

УДК 621.791.461: 66.046.1

## Определение технологических параметров предварительного подогрева полипропиленовых труб при сварке в раструб в условиях низких температур

Д-р техн. наук Н. П. СТАРОСТИН<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук М. А. ВАСИЛЬЕВА<sup>2</sup>,  
Г. В. БОТВИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>nikstar56@mail.ru, <sup>2</sup>eowa@mail.ru, <sup>3</sup>gleb-0379@mail.ru

Институт проблем нефти и газа СО РАН  
677007, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20

*Предложена математическая модель теплового процесса для разработки технологии раструбной сварки при температурах ниже нормативных. Рассматривается этап подогрева свариваемых концов полипропиленовой трубы и муфты с помощью специальных сменных насадок для последующей сварки в условиях низких температур. Моделируется тепловой процесс в полипропиленовой трубе, контактирующей со сменной насадкой, в основании которой поддерживается постоянная температура с помощью нагревательной пластины с известной температурой. Расчетами показано, что повышение температуры нагревательной пластины с 20 до 35 °С приводит к сокращению продолжительности подогрева в два раза, включая продолжительность охлаждения для выравнивания температур. Вычислительными экспериментами показано, что в стенке трубы горячего водоснабжения диаметром 110 мм распределение температуры, близкое к однородному, из допустимого для сварки интервала получается путем подогрева сменными насадками дополнительного сварочного аппарата, нагревательная пластина которого имеет температуру 35 °С, и последующего свободного охлаждения. При низких температурах воздуха для подогрева труб холодного водоснабжения достаточно на нагревательной пластине поддерживать температуру 20 °С. Предложенная методика может быть использована для определения технологических параметров предварительного подогрева (продолжительности подогрева и охлаждения) для полипропиленовых труб и муфт горячего и холодного водоснабжения различного диаметра при низких температурах окружающего воздуха.*

**Ключевые слова:** полипропиленовая труба, температура, математическая модель, расчет, подогрев, охлаждение.

### Информация о статье

Поступила в редакцию 16.11.2015, принята к печати 20.04.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-2-54-59

### Ссылка для цитирования

Старостин Н. П., Васильева М. А., Ботвин Г. В. Определение технологических параметров предварительного подогрева полипропиленовых труб при сварке в раструб в условиях низких температур // Вестник Международной академии холода. 2016. № 2. С. 54–59.

## Determination of technological parameters of preheating of the polypropylene pipes for welding into the socket at low temperatures

D. Sc. N. P. STAROSTIN<sup>1</sup>, Ph. D. M. A. VASIL'EVA<sup>2</sup>, G. V. BOTVIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>nikstar56@mail.ru, <sup>2</sup>eowa@mail.ru, <sup>3</sup>gleb-0379@mail.ru

Institute for Oil and Gas Problems SB RAS  
677007, Russia, Yakutsk, Avtodorozhnaja str., 20

*The mathematical model of a thermal process for the development of socket welding technology at temperatures below standard is offered. The heating stage of the welded ends of polypropylene pipe and fitting by means of special replaceable nozzles for subsequent welding at low temperatures is considered. Thermal process is simulated in the polypropylene pipe contacting to a replaceable nozzle at the base of which the constant temperature is kept by a heating plate of a definite temperature. Calculations have shown that heating plate temperature increase from 20 °C to 35 °C results in twofold reduction of heating duration including the duration of cooling for equalization of temperatures. Computational experiments show that the temperature distribution in the wall of the hot-water pipe with diameter of 110 mm is close to the uniformed one from allowable welding range and is obtained by heating of an additional welding apparatus with replaceable nozzles, the apparatus heating plate having temperature of 35 °C. At low temperatures it is enough to maintain a heating plate temperature of 20 °C for heating the pipes of cold water supply. The offered method can be used for determination of technological parameters of preheating (the duration of heating and cooling) for polypropylene pipes and fittings of hot and cold water supply of various diameters at low ambient temperatures.*

