



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН,
г. Якутск

Лаборатория Климатических испытаний

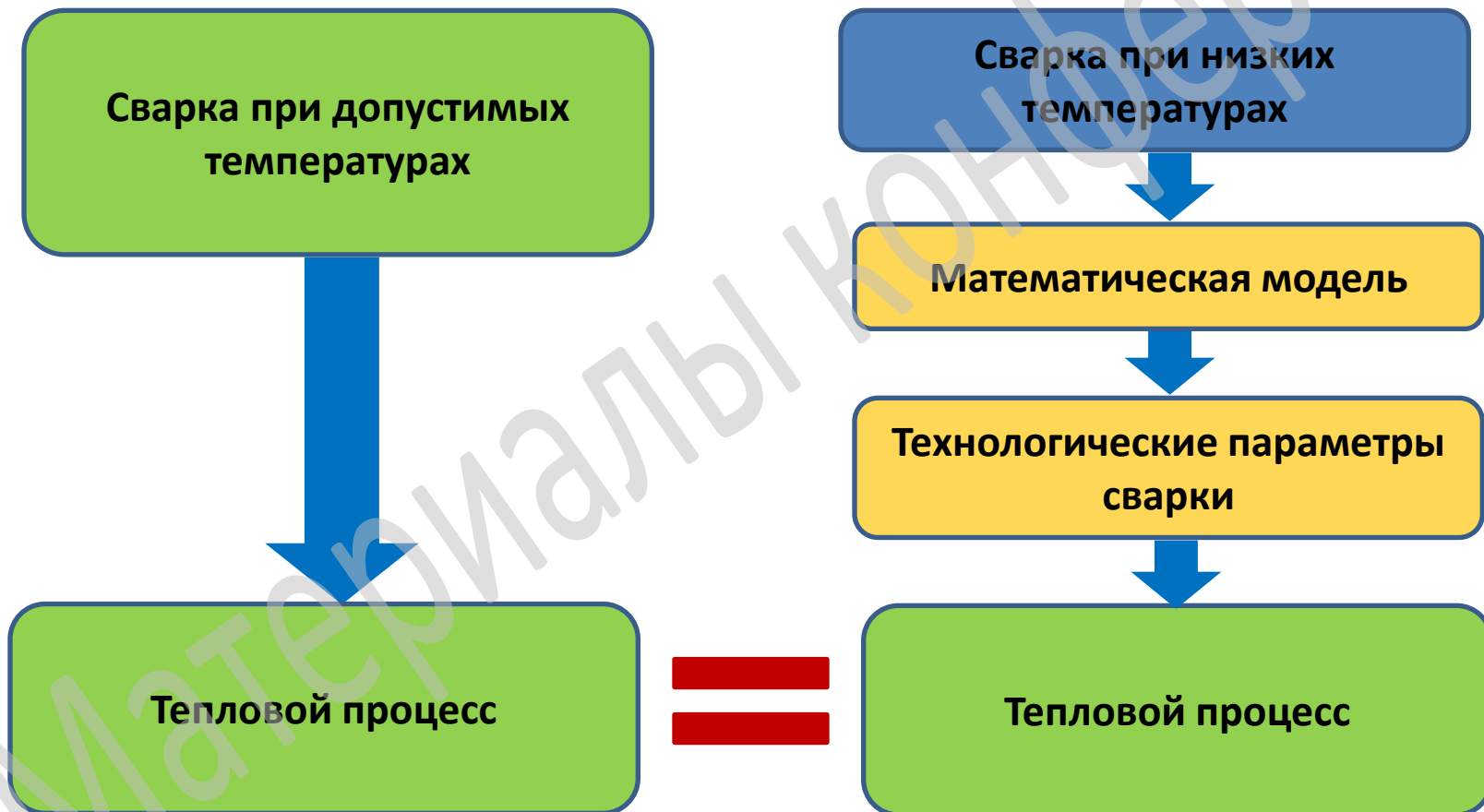
Исследование сварки полиэтиленовых труб при низких температурах

к.т.н. Аммосова О.А.,
д.т.н., проф. Старостин Н.П.,
к.т.н. Данзанова Е.В.,
к.т.н. Герасимов А.И.,
вед. инж. Ботвин Г.В.

Цель работы

Разработка научных основ технологии стыковой и муфтовой сварки полиэтиленовых труб (ПЭ) для газопроводов при низких температурах окружающего воздуха (ОВ).

Идея работы



Способы сварки ПЭ труб

Сварка встык нагретым инструментом

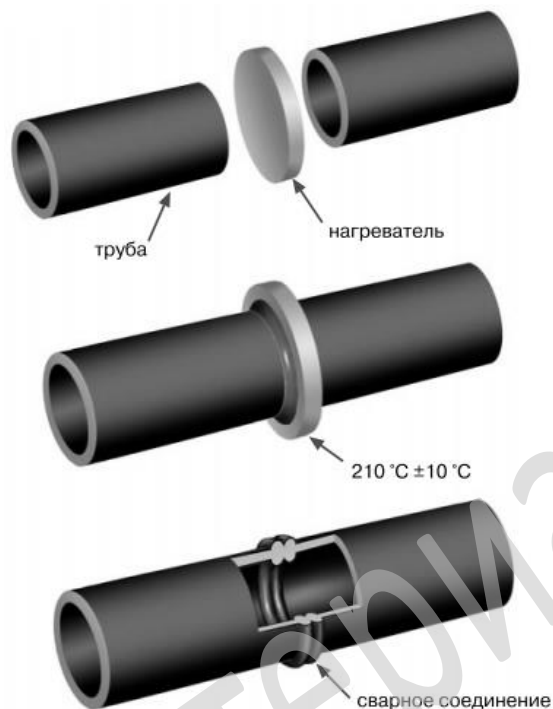


Рис. 1. Сварка встык нагретым инструментом

Сварка муфтой с закладным нагревателем

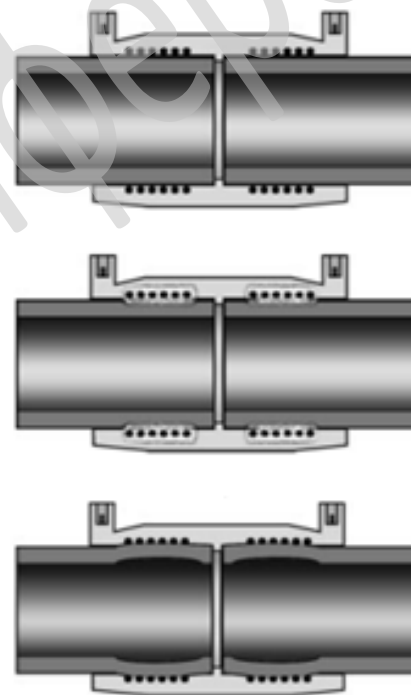


Рис. 2. Сварка муфтой с закладным нагревателем

Сварка встык нагретым инструментом

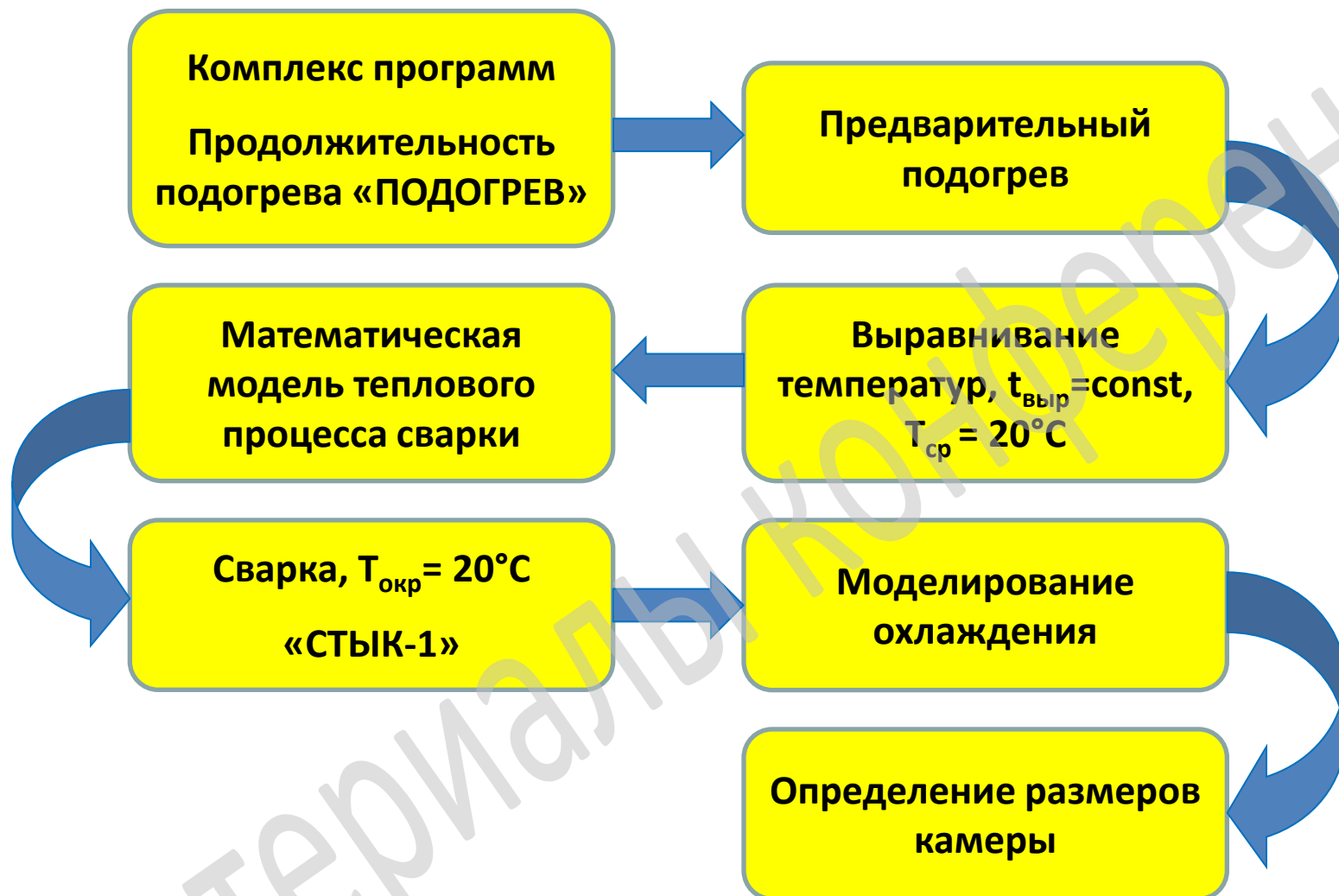


Рис. 3. Схема определения режимов сварки встык нагретым инструментом при низких температурах

