

где  $t$  – время;  $r, z$  – цилиндрические координаты;  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – теплопроводность;  $V$  – объем нагревателя.

В области расположения нагревателя в уравнении (1) берутся значения свойств металлического нагревателя, в остальной части – свойства полиэтилена. Теплота фазового превращения учитывается введением эффективной теплоемкости [8, 9]. Кроме того, учитывается зависимость теплофизических свойств полиэтилена от степени кристалличности и температуры [7].

При подогреве, нагреве и охлаждении свариваемых труб и муфты ЗН действует как равномерно распределенный источник теплоты мощностью  $Q(t)$ . При выравнивании температур источник теплоты равен нулю. На стадии подогрева и выравнивания максимальная температура не превышает температуры размягчения полиэтилена, что позволяет плотность  $\rho$ , удельную теплоемкость  $c(T)$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda(T)$  считать постоянными и равными их значениям в твердой фазе  $\rho^-, c^-$  и  $\lambda^-$ .

На свободных поверхностях труб и муфты  $\Gamma$  задавалось условие конвективного теплообмена с ОВ вида

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0), \quad (r, z) \in \Gamma_i, \quad i = 1, 2, 3, 5, \quad (2)$$

где  $n$  – нормаль к поверхности;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

На границе  $\Gamma_0$  задавалось условие равенства нулю теплового потока, являющееся следствием симметричного расположения труб относительно середины муфты. По линии  $\Gamma_4$ , достаточно удаленной от теплового источника, принималось допущение о справедливости граничного условия первого рода:

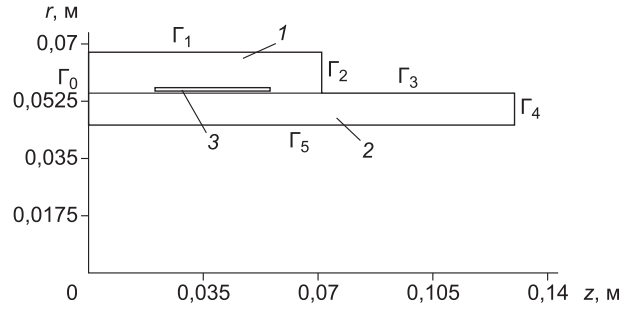


Рис. 1. Расчетная схема электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб. Расчетная схема электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб: 1 – муфта; 2 – труба; 3 – нагревательный элемент;  $\Gamma_0$ – $\Gamma_5$  – границы

Fig. 1. Design scheme for the electrofusion welding of polyethylene pipes. Design scheme of electrofusion welding of polyethylene pipes: 1 – coupling; 2 – pipe; 3 – heating element;  $\Gamma_0$ – $\Gamma_5$  – boundaries

$$T(r, z, t) = T_{\text{окр}}, \quad (3)$$

где  $T_{\text{окр}}$  – температура ОВ.

Для определения деформаций, вызванных неоднородностью температурного поля, были приняты следующие граничные условия:

$$\sigma n = \beta(T - T_0),$$

$$x \in \Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_5;$$

$$u_z = 0, \quad x \in \Gamma_0; \quad u = 0, \quad x \in \Gamma_4, \quad (4)$$

где  $\beta = \beta_T(3\lambda + 2\mu)$ ,  $\beta_T$  – температурный коэффициент линейного расширения,  $\lambda, \mu$  – коэффициенты Ламе,  $T$  – текущая температура,  $T_0$  – равновесная температура.

Пренебрегая влиянием деформаций на температурное поле, для описания термоупругости используем квазистационарное приближение, которое позволяет уравнения теплопроводности и упругости решать последовательно [10, 11]. Сначала решается уравнение теплопроводности с начальными и краевыми условиями. Полученное температурное поле в текущий момент времени подставляется в уравнение упругости. Используя равенство энергии деформации и внутренних объемных сил энергии поверхностных сил, запишем вариационную постановку термоупругой задачи:

$$2\pi \int_{\Omega} \{e^T(\mathbf{v}) D \varepsilon(\mathbf{u}) - (\beta \text{grad}(T - T_0), \mathbf{v})\} r dr dz =$$

$$= 2\pi \int_{\Gamma} \beta(T - T_0) \mathbf{v} r ds. \quad (5)$$

Здесь  $\mathbf{v}$  – пробная вектор-функция для вектора перемещений  $\mathbf{u}$ ,  $D$  – известная матрица перехода между компонентами тензоров напряжений и деформаций.