**Keywords:** polypropylene pipe, temperature, mathematical model, calculation, heating, cooling.

## Введение

Полипропиленовые (ПП) трубы нашли широкое применение в системах отопления и водоснабжения жилищных и производственных объектов. При строительстве систем водо- и теплоснабжения и проведении ремонтных мероприятий, часто возникает необходимость осуществления сварочных работ при низких температурах. В то же время, согласно нормативным документам, контактную сварку полипропиленовых труб рекомендуется проводить при температурах воздуха не ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1]. В случаях необходимости проведения сварки при других температурах воздуха, работы рекомендуется выполнять в укрытиях (палатки, шатры и т. п.) с обеспечением подогрева зоны сварки [2]. В то же время, теоретических и экспериментальных исследований подогрева свариваемых концов трубы и муфты при низких температурах не проводилось. Представляется перспективным разработка оперативной технологии сварки в раструб полипропиленовых труб без использования укрытий с подогревом зоны сварки с помощью серийно выпускаемого сварочного аппарата и простых в изготовлении сменных насадок для подогрева.

В регионах холодного климата, вследствие температурных ограничений, сварка ПП труб на открытом воздухе не может вестись более полугода. Расширение интервала температур, при котором возможно проведение сварки на открытом воздухе, является актуальной проблемой, решение которой позволит успешно проводить ремонт существующих систем водоснабжения в зимних условиях и сократить сроки строительства новых. Для проведения сварки ПП труб при низких температурах необходимо расширить допустимый температурный интервал для транспортирования. Погрузку, транспортирование и разгрузку полипропиленовых труб рекомендуется производить при температурах воздуха не ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тем не менее, при низких температурах подобные операции можно осуществлять, подогревая нагретым воздухом трубы в теплоизоляционных контейнерах в течение определенного времени. Не затрагивая вопросы определения продолжительности подогрева труб в контейнерах при различных температурах воздуха, будем считать, что транспортирование ПП труб для их сварки возможно при любых низких климатических температурах.

Теоретические и экспериментальные исследования теплового процесса сварки при различных температурах воздуха показывают, что возможности существующей технологии контактной сварки используются недостаточно полно. Управление тепловым процессом и обеспечение изменения температурного поля при сварке в условиях низких температур по закономерностям близким динамике температурного поля при допустимых температурах позволяет получить требуемую прочность сварного стыкового соединения. В работах [3–5] предложен и научно обоснован способ стыковой сварки полиэтиленовых (ПЭ) труб при низких температурах, основанный на управлении тепловым процессом сварки в окрестности сварного соединения. Установлено, что предварительный подогрев свариваемых труб на небольшую длину вылета, оплавление торцов труб и осадка в стандарт-

ном режиме с дальнейшим охлаждением сварного соединения в теплоизоляционной камере определенного размера позволяют получить соединение с необходимым качеством. Для разработки аналогичного способа сварки в раструб полипропиленовых труб при температурах воздуха ниже нормативных необходимо исследовать тепловой процесс на всех этапах сварки, включая предварительный подогрев. Предварительный подогрев должен быть простым в реализации и обеспечить за короткое время распределение температуры в стенке трубы со значениями из допустимого интервала и с перепадом не более  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Цель работы заключается в определении технологических параметров предварительного подогрева при низких температурах свариваемых концов трубы и муфты, обеспечивающих распределение температуры со значениями из допустимого для сварки интервала.

## Моделирование теплового процесса

При предварительном подогреве на концах свариваемой трубы и муфты необходимо получить определенное распределение температуры. Подобные задачи управления тепловыми процессами встречаются на практике часто и относятся к обратным задачам теплообмена, в которых по следственным показателям (температуре) определяются причинные характеристики (нагружающие воздействия) [6]. К причинным характеристикам относятся внутренние и внешние тепловые потоки, которыми необходимо воздействовать на исследуемый объект для получения требуемого распределения температуры. Внутренние тепловые источники в виде правых частей в уравнении теплопроводности в общем случае представляют функцию пространственных переменных и времени [7]. Такие источники тепла используются, например, при индукционном нагреве для получения равномерного распределения температуры в заготовке при горячей обработке цветных металлов давлением [8, 9]. Управление внешними тепловыми потоками, меняющимися во времени, реализуется, в частности, при различных технологических процессах, связанных с нагревом и охлаждением изделий. В связи с некорректностью подобные задачи решаются методами регуляризации. Полученные решения в виде тепловых воздействий, зависящих от пространственных переменных и времени, достаточно сложны для практической реализации. Частные решения задач управления тепловыми процессами в виде функций воздействия, которые легко реализуемы практически и их вид известен, определяются варьированием параметров, т. е. анализом решений последовательности прямых задач [10]. Поскольку предварительный подогрев свариваемых полипропиленовых труб необходимо осуществлять доступными и простыми средствами, воспользуемся таким подходом и определим технологические параметры подогрева для достижения требуемого распределения температуры.