Предварительный подогрев

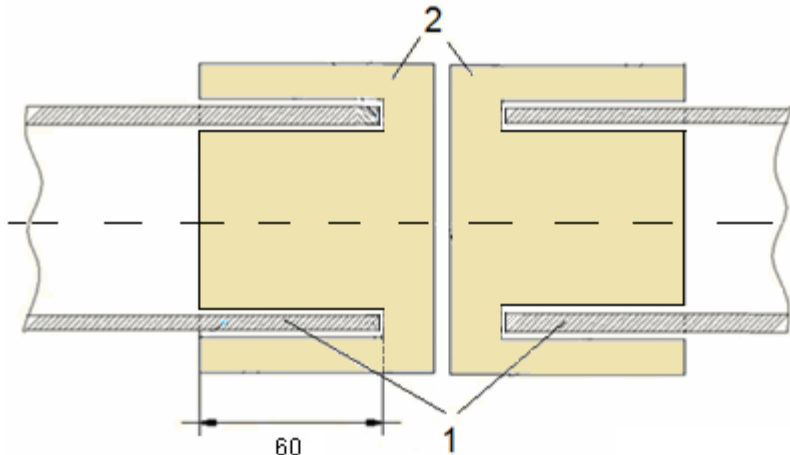


Рис. 4. Предварительный подогрев торцов свариваемых труб:
1 – свариваемые трубы;
2 – нагретый инструмент для подогрева (60°C)

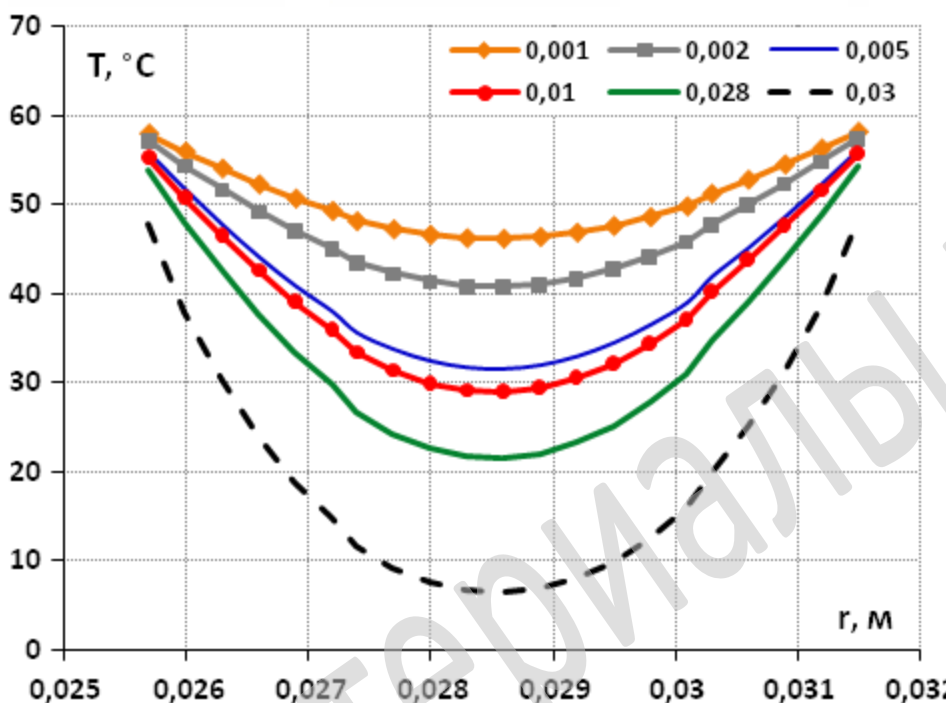


Рис. 5 а. Характерное распределение температуры в стенке трубы по радиусу на различном удалении от торца на момент завершения подогрева

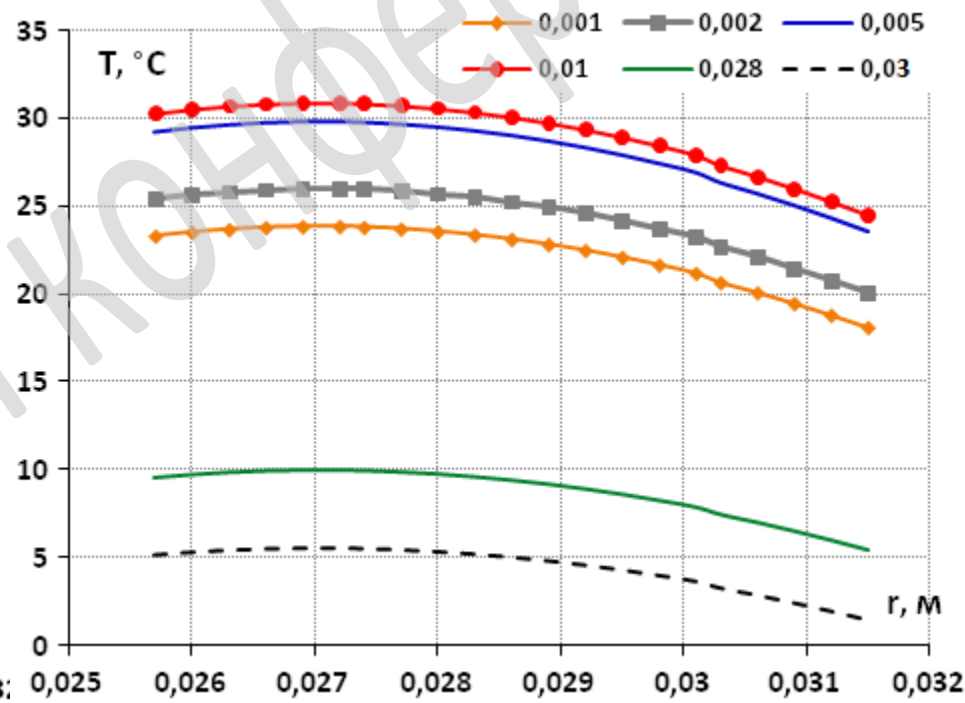


Рис. 5 б. Характерное распределение температуры в стенке трубы на различном удалении от торца после свободного охлаждения при $T=-40^{\circ}\text{C}$

Предварительный подогрев

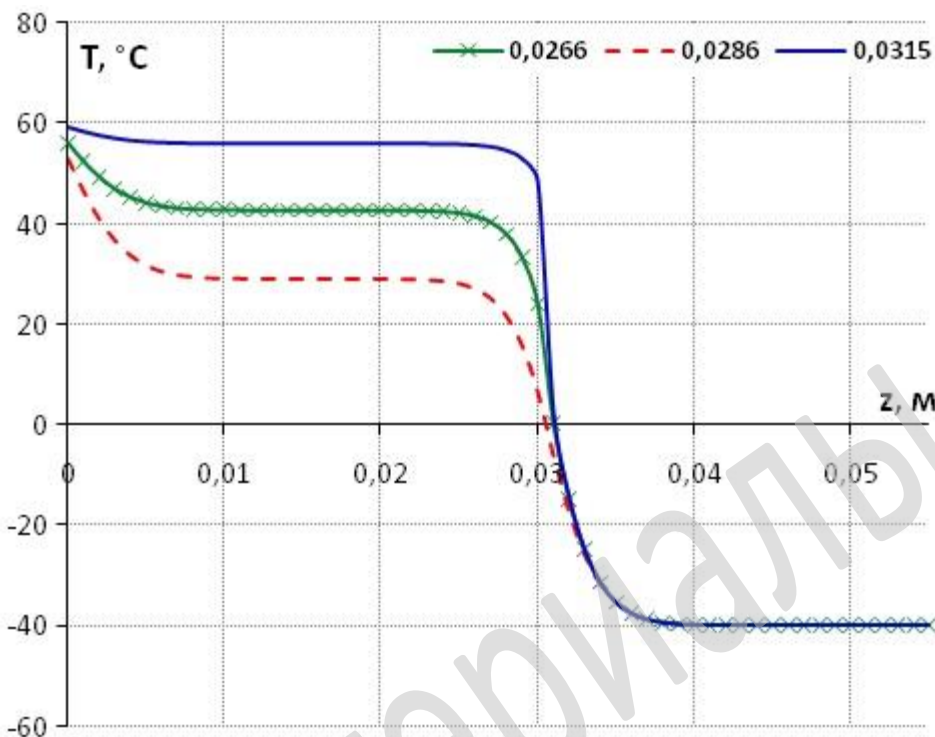
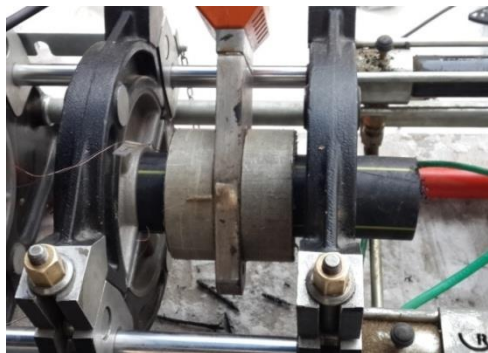


Рис. 6 а. Характерное распределение температуры по длине трубы при различных значениях радиуса в момент завершения подогрева

