



**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОМУФТОВОЙ СВАРКЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА**

Н. П. Старостин, Р. С. Тихонов

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, E-mail: roman_tikhon@mail.ru,
ул. Автоторожная 20, г. Якутск 677007, Республика Саха (Якутия), Россия*

Рассмотрена проблема сварки полиэтиленовых труб, применяемых в горной промышленности при низких температурах окружающего воздуха. Численным решением термоупругой задачи выявлены отличительные особенности теплового и напряженно-деформированного состояний сварного соединения полиэтиленовых труб с помощью муфт с закладным нагревателем при различных температурах. Установлено, что в условиях низких температур воздуха размер расплавленной зоны существенно меньше, чем при допустимых для сварки температурах. В связи с этим создается недостаточное для качественной сварки давление между муфтой и трубой. Показано, что в момент кристаллизации расплава максимальные значения напряжений и деформаций при сварке в условиях низких температур выше, чем при сварке в допустимом интервале температур, что обуславливает высокие значения остаточных напряжений. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии сварки при низких температурах.

Полиэтиленовые трубы, электромуфтовая сварка, математическое моделирование, термоупругая задача, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние

**INVESTIGATION OF THE THERMOELASTIC STATE
AT ELECTROFUSION WELDING OF POLYETHYLENE PIPES
AT VARIOUS TEMPERATURES OF THE ENVIRONMENT**

N. P. Starostin and R. S. Tikhonov

*Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: roman_tikhon@mail.ru, ul. Avtodorozhnaya 20, Yakutsk 677007, Republic of Sakha (Yakutia), Russia*

The work is devoted to the actual problem of welding of polyethylene pipes at low ambient temperatures used in the mining industry. The numerical solution of the thermoelastic problem shows the distinctive features of the thermal and stress-strain states of the welded joint of polyethylene pipes using couplings with a built-in heater at various temperatures of the environment. It is shown that welding in conditions of low temperatures of the environment, the size of the molten zone is substantially less than at permissible temperatures. In this connection, insufficient pressure is created between the coupling and the pipe for high-quality welding. It is also shown that at the time of melt crystallization, the maximum stresses during welding at low temperatures are higher than during welding in the allowable temperature range, which causes high values of residual stresses. The results obtained can be used in the development of welding technology at low temperatures.

Polyethylene pipes, electrofusion welding, mathematical modeling, thermoelastic problem, finite element method, stress-strain state

В горнодобывающей промышленности для технического водоснабжения, транспортировки соленых растворов, кислот, основ для растворов, органических веществ, для конвейеризации технологического процесса, в шламо- и пульпопроводах, системах дегазации и т. д. все шире применяются полимерные трубы, в том числе полиэтиленовые. Наиболее надежным неразъемным соединением полиэтиленовых труб являются сварка с помощью деталей с закладными нагревателями, в частности с помощью муфт (электромуфтовая сварка). Такой метод сварки зачастую используется при ремонтных работ на трубопроводах. В то же время сварку полиэтиленовых труб рекомендуется проводить при температурах окружающего воздуха не ниже -15°C . В регионах холодного климата часто возникает необходимость выполнения сварочных работ в полиэтиленовых трубопроводах при температурах воздуха ниже допустимой для сварки. В таких случаях рекомендуют сварку проводить в укрытиях, температура в которых поддерживается в допустимых интервалах. Недостаток такой сварки заключается в больших затратах времени, поскольку свариваемые трубы необходимо выдержать при допустимой температуре длительное время для термостатирования.

Технология оперативной электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах предложена в работе [1]. Качественное сварное соединение получено путем предварительного подогрева с помощью закладного нагревателя до допустимой для сварки температуры, выравнивания температур, оплавления в штатном режиме как при допустимой температуре и охлаждение под слоем теплоизоляционного материала. Таким образом, предлагаемая технология сводилась к управлению только тепловым процессом. При электромуфтовой сварке давление в сварном шве создается в результате температурного расширения, которое не рассматривается в работе [1].