Тепловые процессы подогрева свариваемых концов трубы и муфты аналогичны. Отличия заключаются только в диаметрах и длине вылета, на которую подогреваются труба и муфта. По конструктивным особенностям муфта может быть подогрета сменной насадкой на дли-

ну раструба. Глубину паза сменной насадки для подогрева трубы определим из возможностей установки сменных насадок в центрирующее устройство следующим образом:  $l_{\text{паз}} = 1,66l_{\text{раструб}}$ , где  $l_{\text{раструб}}$  — глубина раструба.

До начала процесса подогрева нагревательная пластина со сменными насадками для подогрева разогревается на открытом воздухе в течение времени проведения подготовительных работ для сварки (установки труб в центрирующее приспособление), которое занимает около 5 мин. Сменные насадки с теплоизоляцией хранятся в теплоте, например при температуре 20 °С. Для эффективности разогрева, в пазы сменных насадок для подогрева вставляется отрезок ПП трубы. Поскольку теплопроводность полипропилена низкая, то теплота по длине трубы распространяется на небольшое расстояние. Таким образом, процесс разогрева сменных насадок с отрезком трубы нагревательной пластиной подобен процессу подогрева тем же инструментом конца длинной трубы. Поэтому процесс разогрева сменных насадок, моделировать отдельно не будем, а объединим с моделированием процесса подогрева стенок трубы. При моделировании процесса подогрева отрезок трубы вынимается из паза сменной насадки и в нее вставляется конец подогреваемой трубы с температурой окружающего воздуха.

Расчетная схема подогрева стенки трубы (муфты) с помощью нагревательной пластины сварочного аппарата со сменной насадкой показана на рис. 1.

Предположим, что конец свариваемой трубы имеет температуру окружающего воздуха  $T_{\text{окр}}$ . Не снижая общности, будем полагать, что сменная насадка предварительно разогрева с помощью нагревательной пластины с температурой  $T_{\text{нагр}}$  в течение определенного времени и его температурное поле  $T_{\text{нас}}(r, z)$  известно из расчета. Нестационарное температурное поле в стенке трубы при подогреве сменной насадкой, в воздухе внутри трубы и в сменной насадке с теплоизоляцией описывается уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$C_i \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_i \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (1)$$

$$0 < r < R_4, \quad 0 < z < L, \quad 0 < t \leq t_m;$$

с начальным условием:

$$T(r, z, 0) = T_{\text{окр}}; \quad (2)$$

$$R_1 \leq r \leq R_2; \quad L_1 \leq z \leq L;$$

$$T(r, z, 0) = T_{\text{нас}}; \quad \begin{cases} 0 \leq r \leq R_1, & 0 \leq z \leq L_3; \\ R_1 \leq r \leq R_2, & 0 \leq z \leq L_1; \\ R_2 < r \leq R_4, & 0 \leq z \leq L_3. \end{cases} \quad (3)$$

и граничными условиями:

$$T(r, 0, t) = T_{\text{нагр}}; \quad (4)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left( r \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0; \quad (5)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_G = -\alpha (T|_G(r, z, t) - T_{\text{окр}}), \quad (6)$$

где  $G$  — свободная поверхность, на которой происходит конвективный теплообмен с окружающим воздухом с коэффициентом  $\alpha$ ;  $\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности;  $C_i$  — объемная теплоемкость; индекс  $i = 1$  для материала трубы (муфты);  $i = 2$  — для насадки;  $i = 3$  — для теплоизоляционного материала. Задача решалась численно методом конечных разностей.