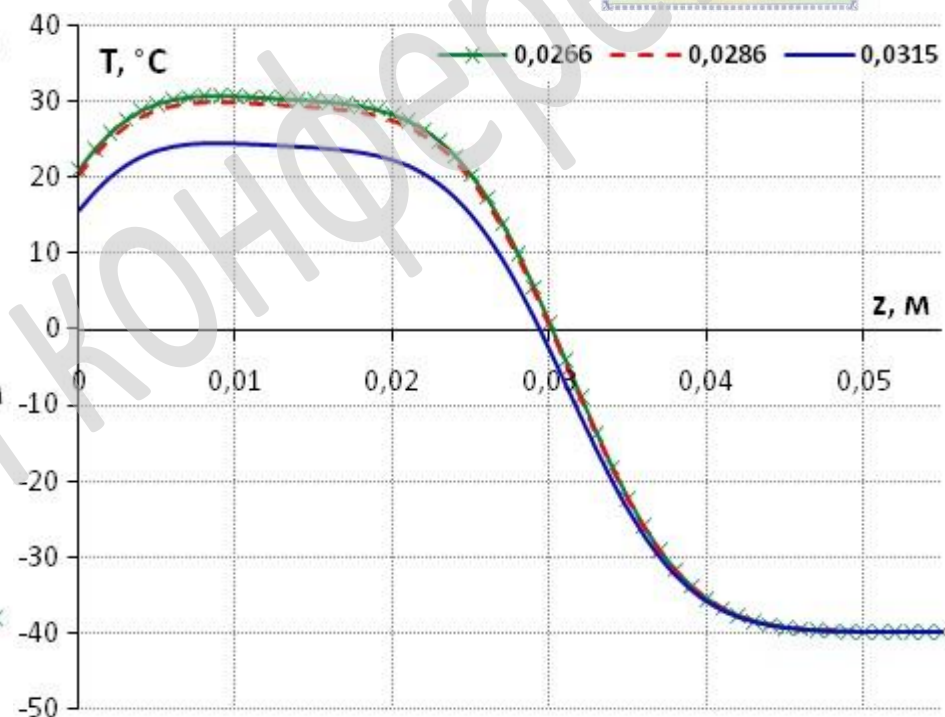


Рис. 6 б. Характерное распределение температуры по длине трубы после свободного охлаждения при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Продолжительности подогрева

Таблица 1 Расчетные продолжительности предварительного подогрева при различных температурах окружающей среды для труб 63 SDR 11 ПЭ 100 при сварке встык

Температура окружающей среды, °С	Расчетное время подогрева, с	Расчетное время выравнивания, с
-15	18	120
-20	20	120
-25	22	120
-30	24	120
-35	26	120
-40	28	120
-45	30	120
-50	32	120

Постановка задачи

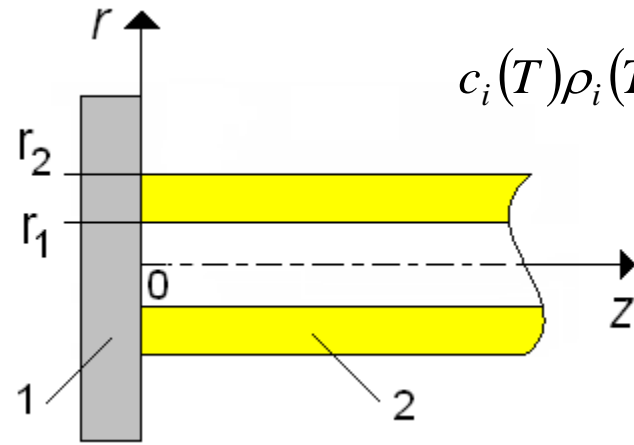


Рис. 7. Схема.

1 – нагретый инструмент;
2 – труба

$$c_i(T)\rho_i(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (1)$$

$$0 < t \leq t_m; \quad 0 < r < r_1; \quad r_1 < r < r_2; \quad 0 < z < l,$$

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad (2)$$

$$T(r, 0, t) = T_H \quad (3) \quad \text{или} \quad \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0} = 0 \quad (4)$$

$$T(r, l, t) = T_0 \quad (5)$$

$$\lambda_3 \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_1-0} = \lambda_2 \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_1+0} \quad T(r_1-0, z, t) = T(r_1+0, z, t) \quad (6)$$

$$\lambda_1 \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_2} = -\alpha(T(r_2, z, t) - T_0) \quad (7)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \lambda_3 r \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

$$\tilde{C}(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (9)$$

$$\tilde{C}(T) = \begin{cases} C_1, & T \leq T_L \\ C_1 - L \frac{d\Psi}{dT}, & T_L < T < T_S \\ C_2, & T \geq T_S \end{cases} \quad (10)$$

$$\Psi(T) = 1 - \frac{\int_{T_S}^T q(u) du}{\int_{T_L}^{T_S} q(u) du}$$

$q(T)$ – зависимость
теплового потока
от температуры

где $\Psi(T)$ – объемная доля твердой фазы

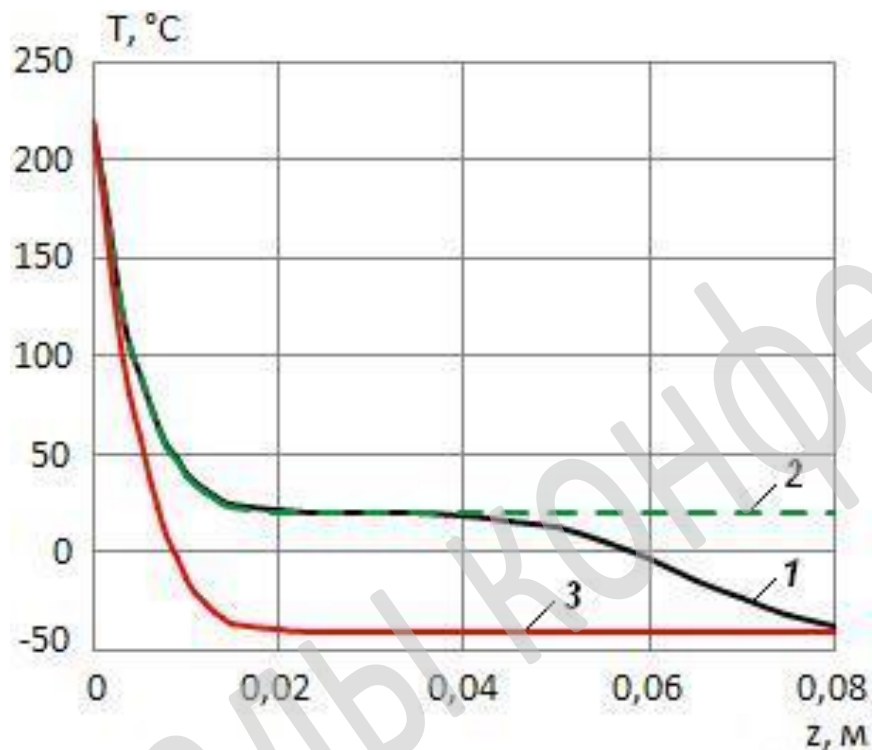


Рис. 8. Распределение температуры по длине трубы в момент завершения этапа нагрева, радиус трубы 0,0293 м:

- 1 – $T_{окр} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ с подогревом,
- 2 – $T_{окр} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- 3 – $T_{окр} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ без подогрева

Охлаждение

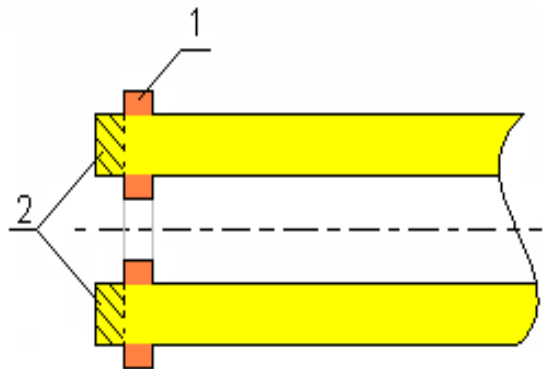


Рис. 9. Осадка. Стенка трубы (разрез):
1 – грат; 2 – область уходящая в грат

Осредненную температуру в грате определяем из соотношения:

$$T_{\Gamma} = \frac{2\pi}{V} \int_0^{\xi} \int_{r_1}^{r_2} r \cdot T(r, z) dr dz \quad (11)$$