Исследование напряженно-деформированного состояния в сварном соединении, обусловленное динамикой температурного поля, представляет актуальную проблему, решение которой позволит управлять взаимосвязанными процессами, протекающими при сварке, и получать более прочное соединение. В данной работе поставлена задача исследования термоупругого состояния при электромуфтовой сварке полиэтиленовых труб при допустимой и недопустимой температурах воздуха, что в дальнейшем даст возможность определить пути повышения прочности сварных соединений при сварке в условиях низких температур.

Постановка тепловой задачи. Распределение температуры при электромуфтовой сварке полиэтиленовых труб можно описать уравнением теплопроводности с учетом двухфазной зоны [2]:

$$\left(c(T) + \rho_{df}(T)L \frac{d\Theta}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \gamma Q(t), \quad r, z \in \Omega, \quad 0 < t \leq t_m, \quad (1)$$

где Q — плотность источника теплоты; L — удельная теплота фазового перехода; ρ_{df} — плотность материала в промежуточной фазе; Ω — пространственная область; $\Theta(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{\phi}, \\ 1, & T \geq T_{\phi}. \end{cases}$;

$\gamma = 1$ в подобласти расположения нагревательного элемента; $\gamma = 0$ — в противном случае.

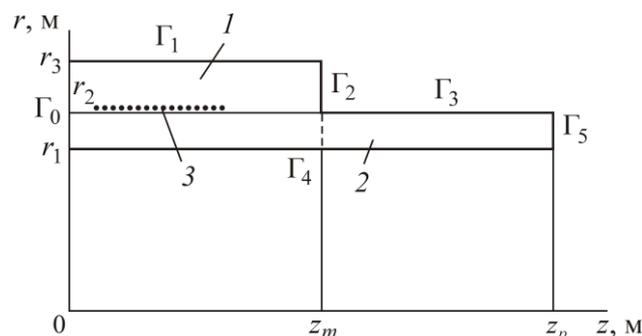


Рис. 1. Расчетная схема термоупругой задачи: 1 — муфта; 2 — труба; 3 — источник тепла

В полимерных материалах не существует четко выраженной границы раздела фаз — фазовый переход происходит в интервале температур $[T_S < T_\phi < T_L]$. Для адекватного описания теплового процесса в математической модели необходимо учитывать промежуточную фазу между твердым и жидким веществом, в которой вещество находится как в твердом, так и в жидком состоянии [3]. В качестве приближения для функции Хэвисайда Θ возьмем функцию $\tilde{\Theta}(T)$:

$$\tilde{\Theta}(T) = \begin{cases} 0, & T \leq T_S, \\ \frac{\int_{T_S}^T q(u) du}{\int_{T_S}^{T_L} q(u) du}, & T_S < T < T_L, \\ 1, & T \geq T_L, \end{cases}$$

характеризующую долю жидкой фазы, где $q(T)$ — зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром; T_S, T_L — температуры солидуса и ликвидуса.

Удельная теплота фазового перехода L определяется по формуле:

$$L = \frac{(t_2 - t_1) \int_{T_S}^{T_L} q(u) du}{T_L - T_S},$$

где t_1, t_2 — время начала и окончания фазового перехода. Следовательно

$$\chi(T) = L \frac{d\tilde{\Theta}}{dT} = \begin{cases} 0, & T \leq T_S, \\ \frac{q(T)}{v_T}, & T_S < T < T_L, \\ 0, & T \geq T_L, \end{cases}$$

где v_T — скорость нагрева (охлаждения), варьируемая в ДСК. В расчетах использовались непрерывные функции теплового потока, полученные ДСК при скорости изменения температуры 10 К/мин и аппроксимированные кубическими В-сплайном [4].

Таким образом, получим следующее уравнение для температуры во всей расчетной области Ω

$$(c(T) + \rho_{df} \chi(T)) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \gamma Q(t), \quad r, z \in \Omega, \quad 0 < t \leq t_m, \quad (2)$$

где коэффициенты уравнения выражаются следующими соотношениями:

$$c(T) = \rho^- c^- + \tilde{\Theta}(T) \cdot (\rho^+ c^+ - \rho^- c^-),$$

$$k(T) = k^- + \tilde{\Theta}(T) \cdot (k^+ - k^-),$$

здесь c^-, ρ^-, k^- и c^+, ρ^+, k^+ — удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность для твердой и жидкой фазы материала трубы соответственно.