### Результаты и обсуждение

Рассматривалась сварка ПЭ труб 100 диаметром 110 с толщиной стенки 10 мм с помощью муфты с ЗН. Учитывая плотное расположение витков, ЗН представлялся в виде медной трубки длиной 34 мм и толщиной стенки 0,7 мм. При допустимой температуре сварка проводится, подавая на клеммы напряжение  $U = 40$  В, время нагрева – 200 с, время охлаждения – 15 мин.

В расчетах использовались следующие значения теплофизических свойств трубного полиэтилена в твердой фазе:  $c^- = 1900$  Дж/(кг·°C);  $\rho^- = 950$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda^- = 0,38$  Вт/(м·°C). В жидкой фазе –  $c^+ = 2150$  Дж/(кг·°C);  $\rho^+ = 850$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda^+ = 0,26$  Вт/(м·°C). При сварке в условиях допустимых температур известны подаваемое напряжение и время нагрева. В этом случае мощность теплового источника вычислялась по формуле

$$Q(t) = \frac{U^2}{R \cdot (1 + \beta_R(T - 20))}. \quad (6)$$

Сопротивление нагревателя для рассматриваемой муфты  $R = 0,96$  Ом. Свойства материала закладного нагревателя: удельная теплоемкость  $c = 410$  Дж/(кг·°C); плотность  $\rho = 8960$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 401$  Вт/(м·°C), температурный коэффициент электрического сопротивления  $\beta_R = 0,0043$  1/°C.

Задача (1)–(5) решалась методом конечных элементов, используя программу свободного доступа Dolfin/FEniCS [12, 13]. Для триангуляции расчетной области использовался генератор сетки Gmsh [14]. Визуализация полученных результатов осуществлялась пакетом программ Paraview [15].

Предполагалось, что трубы и муфта выдержаны на открытом воздухе с температурой –40 °C достаточно длительное время, чтобы на их стенках установилась однородная температура. Предпо-

лагая, что на клеммы муфты подается напряжение 11 В в течение 22 мин, моделировался предварительный подогрев сборки труб с муфтой. Выравнивание температур при отключенном нагревателе осуществлялось в течение 4 мин. В результате в ЗТВ и зоне сварного шва значения температур лежат в интервале от 28,5 до 38,4 °C. Полученное температурное поле в свариваемых областях позволяет произвести нагрев в стандартном режиме. На рис. 2 представлены температурные поля в момент завершения нагрева в нормальных условиях и при температуре –40 °C по предлагаемой технологии.

Термический анализ показывает, что фазовое превращение трубного полиэтилена происходит в интервале от 120 до 140 °C. На рис. 2 показаны изотермы с температурой 140 °C, ограничивающие области полностью расплавленного полимера. Объемы расплавов свариваемых участков труб и муфты при нагреве в условиях низкой температуры с предварительным подогревом и в нормальных условиях получаются практически одинаковыми. Различаются распределения температур на удаленных от нагревателя участках, что может обуславливать различие сварочных давлений.

Научный интерес представляет стадия охлаждения, при которой необходимо обеспечить в зоне структурных изменений кристаллизацию расплава полиэтилена по закономерности, свойственной при сварке в условиях допустимой температуры воздуха. Для определения временной зависимости мощности закладного нагревателя, обеспечивающей кристаллизацию материала сварного шва и ЗТВ, как при допустимой для сварки температуре, решалась обратная задача. В качестве дополнительной температурной информации при решении обратной задачи определения функции  $Q(t)$  использовались значения температур, полученные расчетом при сварке в условиях допусти-

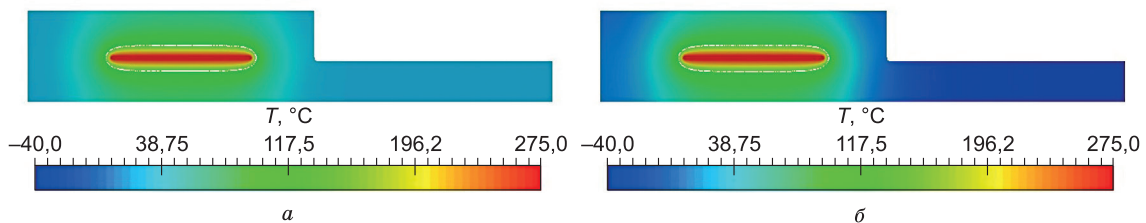


Рис. 2. Температурные поля в конце стадии нагрева сварки при температурах 20 °C (а) и –40 °C (б) по разработанной технологии