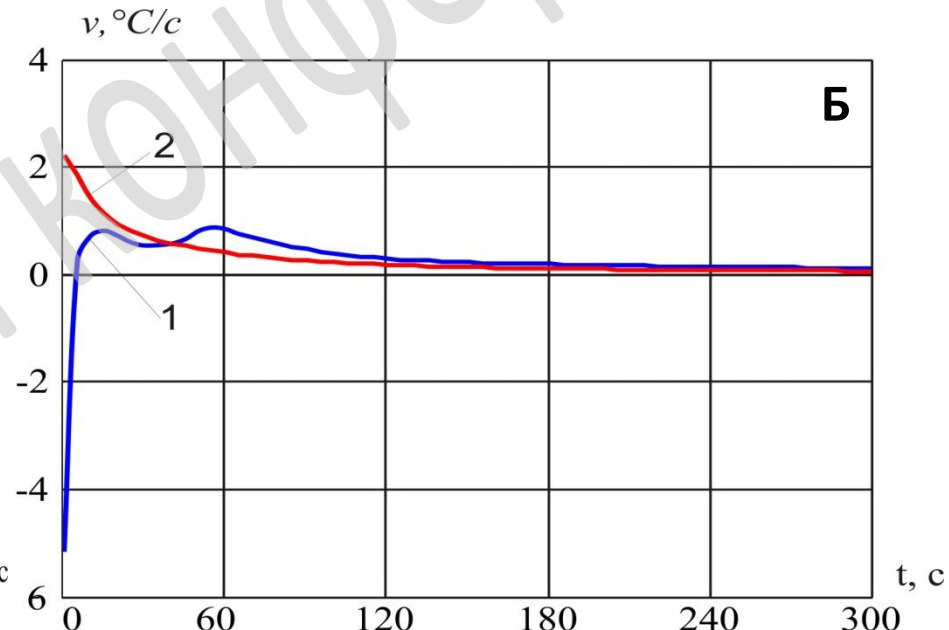
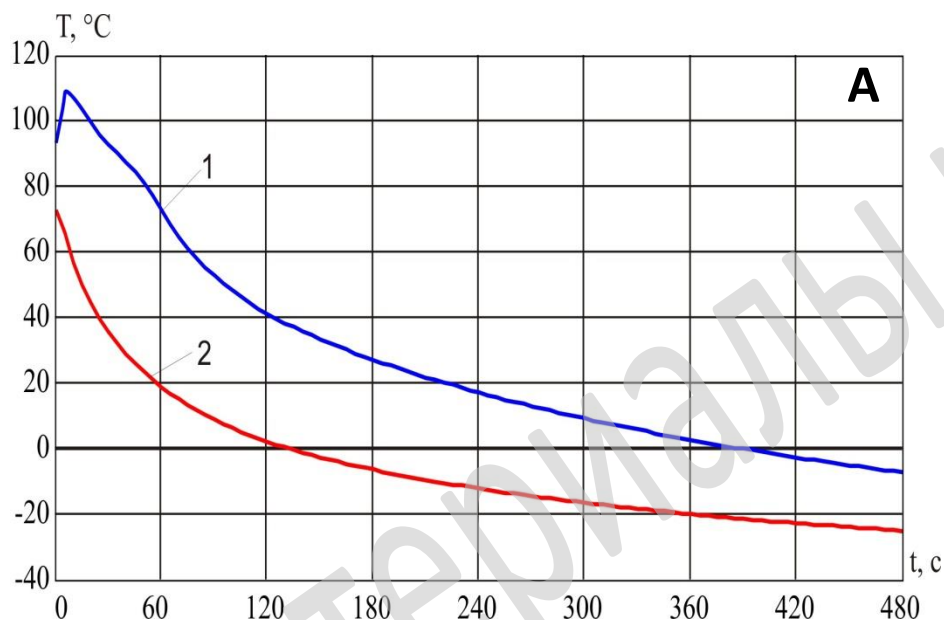


Рис. 10. Изменение температуры (а) и скорости охлаждения (б) по времени в точке $(0,0315; 0,001)$ при охлаждении с учетом грата и без него:

1 – с учетом грата; 2 – без учета грата. Температура ОВ равна - 40 $^{\circ}\text{C}$

Охлаждение

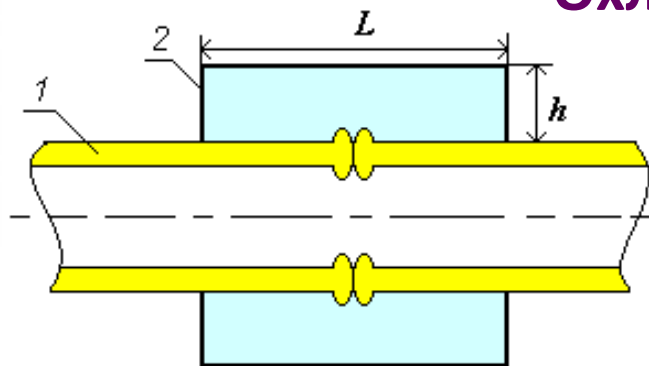


Рис. 11. Схема теплоизоляционной камеры:

1 – труба;

2 – теплоизоляционная камера;

L – длина; h – высота

Температуру в камере находим из соотношений:

$$Q = \alpha \int_{\Gamma} \left(T|_{\Gamma} - \check{T}_{kam}(t) \right) \tau d\Gamma \quad (12)$$

$$Q = c_3 \rho_3 V_{kam} \left(T_{kam} - \check{T}_{kam} \right) \quad (13)$$

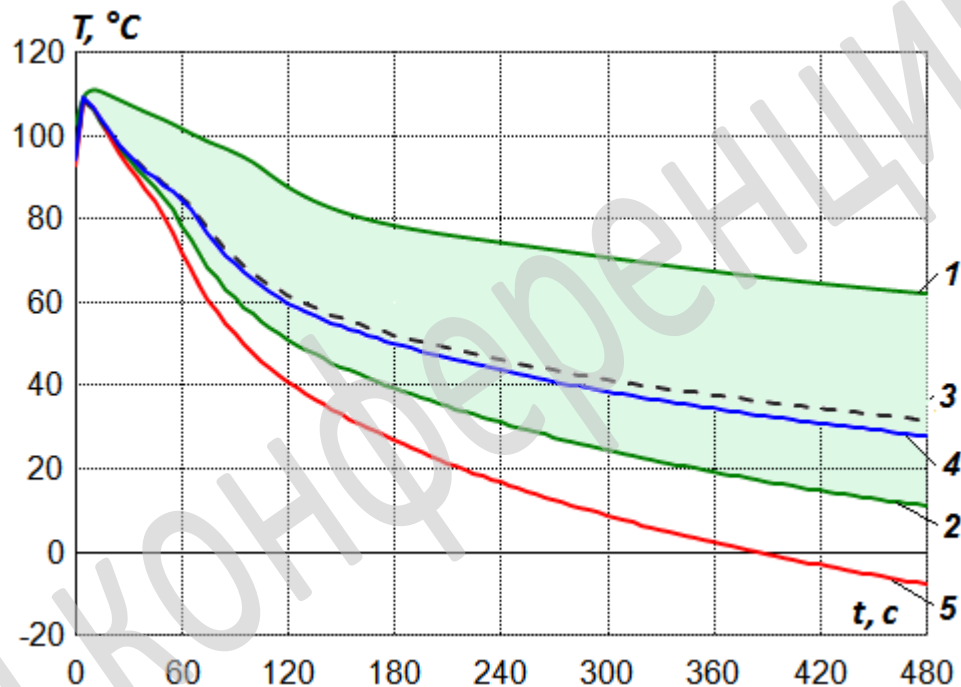


Рис. 12. Изменение температуры по времени в точке (0,0315; 0,001) при различных температурах, (1–3, 5) – без камеры, 4 – с камерой:
 1 – +45 °C; 2 – -15 °C; 3 – +20 °C;
 4 – -40 °C с камерой;
 5 – -40 °C без камеры

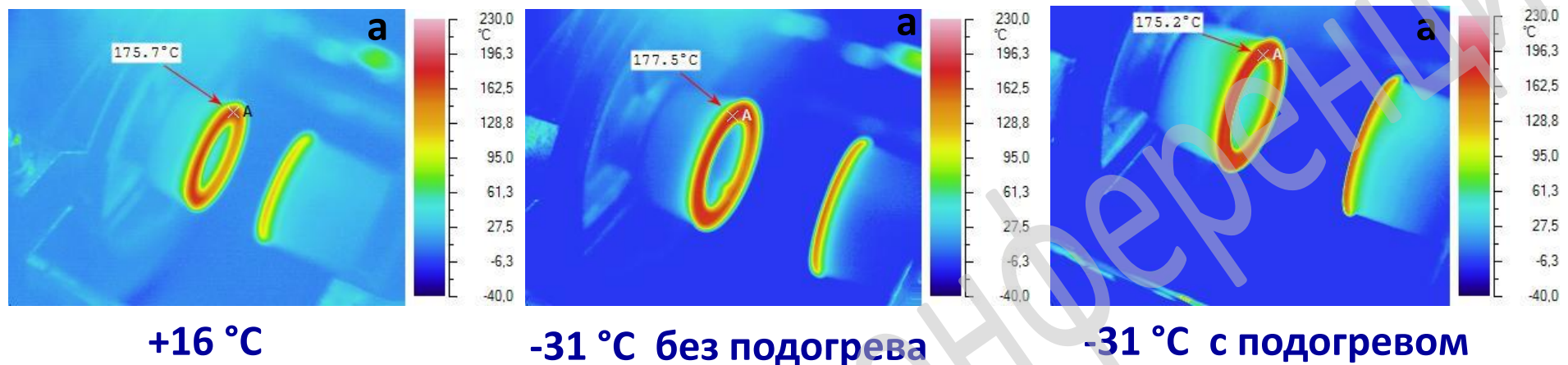
Размеры камеры для ПЭ трубы SDR11

63×5,8 для различных условий ОБ:

- $40 \leq T_g < -15$ °C $L = 4$ см; $h = 2$ см;

- $60 \leq T_g < -40$ °C $L = 3$ см; $h = 2$ см;

После удаления нагретого инструмента



В момент завершения технологической паузы

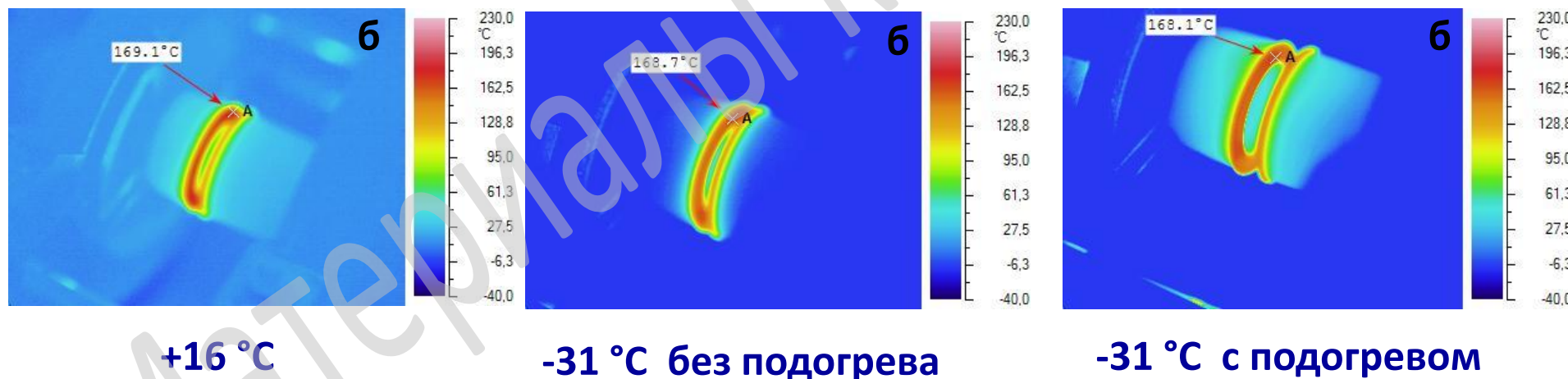


Рис. 13. Термограмма технологической паузы при различных температурах окружающего воздуха без и с предварительным подогревом:

а) после удаления нагретого инструмента; **б)** в момент завершения технологической паузы

Определение прочности стыкового сварного соединения с заданной площадью сварки



Рис. 14. Шаблон для создания заданной площади сварки

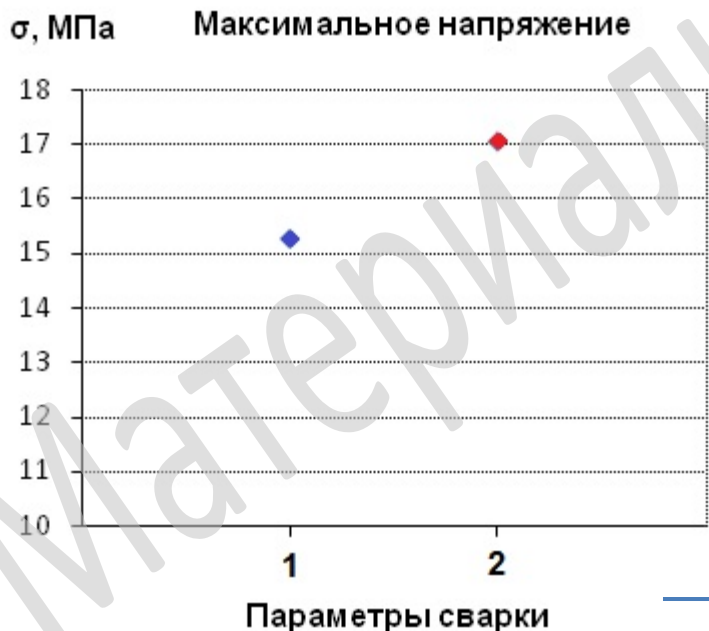


Рис. 15. Значения максимального напряжения при испытаниях на осевое растяжение образцов стыкового сварного соединения с предварительно нанесенным дефектом.

Параметры сварки:

1 – $T_{окр} = +22 \text{ }^\circ\text{C}$, стандартная сварка;

2 – $T_{окр} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$, предварительный подогрев, охлаждение в теплоизоляционной камере



Рис. 16. Установка для испытаний на длительное растяжение

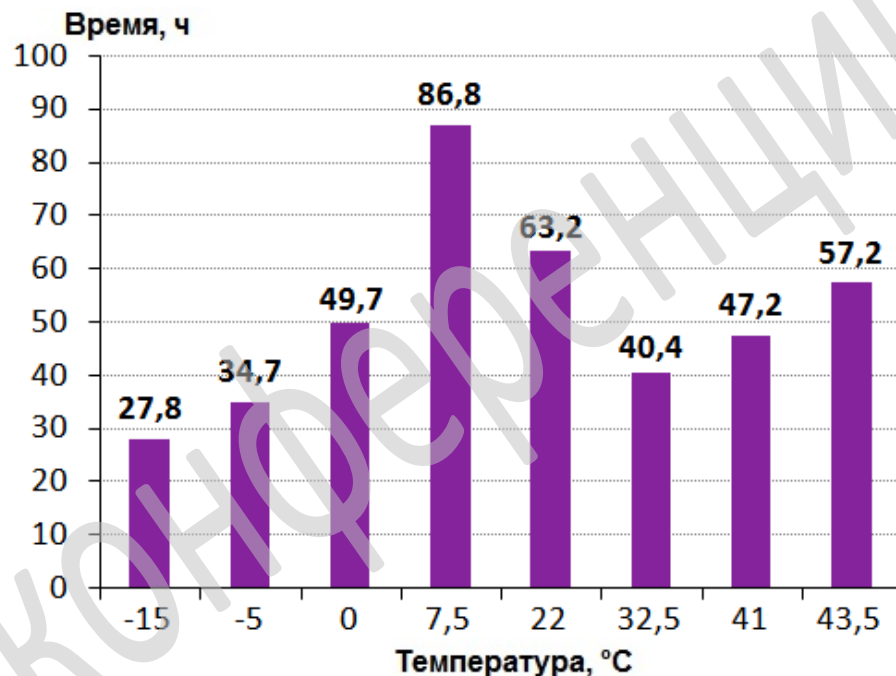


Рис. 17. Зависимость времени разрушения образцов-лопаток из сварных стыковых соединений от температуры ОВ при сварке

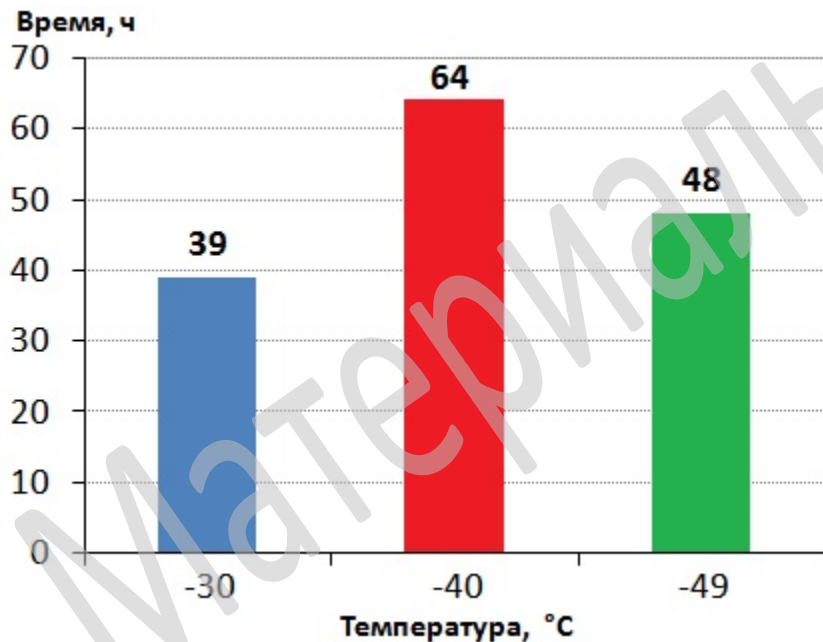


Рис. 18. Время до разрушения сварных стыковых соединений, изготовленных при низких температурах воздуха с предварительным подогревом

Сварка муфтой с закладным нагревателем



Рис. 19. Схема определения режимов сварки ЗН с предварительным подогревом при низких температурах



Постановка задачи



$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (14)$$

$$0 < t < t_m, \quad r_1 < r < r_3, \quad 0 < z < z_{\text{муф}}$$

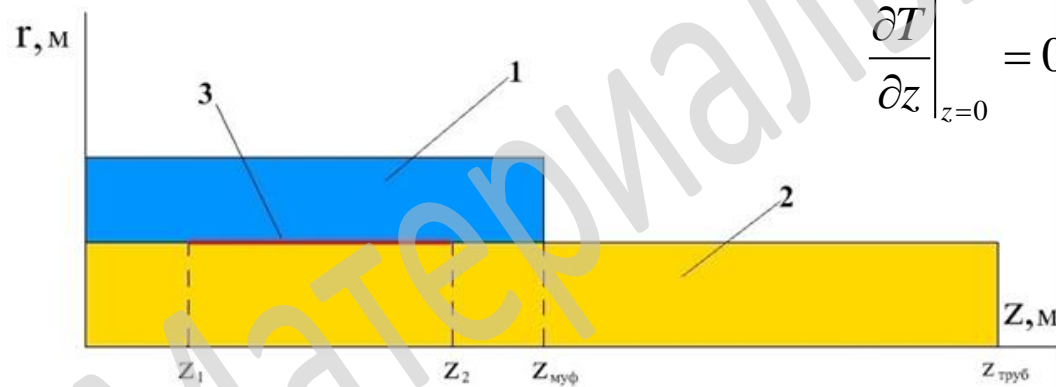
$$r_1 < r < r_2, \quad z_{\text{муф}} < z < z_{\text{труб}}$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_{M-0}} - \lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_{M+0}} = Q(t), \quad z_1 \leq z \leq z_2, \quad (15)$$

$$T \Big|_{r_{M-0}} = T \Big|_{r_{M+0}}, \quad z_1 \leq z \leq z_2 \quad (19)$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_2-0} = \lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_2+0}, \quad (16)$$

$$T(r_2 - 0, z, t) = T(r_2 + 0, z, t) \quad (17)$$



$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (18)$$

$$T(r, L_1, t) = T_{\text{окр}} \quad (19)$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_G = -a(T \Big|_G - T_{\text{окр}}) \quad (20)$$

$$T(r, z, 0) = T_{\text{окр}} \quad (21)$$

Рис. 20. Расчетная схема трубы с муфтой:

1 – муфта; 2 – стенка трубы;