Расчеты проводились при следующих исходных данных:

$$C_1 = 1,76 \cdot 10^6; \quad C_2 = 3,82 \cdot 10^6; \quad C_3 = 13,4 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}};$$

$$\lambda_1 = 0,22; \quad \lambda_2 = 53; \quad \lambda_3 = 0,05 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°С}}; \quad \alpha = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}.$$

Рассматривался процесс подогрева ПП трубы для горячего водоснабжения PN20 Ø 110 мм с толщиной стен-

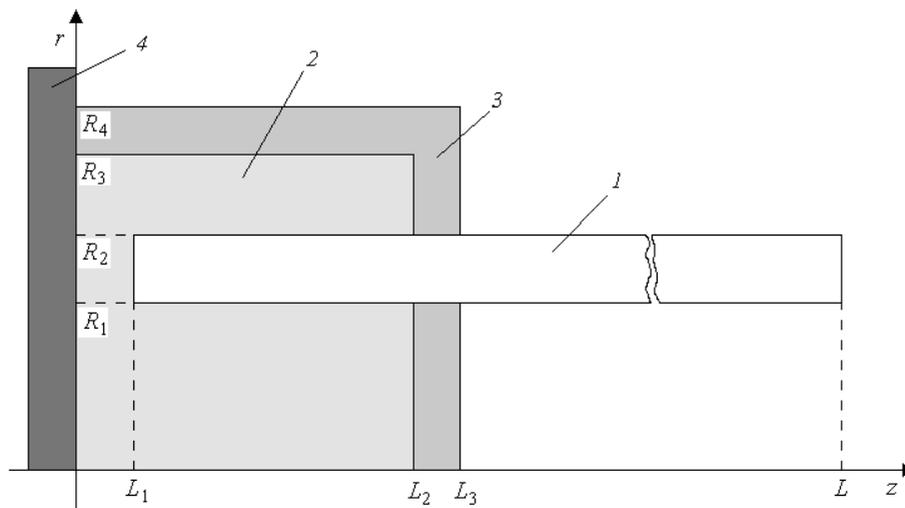


Рис. 1. Расчетная схема подогрева стенки трубы: 1 — стенка трубы; 2 — сменная насадка для подогрева; 3 — слой теплоизоляции; 4 — нагревательная пластина сварочного аппарата

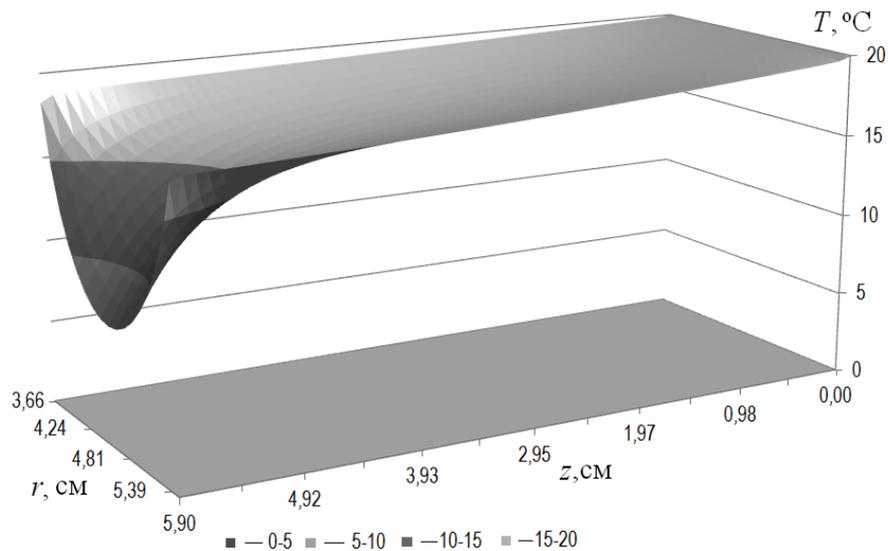


Рис. 2. Распределение температуры по толщине трубы PN20 Ø110 при  $T_{\text{окр}} = -40^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{нагр}} = 20^\circ\text{C}$  в момент времени 20 мин

ки 18,4 мм. В начальный момент времени температура в стенке трубы равна температуре окружающего воздуха минус  $40^\circ\text{C}$ . Варьированием значений определялась температура нагревательной пластины  $T_{\text{нагр}}$ , продолжительность подогрева, при которых во всех точках стенки трубы с длиной вылета  $l_{\text{раструб}}$  достигалось, близкое к однородному, распределение температуры со значениями в допустимом для сварки интервале.