Fig. 2. Temperature distributions at the conclusion of the welding heating phase at temperatures of: а) 20 °C; б) –40 °C according to the developed technology

мой температуры. Расчеты проводились для температуры воздуха 20 °С. Значения температур во временном интервале охлаждения брались на границе зон сварного шва и термического влияния, представляющей изотерму 140 °С в момент завершения нагрева стандартной сварки. Выбор местоположения точек задания температур обусловлен тем, что при механических испытаниях сварных соединений разрушение чаще происходит по зоне термического влияния. В этой зоне материал полностью не расплавляется и находится в двухфазном состоянии.

Для обеспечения прочного соединения при сварке в условиях низких температур мощность нагревателя при охлаждении будем определять из условия обеспечения движения фронта кристаллизации полиэтилена в ЗТВ, как при допустимой температуре. Дополнительную температурную информацию для решения обратной задачи зададим в точках изотермы 140 °С.

Пусть временные зависимости температур  $f_k(t)$ , служащие дополнительной информацией для решения обратной задачи, получены в точках с координатами  $(r_k, z_k)$ ,  $k = 1, \dots, n$ . Тогда обратная задача состоит в определении функций  $Q(t)$  и  $T(r, z, t)$  на стадии охлаждения из условия минимума функционала

$$J[Q(t)] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \int_0^{t_{\text{cool}}} \rho_k(t) [T(r_k, z_k, t) - f_k(t)]^2 dt, \quad (7)$$

представляющего меру отклонения температур  $T(r_k, z_k, t)$ , полученных решением уравнения (1) с условиями (2)–(3) при известном приближении функции  $Q(t)$ , от заданных  $f_k(t)$ . Для упрощения изложения время начала охлаждения взято за ноль. В качестве начального условия бралось распределение температуры в конце нагрева. Нелинейная обратная задача определения мощности нагревателя при охлаждении в условиях низких температур решалась итерационным методом на основе метода сопряженных градиентов [16, 17].

На рис. 3 приведена функция мощности нагревателя от времени при охлаждении, полученная решением обратной задачи.

Далее предполагается, что при охлаждении сварочный аппарат автоматически обеспечивает временное изменение мощности ЗН согласно функции, полученной решением обратной задачи. В результате управления тепловым процессом, несмотря на интенсивную теплоотдачу в окружающую среду с низкой температурой, температурный режим на стадии охлаждения в зоне структур-

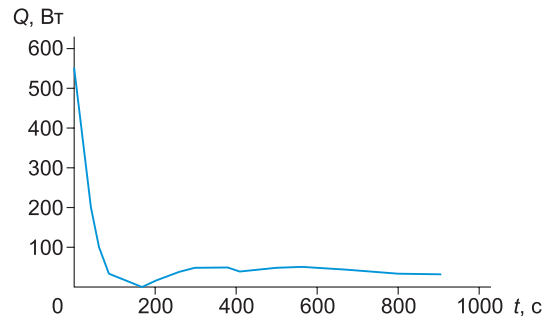


Рис. 3. Зависимость функции мощности нагревателя от времени на стадии охлаждения

Fig. 3. Dependence of the heater power on time during the cooling stage

ных изменений будет обуславливать формирование надмолекулярных структур, характерных при сварке в условиях допустимых температур.