3 – нагревательный элемент

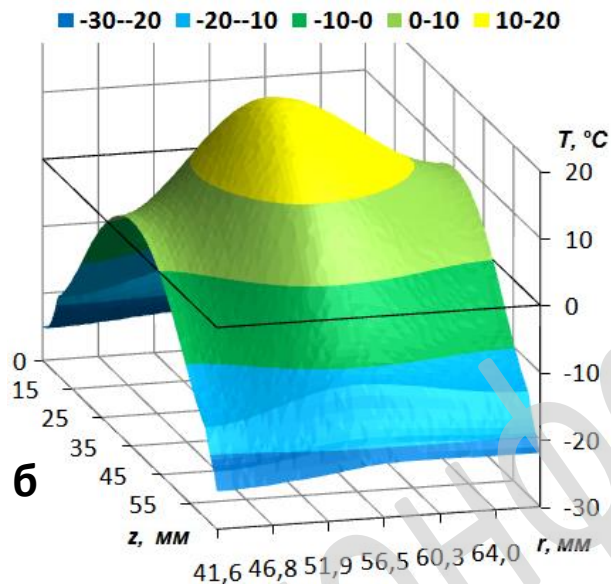
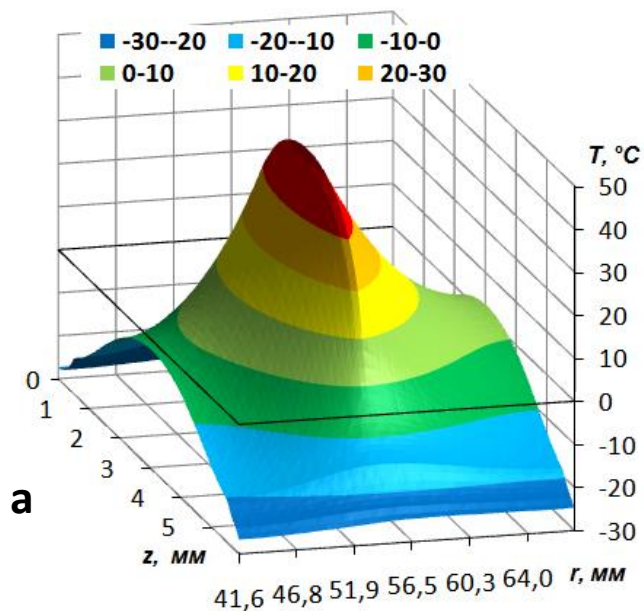


Рис. 21. Распределение температуры при температуре воздуха минус 32 °С:
 а) после предварительного подогрева, напряжение $U=16$ В, продолжительность подогрева 410 с;
 б) после выравнивания, продолжительность выравнивания 70 с.

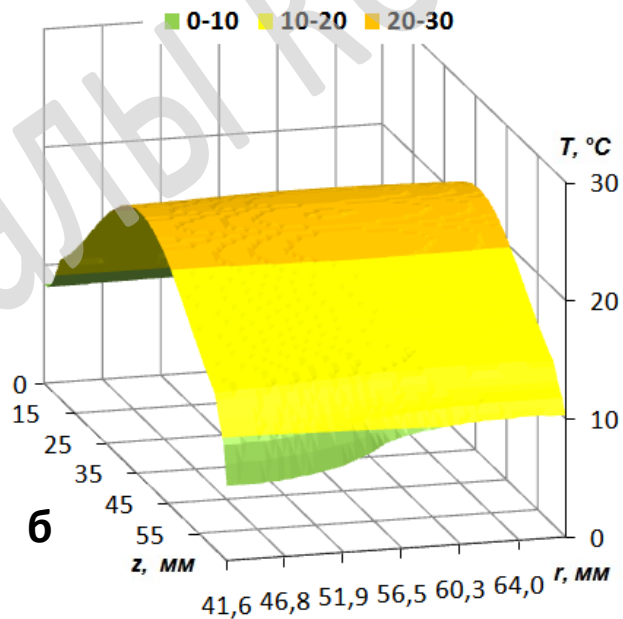
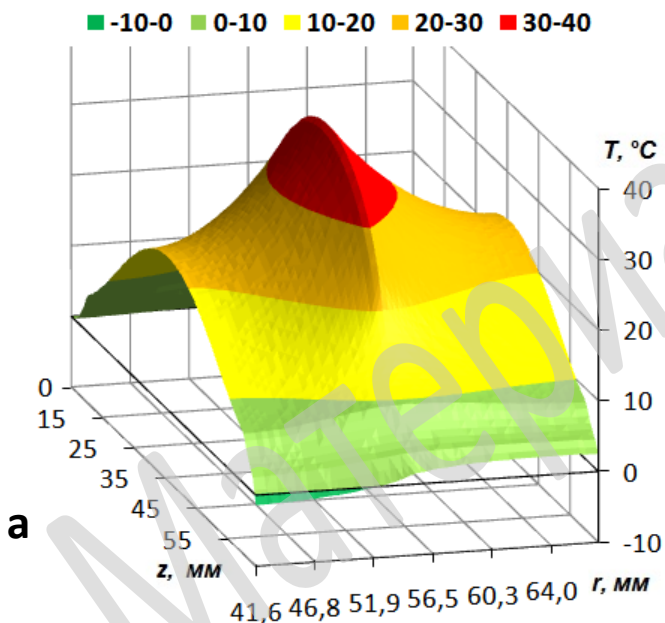


Рис. 22. Распределение температуры при температуре воздуха минус 32 °С:
 а) Напряжение $U=10$ В, продолжительность подогрева 1680 с;
 б) после выравнивания продолжительность выравнивания 360 с.

Сварка муфтой полиэтиленовых труб при низких температурах

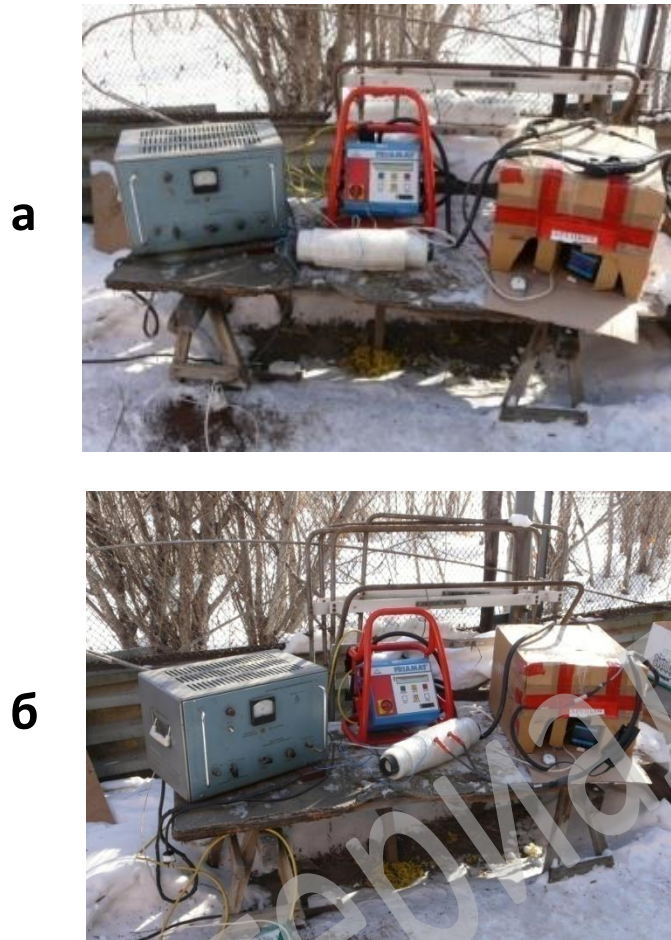


Рис. 23. Проведение сварки при низких температурах ОВ:
а) предварительный подогрев;
б) сварка

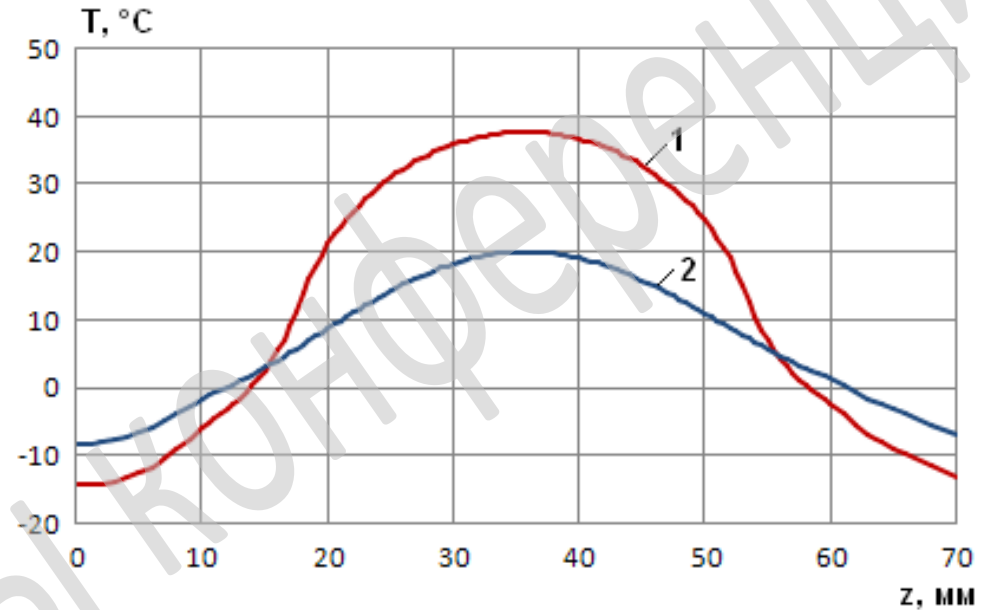


Рис. 24. Распределение температуры по длине по линии соединения при температуре ОВ -40°C :
1 – после предварительного подогрева 19 мин;
2 – после выравнивания 180 с

Таблица 2 Расчетные продолжительности предварительного подогрева при различных температурах окружающей среды для труб 110 SDR 9 ПЭ 100 при муфтовой сварке. Толщина теплоизоляции 3 см.