Уравнение теплопроводности (1) дополняется начальным условием

$$T(x, t)|_{t=0} = T_0. \quad (3)$$

Граничные условия согласно расчетной схеме рис. 1 имеют вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}}|_{\Gamma_0} = 0, \quad k(\partial T / \partial \mathbf{n})|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4} = -\alpha(T|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4} - T_{rd}), \quad T(x, t)|_{\Gamma_5} = T_{rd}, \quad (4)$$

где \mathbf{n} — вектор внешних нормалей границы тела; T_{rd} — температура окружающей среды.

Плотность теплового источника вычислялась по формуле

$$Q(t) = \frac{U^2}{R(1 + \beta_R(T - 20))V_S}, \quad (5)$$

где U — подаваемое напряжение; R — сопротивление спирали при температуре 20°C ; β_R — температурный коэффициент сопротивления; V_S — объем источника тепла.

Постановка термоупругой задачи. Температурные напряжения при электродуговой сварке полиэтиленовых труб рассмотрим в квазистационарной постановке, в которой напряжения зависят от решения тепловой задачи сварки [5]:

$$\operatorname{div} \sigma - \beta \operatorname{grad}(T - T_0) = 0. \quad (6)$$

Здесь σ — тензор напряжений; $\beta = \beta_T(3\lambda + 2\mu)$, β_T — температурный коэффициент линейного расширения; λ, μ — коэффициенты Ламе; T — текущая температура; T_0 — равновесная начальная температура.

Соотношения Коши между тензором деформаций ε и вектором перемещений \mathbf{u} имеют вид

$$\varepsilon = 0.5(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T). \quad (7)$$

Поскольку термическое влияние учтено в уравнении равновесия (6) в виде объемных напряжений, физические соотношения Гука между тензорами напряжений и деформаций запишем без учета температурных деформаций

$$\sigma = \lambda \nabla \mathbf{u} \mathbf{I} + 2\mu \varepsilon, \quad (8)$$

в котором \mathbf{I} — единичный тензор.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) описывается уравнениями (6)–(8) со следующими граничными условиями:

$$\sigma \mathbf{n} = \beta(T - T_0), \quad x \in \Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4; \quad \mathbf{u}_z = 0, \quad x \in \Gamma_0; \quad \mathbf{u} = 0, \quad x \in \Gamma_5. \quad (9)$$

Термоупругая задача (6)–(8), (9) в вариационной постановке предполагает равенство энергии деформации и внутренних объемных сил с энергией поверхностных сил

$$2\pi \int_{\Omega} \{\varepsilon^T(\mathbf{v}) D \varepsilon(\mathbf{u}) - (\beta \operatorname{grad}(T - T_0), \mathbf{v})\} r dr dz = 2\pi \int_{\Gamma} \beta(T - T_0) \mathbf{v} r ds. \quad (10)$$

Здесь \mathbf{v} — пробная вектор-функция для вектора перемещений \mathbf{u} ; D — известная матрица перехода между компонентами тензоров напряжений и деформаций согласно соотношению (8).

Результаты расчета. Задача определения динамики температурного поля (2)–(5) и НДС (6)–(10) решалась методом конечных элементов с использованием вычислительного пакета свободного доступа Dolfin/FEniCS. Для наглядного примера, приведем результаты расчетов термоупругого состояния электродуговой сварки полиэтиленовых труб диаметром 63 мм из ПЭ100 SDR 11 при различных температурах окружающего воздуха (ОВ). Равновесная температура равна 20°C . В расчетах использовались следующие значения свойств материала трубы и муфты: коэффициенты теплопроводности твердой (индекс $-$) и жидкой (индекс $+$) фазы $k^- = 0.46$, $k^+ = 0.24$ Вт/(м·К), плотности $\rho^- = 950$, $\rho^+ = 800$ кг/м³, удельные теплоемкости $c^- = 1900$, $c^+ = 2400$ Дж/(кг·К), температурные коэффициенты линейного расширения $\beta^- = 0.9 \cdot 10^{-5}$, $\beta^+ = 2.8 \cdot 10^{-5}$ 1/К, модули упругости $E^- = 250$, $E^+ = 12.5$ МПа, коэффициенты Пуассона $\nu^- = 0.35$, $\nu^+ = 0.49$. Расчеты проводились при следующих геометрических размерах трубы и муфты: $r_1 = 0.0257$, $r_2 = 0.0315$, $r_3 = 0.0397$ м. Спираль в муфте выполнена из меди: теплопроводность $k_{\text{Cu}} = 401$ Вт/(м·К), плотность $\rho_{\text{Cu}} = 8933$ кг/м³, теплоемкость $c_{\text{Cu}} = 381$ Дж/(кг·К), $\beta = 1.7 \cdot 10^{-5}$ 1/К, $E = 100$ ГПа, $\nu = 0.34$. Подаваемое напряжение при сварке 32 В. Количество витков спирали в муфте — 32, диаметр проволоки спирали — 0.5 мм.