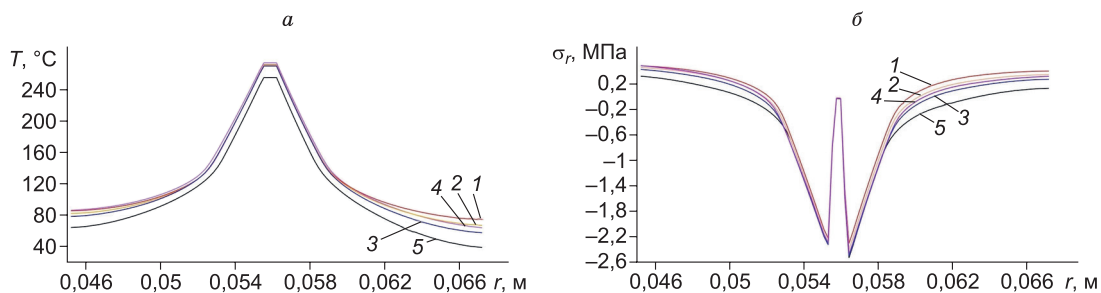
Приведем анализ НДС сварных соединений ПЭ труб, выполненных при различных температурах ОВ. За равновесную температуру примем 20 °С. При расчетах использовались следующие значения свойств материала трубы и муфты: температурные коэффициенты линейного расширения полиэтилена в твердой и жидкой фазе соответственно  $\beta^- = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ;  $\beta^+ = 2,8 \cdot 10^{-5}$  1/К; модули упругости  $E^- = 250,0$ ;  $E^+ = 12,5$  МПа; коэффициенты Пуассона  $\nu^- = 0,35$ ;  $\nu^+ = 0,49$ . Для материала нагревателя  $E = 100$  ГПа;  $\nu = 0,34$ . В интервале фазового превращения принято линейное изменение свойств материала от температуры.

При сварке ПЭ труб деталями с ЗН прочность соединения зависит от многих параметров. Первостепенную роль имеют радиальные напряжения в зоне шва. На рис. 4 показаны распределения температур и напряжений по радиусу в областях максимальных и минимальных значений температур в окрестности ЗН.

Несмотря на различие распределений температур по радиусу в удаленных от нагревателя участках соединения, сжимающие радиальные напряжения между трубой и муфтой ( $r = 0,055$  м) в момент начала охлаждения при сварке в различных условиях практически равны.

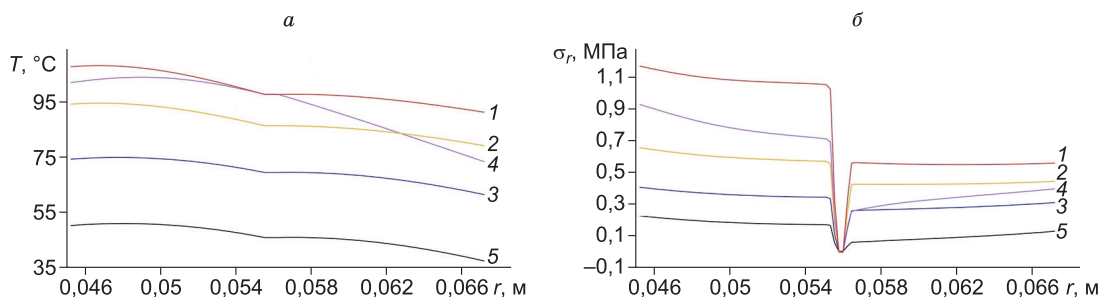
На рис. 5, а представлены распределения температур по радиусу в середине свариваемого участка трубы и муфты в конце охлаждения.

Распределение температуры в окрестности между трубой и муфтой ближе к значениям температур при сварке при +40 °С, но не превышает допустимые. Такое распределение достигнуто



**Рис. 4.** Распределения температур и радиальных напряжений по вертикальной линии, проходящей через середину и конец закладного нагревателя, при сварке при температурах, °С: 40 (1), 20 (2), –10 по стандартному режиму (3), –40 по предлагаемой технологии (4), –40 с нарушением в момент завершения нагрева (5)

**Fig. 4.** The distribution of temperatures and radial stresses along a vertical line passing through the center and end of the embedded heater during welding is presented for the following temperature conditions: (1) 40 °С, (2) 20 °С, (3) –10 °С under the standard mode; (4) –40 °С according to the proposed technology; and (5) –40 °С with a deviation at the moment of heating completion.



**Рис. 5.** Распределения температур и радиальных напряжений по вертикальной линии, проходящей через середину закладного нагревателя, при сварке при температурах, °С: 40 (1), 20 (2), –10 по стандартному режиму (3), –40 по предлагаемой технологии (4), –40 °С с нарушением в конце охлаждения (5)

**Fig. 5.** The distribution of temperatures and radial stresses along a vertical line passing through the center of the embedded heater during welding is presented for the following temperature conditions: (1) 40 °С, (2) 20 °С, (3) –10 °С, corresponding to the standard mode; (4) –40 °С, according to the proposed technology; and (5) –40 °С with a deviation occurring at the end of the cooling phase

специальным выбором в функционале (7) весовых функций  $\rho_k(t)$  для повышения значимости заданной температурной информации в конце ЗН. При этом значимость заданной температуры в середине нагревателя была снижена.