Напряжение $U=12В$

Температура окружающей среды, °С	Расчетное время подогрева, мин	Максимальная температура в соединении, °С	Расчетное время выравнивания, с	Средняя температура после выравнивания, °С
-20	12	37	180	20
-25	14	37	180	20
-30	16	37	180	20
-35	18	38	180	20
-40	20	38	180	20
-45	22	38	180	20
-50	24	39	180	20

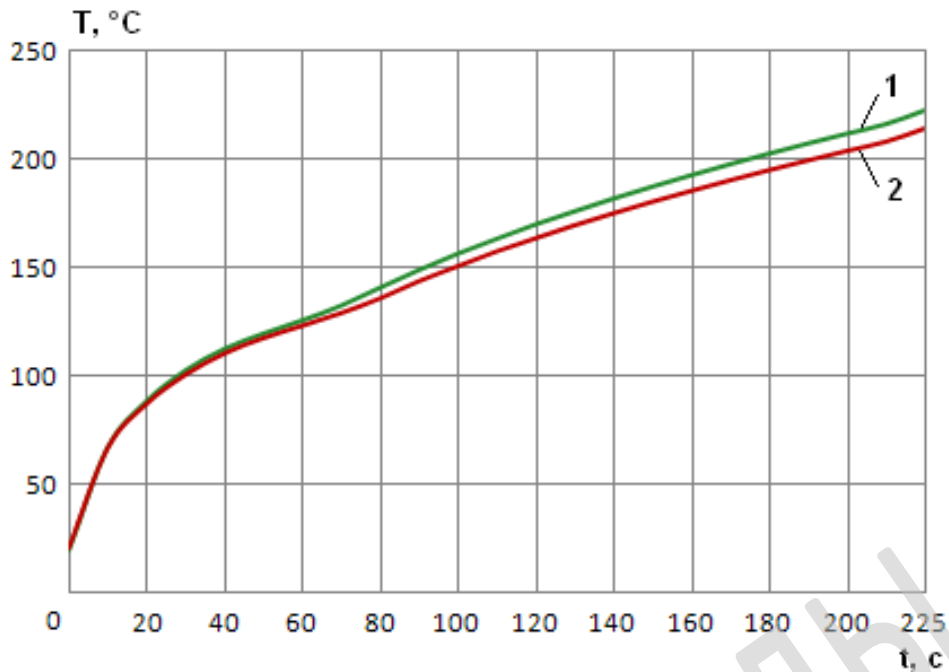


Рис. 25. Распределение температуры по времени в точке (55,0; 35,5) мм при нагреве при различной температуре окружающего воздуха:
 1 – 20 °С;
 2 – -40 °С, с подогревом

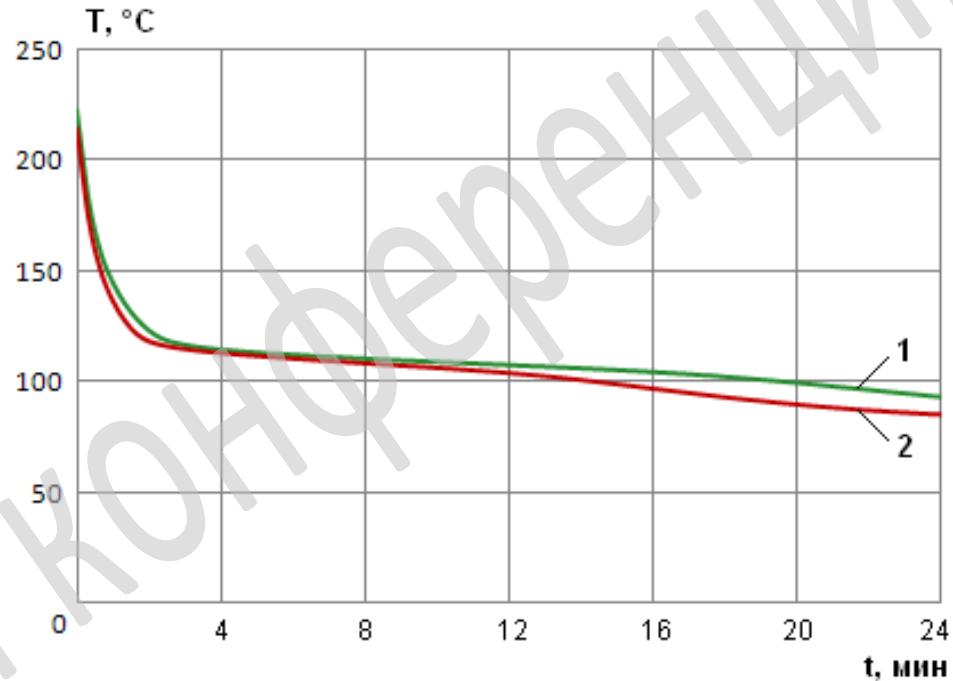
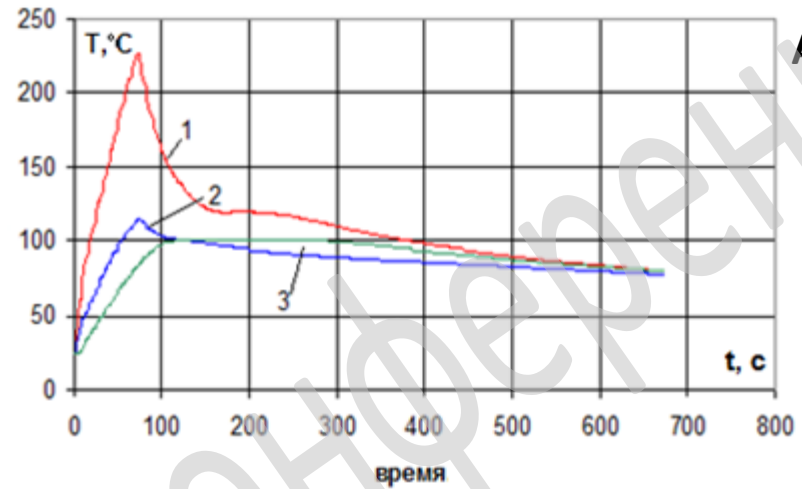
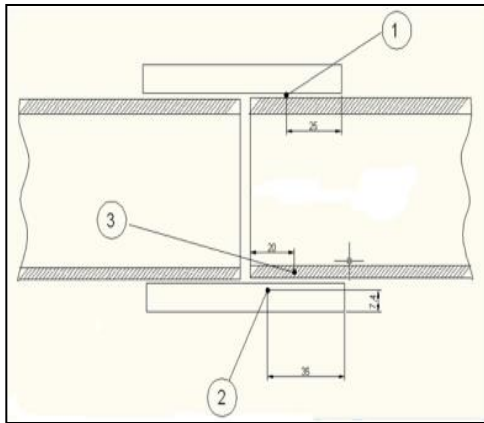


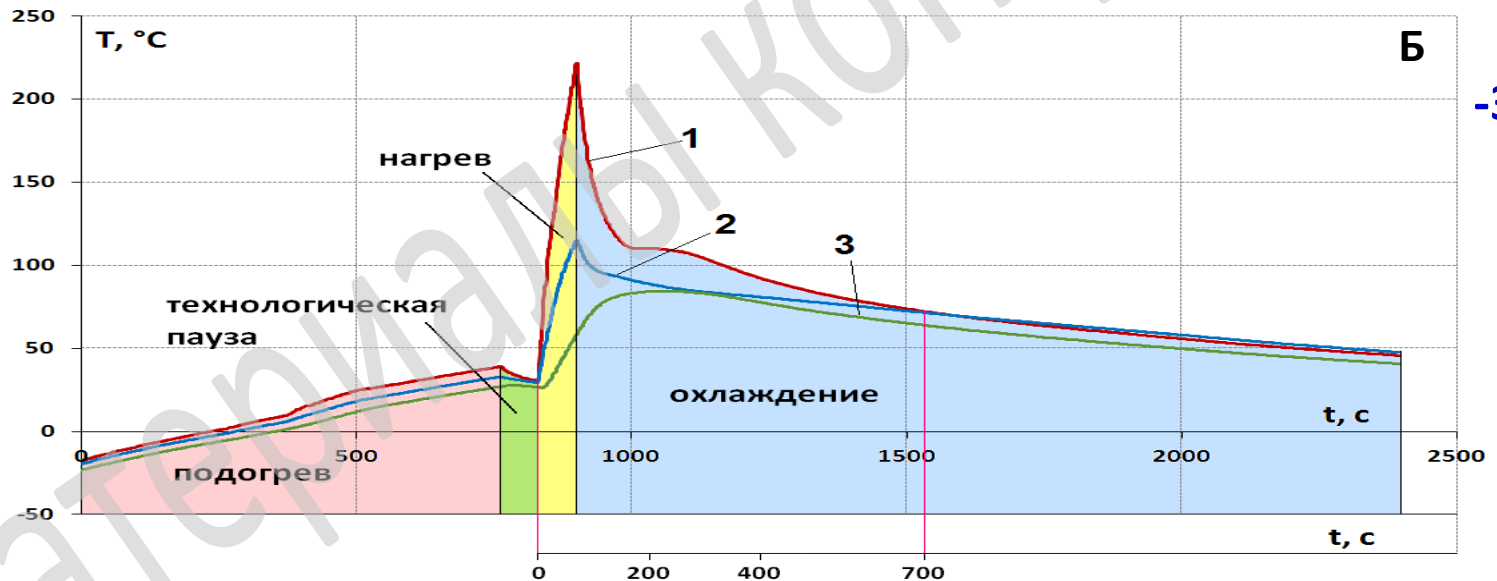
Рис. 26. Распределение температуры по времени в точке (55,0; 35,5) мм при охлаждении при различной температуре ОВ :
 1 – 20 °С;
 2 – -40 °С, с подогревом

Сопоставление экспериментальных данных при допустимых и низких температурах



+23 °C

Рис. 27. Схема расположение термопар



-33 °C

Рис. 28. Зависимости температур, регистрируемые в процессе сварки при температурах плюс 23 °C (а) и минус 33 °C (б) в точках 1-3