На рис. 2 показано, практически однородное в пределах длины раструба (36 мм), распределение температуры, полученное при температуре нагревательной пластины  $20^\circ\text{C}$ . При этом, продолжительность подогрева, составляющую 20 мин, можно сократить повышением температуры нагревательной пластины. Результатом сокращения времени воздействия и повышения температуры нагревательного инструмента будет существенная

неоднородность распределения температуры. На рис. 3 представлено распределение температуры после 9 мин воздействия нагревательным инструментом с температурой  $35^\circ\text{C}$ . Полученная неоднородность снижается последующим свободным охлаждением стенки трубы на открытом воздухе с низкой температурой. Распределение температуры после 1 мин свободного охлаждения представлено на рис. 4. Многочисленными расчетами установлено, что полученное распределение с заметным максимумом температуры у торца трубы и минимумом в середине стенки трубы не улучшается при изменении продолжительности подогрева и продолжительности охлаждения. Полученное распределение в пределах длины раструба на 7–8 град. отклоняется от однородного распределения температуры  $22^\circ\text{C}$ . Такое отклонение составляет около 5% от температуры плавления полипропиле-

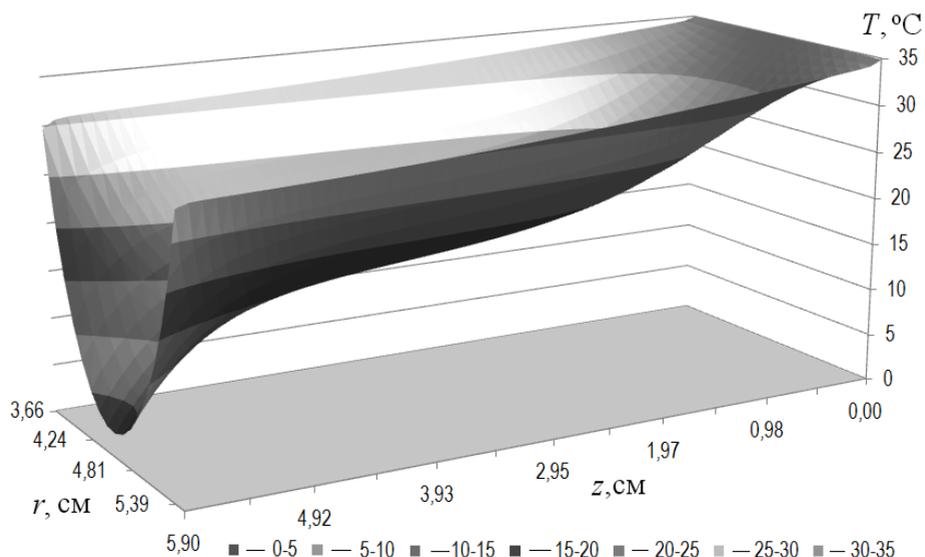


Рис. 3. Распределение температуры по толщине трубы PN20 Ø110 при  $T_{\text{окр}} = -40^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{нагр}} = 35^\circ\text{C}$  за 9 мин подогрева