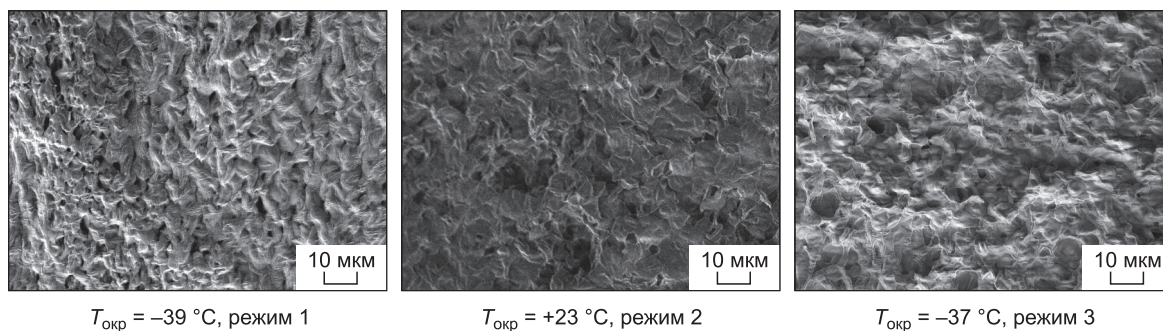
На рис. 5, б радиальные напряжения становятся растягивающими и их значения при сварке в условиях низкой температуры по предлагаемой технологии изменяются в пределах допустимых.

Выполнены электромуфтовые сварные соединения труб ПЭ100 Ø110 SDR 11 при различных режимах сварки: 1 – по предлагаемой технологии для низкой температуры; 2 – по режиму для допустимой температуры, 3 – в условиях низкой температуры по режиму для допустимой температуры (с нарушением). Проведены исследования надмолекулярных структурных образований в материалах сварных соединений, выполненных при различных режимах сварки,

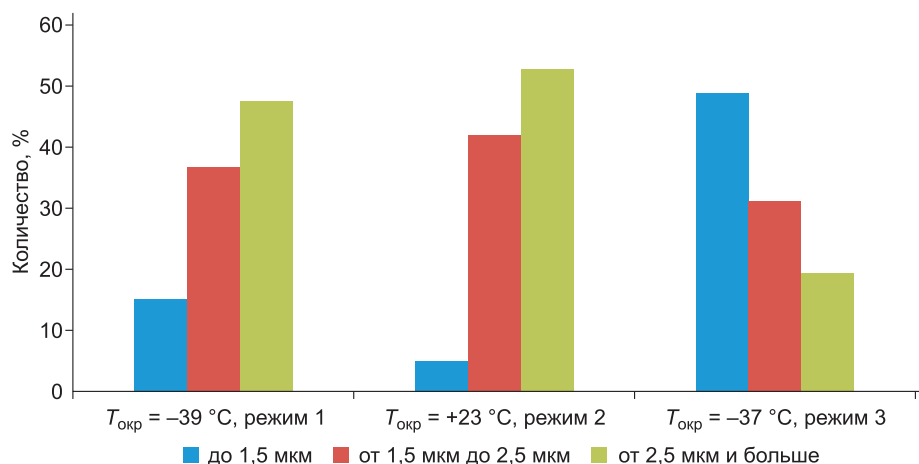
с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F (Япония). На рис. 6 представлены снимки надмолекулярной структуры материала зоны термического влияния, определенной расчетным путем.

По полученным снимкам определены распределения надмолекулярных образований (сферолитов) по размерам. На рис. 7 представлены гистограммы распределений размеров сферолитов в материалах ЗТВ сварных соединений, выполненных по различным режимам.

В структуре материала, сваренного по режиму 3, преобладают мелкокристаллические образования, обуславливающие пластичность материала. В результате реализации предварительного подогрева и управления кристаллизацией при охлаждении распределение размеров сферолитов в ЗТВ сварного соединения, выполненного по режиму 1, сопоставимо с таковым в структуре



**Рис. 6.** Надмолекулярные структуры материалов сварных соединений, выполненных по различным режимам  
**Fig. 6.** Supramolecular structures of welded joint materials produced under various conditions



**Рис. 7.** Распределение размеров надмолекулярных образований в материалах ЗТВ сварных соединений, выполненных по различным режимам

**Fig. 7.** Distribution of the sizes of supramolecular formations in the heat-affected zone materials of welded joints produced under various conditions

материала соединения, выполненного по режиму 2. Полученная надмолекулярная структура материала ЗТВ сварного соединения, выполненного при низкой температуре по предлагаемой технологии, должна обеспечить прочность сварного соединения не ниже чем при сварке в нормальных условиях.