Распределения температур при электромужфтовой сварке в условиях допустимой (20°C) и ниже допустимой (-40°C) температуры окружающего воздуха в различные моменты времени показаны на рис. 2. В момент времени 68 с согласно регламентированного режима при допустимой температуре ОВ завершается стадия нагрева (оплавления). Если время нагрева остается неизменным при температуре ОВ ниже допустимой, размер оплавленной зоны, уменьшается (рис. 2а). В окрестности первого и последнего витков материалы оплавляются частично. В момент завершения кристаллизации материала сварного шва при допустимой температуре ОВ (430 с) при сварке в условиях низкой температуры скорость охлаждения заметно выше, чем при сварке в условиях допустимых температур (рис. 2б). При таком охлаждении может сформироваться мелкокристаллическая структура, обуславливающая пластичность материала.

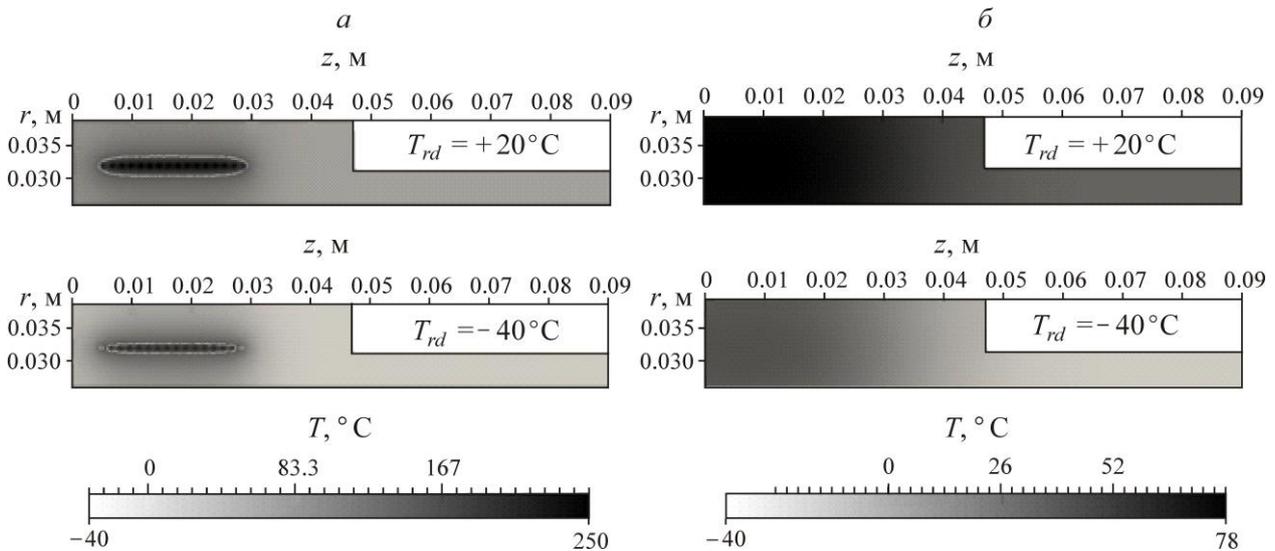


Рис. 2. Распределения температур при электромужфтовой сварке при различных температурах окружающего воздуха в момент времени: а — 68 с; б — 430 с

В таблице представлены границы интервалов температуры, напряжений σ_{φ} , σ_r , σ_z и перемещений ε_r , ε_z при допустимой (20°C) и ниже нормативной (-40°C) температуре окружающего воздуха при $t = 68$ и 430 с с момента начала процесса сварки.