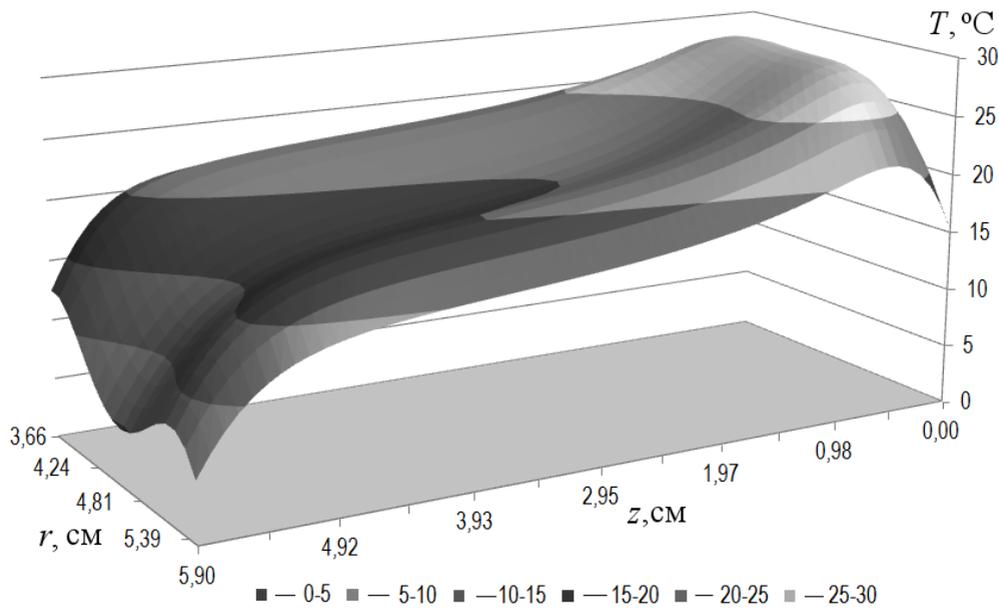


Рис. 4. Распределение температуры по толщине трубы PN20  $\varnothing 110$  при  $T_{\text{окр}} = -40^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{нагр}} = 35^\circ\text{C}$  после охлаждения в течение 60 с

на и 3% от температуры нагревательного инструмента при сварке в растроб ПП труб, что позволяет полученное отклонение распределения температуры от однородного считать незначительным. Таким образом, повышение температуры нагревательного инструмента до  $35^\circ\text{C}$  позволяет сократить время предварительного подогрева для сварки ПП труб для горячего водоснабжения в 2 раза, по сравнению с продолжительностью подогрева инструментом с температурой  $20^\circ\text{C}$ .

Полученные результаты рассмотренного примера могут быть обобщены для других размеров труб и температур воздуха ниже нормативных. Расчетами динамик температурных полей показано, что нагревательная пластина с температурой  $35^\circ\text{C}$  может быть эффективно использована для подогрева ПП труб с диаметрами менее 110 мм. Таким образом, предлагаемая методика позволяет определить технологические параметры подогрева (продолжительности подогрева и охлаждения для выравнивания температур) для труб горячего водоснабжения (категории PN20) различного диаметра в интервале низких температур воздуха.

При температуре окружающего воздуха  $-40^\circ\text{C}$  подогрев труб холодного водоснабжения (PN10)  $\varnothing 110$  мм с толщиной стенки 10 мм можно осуществить нагревательной пластиной с температурой  $20^\circ\text{C}$ . Расчеты показывают, что продолжительность подогрева для таких труб составит 7 мин, что приемлемо с точки зрения практики. Следовательно, для ПП труб холодного водоснабжения диаметром менее 110 мм в интервале низких температур параметры подогрева можно определить расчетом, задавая температуру нагревательной пластины равную  $20^\circ\text{C}$ .

### Выводы

1. Для сварки при низких температурах эффективный предварительный подогрев полипропиленовых труб

горячего водоснабжения может быть осуществлен дополнительным штатным сварочным аппаратом с температурой нагревательной пластины  $35^\circ\text{C}$ , холодного водоснабжения — с температурой  $20^\circ\text{C}$ ;

2. Продолжительности подогрева для полипропиленовых труб холодного и горячего водоснабжения и продолжительность охлаждения для выравнивания температур в трубах горячего водоснабжения определяются расчетным путем по предлагаемой методике. Для практического использования методики предварительного подогрева для труб различного диаметра в интервале климатических температур ниже нормативных составляются таблицы технологических параметров подогрева.

### Список литературы

1. СП 40-101-96. Свод правил по проектированию и монтажу трубопроводов из полипропилена «Рандом сополимер». — М.: Минстрой России, 1996.
2. СП 40-102-2000. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие требования. — М.: Госстрой России, 2001.
3. Старостин Н. П., Герасимов А. И., Аммосова О. А. Способ сварки полимерных труб. Патент РФ № 2343331 RU F16L 13/00, 47/00. Бюл. № 1, 2009.
4. Аммосова О. А., Старостин Н. П. Моделирование теплового процесса стыковой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах // Труды VI евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. — Якутск. 2013. С. 48–55.
5. Starostin N. P., Vasil'eva M. A., Danzanova E. V., Ammosova O. A. Butt welding of polyethylene pipes at low temperatures // Welding International. 2013. Vol. 27. No. 4. P. 318–320.
6. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Румянцев С. В. Экстремальные методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1988. 288 с.

7. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. — М.: Едиториал УРСС, 2004. 480 с.
8. Муратов А., Галунин С., Блинов Ю., Наке Б. Численное исследование методов управления температурным полем в индукционных системах для нагрева вращением // Вестник электроники. 2012. № 3 (41). С. 42–46.
9. Araneo R., Dughiero F., Fabbri M. *ets*. Electromagnetic and thermal analysis of the induction heating of aluminum billets rotating in DC magnetic field // COMPEL: The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 2008. Vol. 27. No. 2. P. 467–479.
10. Yu K., Yang X., Cheng Y., Li C. Thermal analysis and two-directional air flow thermal management for lithium-ion battery pack // Journal of Power Sources. 2014. Vol. 270. P. 193–200.
- of the VI Eurasian Symposium on the strength of materials and machines for regions of cold climate. — Yakutsk. 2013. p. 48–55. (in Russian)
5. Starostin N. P., Vasil'eva M. A., Danzanova E. V., Ammosova O. A. Butt welding of polyethylene pipes at low temperatures. *Welding International*. 2013. Vol. 27. No. 4. P. 318–320.
6. Alifanov, O. M., Artyukhin, E. A., and Rumyantsev, S. V., Extreme Methods for Solving Ill-Posed Problems with Applications to Inverse Heat Transfer Problems, New York: Begell House, 1995.
7. Samarskii A. A., Vabishhevich P. N. Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics. — М.: Editorial URSS, 2004. 480 p. (in Russian)
8. Muratov A., Galunin S., Blinov Ju., Nake B. Numerical research of methods of temperature profile management in inductive systems for heating by rotation. *Vestnik elektroniki*. 2012. No 3 (41). p. 42–46. (in Russian)
9. Araneo R., Dughiero F., Fabbri M., Forzan M., Geri A., Morandi A., Lupi S., Ribani P. L., Veca G. Electromagnetic and thermal analysis of the induction heating of aluminum billets rotating in DC magnetic field // *COMPEL: The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2008. Vol. 27. No. 2. P. 467–479.
10. Yu K., Yang X., Cheng Y., Li C. Thermal analysis and two-directional air flow thermal management for lithium-ion battery pack. *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 270. P. 193–200.

### References

1. SP 40-101-96. The set of rules on projection and installation of pipelines from polypropylene «Random copolymer». Moscow, 1996. (in Russian)
2. SP 40-102-2000. Projection and installation of pipelines of water supply and sewerage systems from polymeric materials. Common requirements. Moscow, 2001. (in Russian)
3. Starostin N. P., Gerasimov A. I., Ammosova O. A. A method of welding of polymer pipes. Patent Russian Federation No. 2343331 RU F16L 13/00, 47/00. Byul. No 1, 2009. (in Russian)
4. Ammosova O. A., Starostin N. P. Simulation of thermal process butt welding polyethylene pipes at low temperatures // Works



**Ecology & Safety**  
25th International Conference  
23–27 June 2016  
Elenite Holiday Village, Bulgaria

**Контакты (Contacts)**  
ecology@sciencebg.net

<http://www.sciencebg.net>

## 25 Международная конференция Экология и безопасность

23–27 июня 2016 г.

Курортный комплекс Елените, Болгария

### Тематика конференции:

- Энергия, климат и глобальная безопасность в 21-ом столетии;
- Экология воздуха, почвы и воды;
- Экология человека — здоровье и безопасность;
- Гражданская оборона и борьба со стихийными бедствиями.

### Topics:

- Energy, Climate and Global Security in the 21st Century;
- Ecology of Air, Soil and Water;
- Health and Safety;
- Civil Protection and Disaster Management.

### Организаторы (Organized by):

- Bulgarian Academy of Sciences
- Union of Scientists in Bulgaria
- Science & Education Foundation, Bulgaria
- Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan
- Institute of Field and Vegetable Crops, Serbia
- Kavala Institute of Technology, Greece.