### Заключение

– Расчетами установлено, что при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур предварительный подогрев и выравнивание с расчетными параметрами и нагрев по режиму сварки в нормальных условиях обеспечивают получение достаточного объема расплава.

– Охлаждение сварного соединения при низких температурах с управлением кристаллизацией в зонах сварного шва и термического влияния путем изменения мощности нагревателя по

временной закономерности, согласно решению обратной задачи теплопроводности, обеспечивает динамику температурного поля, соответствующую сварке в условиях допустимых температур воздуха.

– Установлено что между трубой и муфтой обеспечивается давление, достаточное для формирования сварного соединения, равнопрочного соединению при сварке в условиях допустимых температур.

– Предлагаемая технология сварки с управляемой кристаллизацией при низких температурах обеспечивает в зоне структурных изменений температурный режим, обуславливающий формирование надмолекулярных структурных образований, характерных для сварки в условиях допустимых температур.

– Полученные результаты и методики могут служить основой для разработки технологии свар-



ки полиэтиленовых труб при низких температурах деталями различной конфигурации с закладными нагревателями.

### Список литературы / References

1. Иванов Н.И., Чевычелов Д.А., Писевич Е.Ю. и др. Сварка нагретым инструментом трубопроводов из полиэтилена для газоснабжения диаметром 90–315 мм. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2023; 27(2):24–41. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-24-41>

Ivanov N.I., Chevychelov D.A., Pisevich E.Yu., et al. Hot tool welding of pipelines from polyethylene for gas supply with a diameter of 90–315 mm. *Proceedings of the Southwest State University*. 2023;27(2):24–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-24-41>

2. Кимельблат В.И., Волков И.В. Процедуры и основные параметры сварки полиэтилена. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;17(14):293–296.

Kimelblat V.I., Volkov I.V. Procedures and main parameters of polyethylene welding. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014;17(14):293–296. (In Russ.)

3. Петкевич В.М., Гладких С.А., Глаголев И.М., Пячин С.А. Испытание муфтовых соединений полиэтиленовых труб. В кн.: Игнатенко И.В. (ред.) *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием, г. Хабаровск, 16–19 апреля 2024 г. Т. 2*. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС; 2024. С. 451–456.

Petkevich V.M., Gladkikh S.A., Glagolev I.M., Pyachin S.A. Testing of coupler connection of polyethylene pipes. In: *Scientific, technical and economic cooperation between the Asia-Pacific countries in the 21st century: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference for Creative Youth with international participation, Khabarovsk, April 16–19, 2024, Vol. 2*. Khabarovsk: DVGUPS Publishing House; 2024, pp. 451–456. (In Russ.)

4. Шурайц А.Л., Каргин В.Ю., Вольнов Ю.Н. *Газопроводы из полимерных материалов: Пособие по проектированию, строительству и эксплуатации*. Саратов: Издательство «Журнал «Волга – XXI век»; 2007. 612 с.

Shuraitis A.L., Kargin V.Yu., Volnov Yu.N. *Gas pipelines made of polymeric materials: Features of design, construction and operation*. Saratov: Publishing House “Journal “Volga – 21st century”; 2007. 612 p. (In Russ.)

5. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Управление тепловым процессом электромужфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах. *Сварка и диагностика*. 2017;(5):21–25.

Starostin N.P., Ammosova O.A. Control of the thermal process of electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures. *Welding and Diagnostics*. 2017;(5):21–25. (In Russ.)

6. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Управление движением фронта кристаллизации при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур. *Тепловые процессы в технике*. 2024;16(4):162–169.

Starostin N.P., Ammosova O.A. Crystallization front movement control when welding polyethylene pipes at low temperatures. *Thermal Processes in Engineering*. 2024;16(4):162–169. (In Russ.)