Расчетные значения температур, напряжений и перемещений при электромужфтовой сварке полиэтиленовых труб при различных температурах окружающего воздуха в момент времени $t = 68$ и 430 с

T_{rd}	$t, \text{с}$	$\sigma_{\varphi}, \text{МПа}$	$\sigma_r, \text{МПа}$	$\sigma_z, \text{МПа}$	$\varepsilon_r, \text{мкм}$	$\varepsilon_z, \text{мкм}$	$T, ^{\circ}\text{C}$
+20	68	(-2.59; 0.67)	(-2.68; 0.7)	(-2.68; 0.84)	(-25.9; 0.25)	(-47; 5)	(20; 250.7)
	430	(-0.05; 0.32)	(-0.18; 0.77)	(-0.51; 0.54)	(-11.87; 26.9)	(-46; 0)	(31.2; 78.9)
-40	68	(-2.1; 0.57)	(-2.33; 0.61)	(-2.2; 1.11)	(-39.7; 0.73)	(-92.8; 0.59)	(-40; 191)
	430	(-0.48; 0.32)	(-0.5; 0.24)	(-1.04; 0.84)	(-39.8; 17.3)	(-74.3; 0.61)	(-40; 31.2)

Расчеты показывают, что сжимающие радиальные напряжения, характеризующие давление между муфтой и трубой, при сварке в условиях допустимой температуры окружающего воздуха $+20^{\circ}\text{C}$ достигают 2.68 МПа, при температуре -40°C — не превышает 2.33 МПа, что может оказаться недостаточным для получения качественного соединения. Низкое значение давления при низкой температуре воздуха обусловлено высокими растягивающими радиальными напряжениями в периферийных участках соединения, что в свою очередь объясняет большее “разбухание” при низкой температуре внутренней поверхности трубы по сравнению с “разбуханием” при

сварке в условиях допустимых температур. В то же время температура на внутренней поверхности трубы выше равновесной температуры, на внешней поверхности муфты — ниже.

Окружные и осевые напряжения при сварке в условиях низких температур также ниже, чем при сварке в условиях допустимых температур ОВ. Окружные сжимающие напряжения при стандартной сварке достигают значения 2.59 МПа, в условиях низких температур — 2.1 МПа, осевые напряжения — 2.68 и 2.2 МПа соответственно.

На рис. 3 изображены поля радиальных напряжений и перемещений при допустимой (20 °С) и ниже нормативной (–40 °С) температурах окружающего воздуха в момент завершения кристаллизации материала в зоне термического влияния (в момент достижения 80 °С).