7. Старостин Н.П., Аммосова О.А., Петров Д.Д. и др. Сварка полиэтиленовых труб муфтами с закладными нагревателями при низких температурах. Часть 1. Реализация управления фронтом кристаллизации. *Сварка и диагностика*. 2024;(6):44–49. [https://doi.org/10.52177/2071-5234\\_2024\\_06\\_44](https://doi.org/10.52177/2071-5234_2024_06_44)

Starostin N.P., Ammosova O.A., Petrov D.D., et al. Welding of polyethylene pipes with couplings with embedded heaters at low temperatures. Part 1. Implementation of crystallization front control. *Welding and Diagnostics*. 2024;(6):44–49. (In Russ.)

8. Chebbo Z., Vincent M., Boujlal A., et al. Numerical and experimental study of the electrofusion welding process of polyethylene pipes. *Polymer Engineering and Science*. 2015; 55(1):123–131. <https://doi.org/10.1002/PEN.23878>

9. Spina R., Spekowius M., Hopmann C. Simulation of crystallization of isotactic polypropylene with different shear regimes. *Thermochimica Acta*. 2018;659:44–54. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.10.023>

10. Бородин П.Ю., Галанин М.П. Динамическая связанная задача термоупругости в различных пространственных приближениях. *Математическое моделирование*. 1998;10(3): 61–82.

Borodin P.Yu., Galanin M.P. Dynamic coupled problem of thermoelasticity in different spatial approximations. *Mathematical Modeling*. 1998;10(3):61–82. (In Russ.)

11. Sivtsev P.V., Stepanov S.P., Smarzewski P. Numerical study of soil-thawing effect of composite piles using gmsfem. *Journal of Composites Science*. 2021;5(7):167. <https://doi.org/10.3390/jcs5070167>

12. Zienkiewicz O.C., Jaylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals (Seventh Edition)*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013. 714 p.

13. Logg A., Mardal K.A., Wells G. *Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method: The FEniCS Book*. New York: Springer Sci. & Business Media; 2012. 731 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8>

14. Software package GMSH. Available at: <https://gmsh.info/> (accessed: 05.06.2025).

15. Software package ParaView. Available at: <http://paraview.org/> (accessed: 05.06.2025)

16. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. *Экстремальные методы решения некорректных задач*. М.: Наука; 1988. 288 с.

Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Romyantsev S.V. *Extreme methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Nauka; 1988. 288 p. (In Russ.)

17. Алифанов О.М., Михайлов В.В. Решение граничной обратной задачи в переопределенной постановке. *Инженерно-физический журнал*. 1983;45(3):776–781.

Alifanov O.M., Mikhailov V.V. Solution of the inverse boundary heat conduction problem in a new statement. *Journal of engineering physics and thermophysics*. 1983;45(3):776–781. (In Russ.)

### Об авторах

ТИХОНОВ Роман Семенович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9930-3305>, ResearcherID: AAF-6352-2021, Scopus Author ID: 56763891300, SPIN: 1064-3402, e-mail: roman\_tikhon@mail.ru

**СТАРОСТИН Николай Павлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5686-1817>, ResearcherID: B-2841-2016, Scopus Author ID: 7004125992, SPIN: 3150-2664, e-mail: nikstar56@mail.ru

***Вклад авторов***

**Тихонов Р.С.** – методология, программное обеспечение, визуализация, создание черновика рукописи; **Старостин Н.П.** – разработка концепции, создание и редактирование рукописи, методология, администрирование проекта

***Конфликт интересов***

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***About the authors***

**ТИХОНОВ, Roman Semenovich**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9930-3305>, ResearcherID: AAF-6352-2021, Scopus Author ID: 56763891300, SPIN: 1064-3402, e-mail: roman\_tikhon@mail.ru

**STAROSTIN, Nikolay Pavlovich**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5686-1817>, ResearcherID: B-2841-2016, Scopus Author ID: 7004125992, SPIN: 3150-2664, e-mail: nikstar56@mail.ru

***Authors' contribution***

**Tikhonov R.S.** – methodology, software, visualization, writing – original draft; **Starostin N.P.** – conceptualization, writing – original draft, writing – review & editing, methodology, data curation

***Conflict of interest***

The authors declare no conflict of interest.

*Поступила в редакцию / Submitted 11.06.2025*

*Поступила после рецензирования / Revised 21.07.2025*

*Принята к публикации / Accepted 01.08.2025*