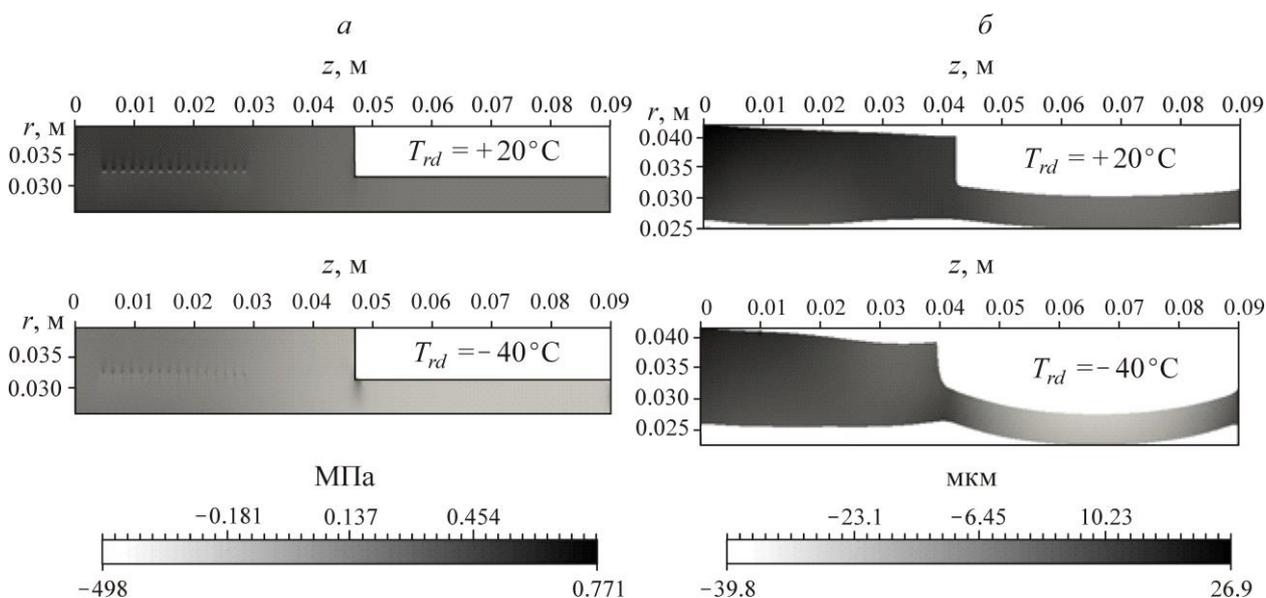


Рис. 3. Распределение: *a* — радиальных напряжений; *б* — деформаций при $T_{rd} = 20$ и -40 °С на момент завершения кристаллизации материала в зоне термического влияния

Видно, что в момент завершения кристаллизации радиальные сжимающие напряжения на периферийных участках выше при сварке в условиях низких температур, что приводит к большим деформациям. Кроме того, максимальные значения напряжений при сварке при низких температурах выше.

ВЫВОДЫ

Сопоставлением численных расчетов термоупругого состояния сварного соединения полиэтиленовых труб с помощью муфт с закладным нагревателем при допустимых и низких температурах окружающего воздуха показано, что сварка в условиях низких температур по существующей технологии может привести к нежелательным эффектам, снижающим качество сварного соединения: получению значительно меньшего размера расплавленной зоны, чем при допустимых для сварки температурах, что приводит к возникновению низкого давления между муфтой и трубой. Установлено, что появление в конце стадии кристаллизации больших напряжений и деформаций обусловлено высокими значениями остаточных напряжений.

Для устранения подобных эффектов при электромуфтовой сварке в условиях низких температур можно использовать предварительный подогрев зоны термического влияния до допустимой для сварки температуры и управляемое охлаждение соединения, реализуемые с помощью встроенного нагревательного элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Starostin N. P. and Ammosova O. A.** Calculation of the technological parameters of electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures, *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures: proceedings of the XI International Conference*, 2017, 23 pp. [**Старостин Н. П., Аммосова О. А.** Расчет технологических параметров электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах // *Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: материалы XI Междунар. конф.* — Екатеринбург, 2017. — С. 23.]
2. **Maksimov A. M. and Tsyarkin G. G.** Mathematical model of freezing of water-saturated porous medium, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1986, vol. 26, no. 11, pp. 1743–1747. [**Максимов А. М., Цыркин Г. Г.** Математическая модель промерзания водонасыщенной пористой среды // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* — 1986. — Т. 26. — № 11. — С. 1743–1747.]
3. **Avdonin N. A.** *Mathematical Description of Crystallization Processes*. Riga: Zinatne, 1980, 180 pp. [**Авдонин Н. А.** Математическое описание процессов кристаллизации. — Рига: Зинатне, 1980. — 180 с.]
4. **Stechkin S. B. and Subbotin Yu. N.** *Splines in computational mathematics*, Moscow, Nauka, 1976, 248 pp. [**Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н.** Сплайны в вычислительной математике. — М.: Наука, 1976. — 248 с.]
5. **Vasilieva M. V. and Stalnov D. A.** Numerical modeling of thermoelasticity problems for constructions with inner heat source, *NEFU Bulletin*, 2016, no. 1 pp. 45–59. [**Васильева М. В., Стальнов Д. А.** Математическое моделирование термомеханического состояния тепловыделяющего элемента // *Вестник СВФУ*. — 2016. — № 1. — С. 45–59.]