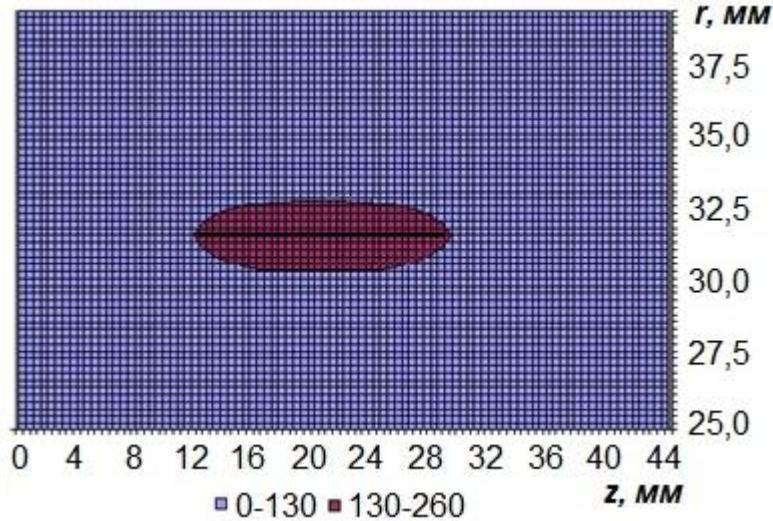


Рис. 29. Изотерма 130 °С при сварке при температуре ОВ 20 °С

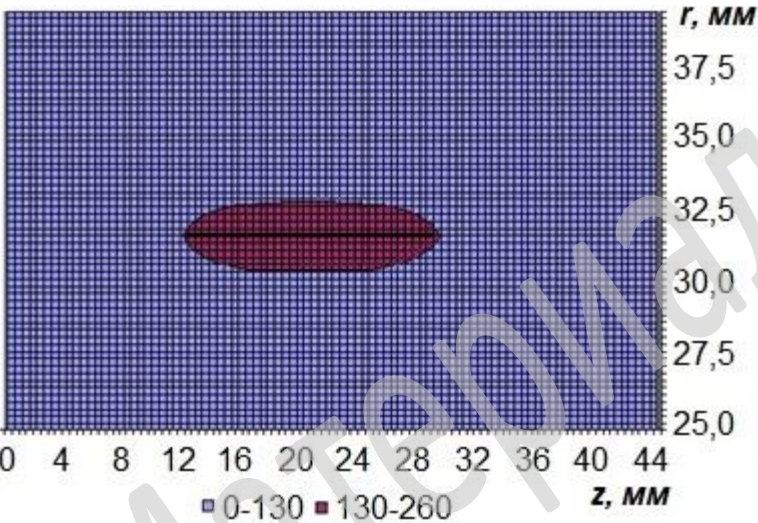


Рис. 30. Изотерма 130 °С при сварке при температуре ОВ -40 °С с предварительным подогревом и охлаждением с теплоизоляцией

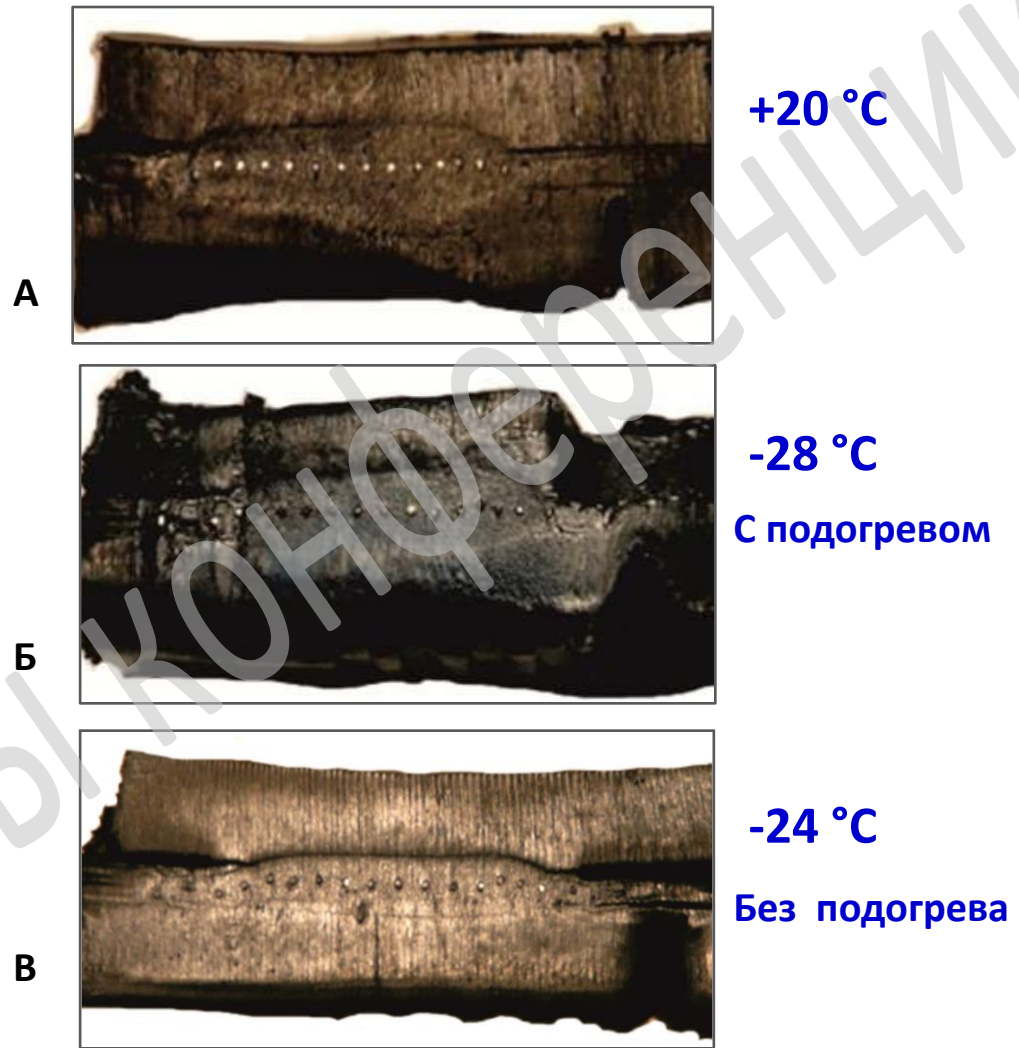


Рис. 31. Область расплава муфтовых сварных соединения после локального вторичного нагрева:
 а) при комнатной температуре;
 б) при температуре ОВ -28 °С с предварительным подогревом;
 в) при температуре ОВ -24 °С без предварительного подогрева.



Рис. 32. Процесс отслаивания при испытаниях по ISO 13954

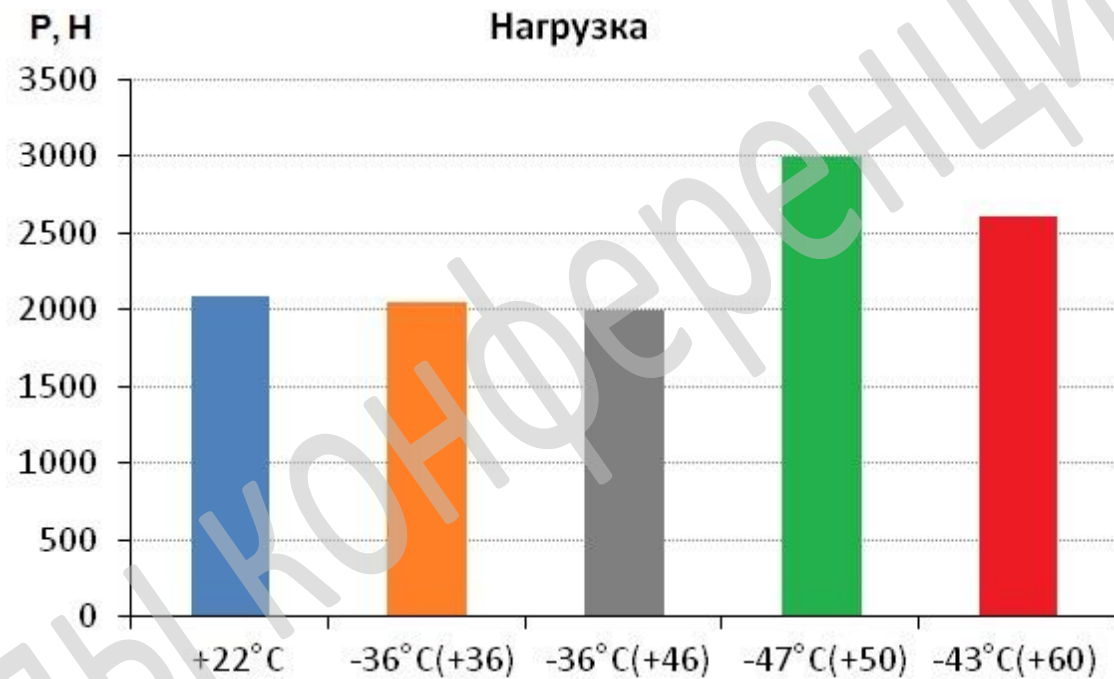


Рис. 33. Значения максимальной разрывной нагрузки муфтовых сварных соединений, полученных при различных температурах окружающего воздуха. (В скобках максимальные температуры достигаемые при подогреве) труба 110 SDR 9 ПЭ 100

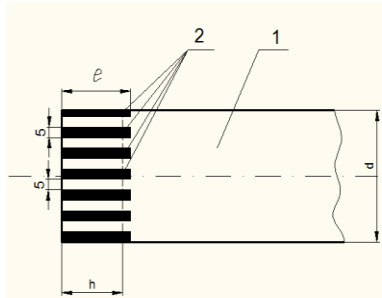


Рис. 34. Схема нанесения барьерного слоя на поверхность полимерной трубы при ширине испытываемого образца 10 мм

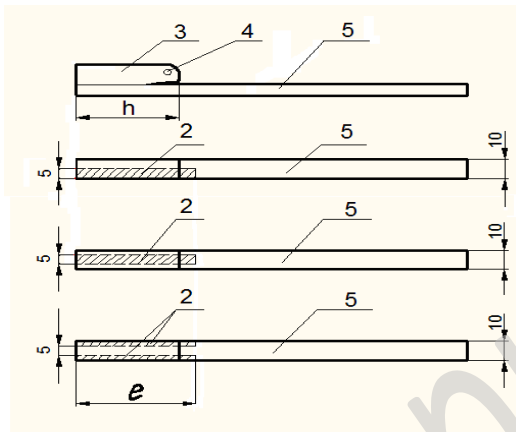


Рис. 35. Образцы муфтового сварного соединения ПЭ труб для испытания на отслаивание с различными положениями сваренной области на испытываемом образце (нагревательная спираль не приведена)

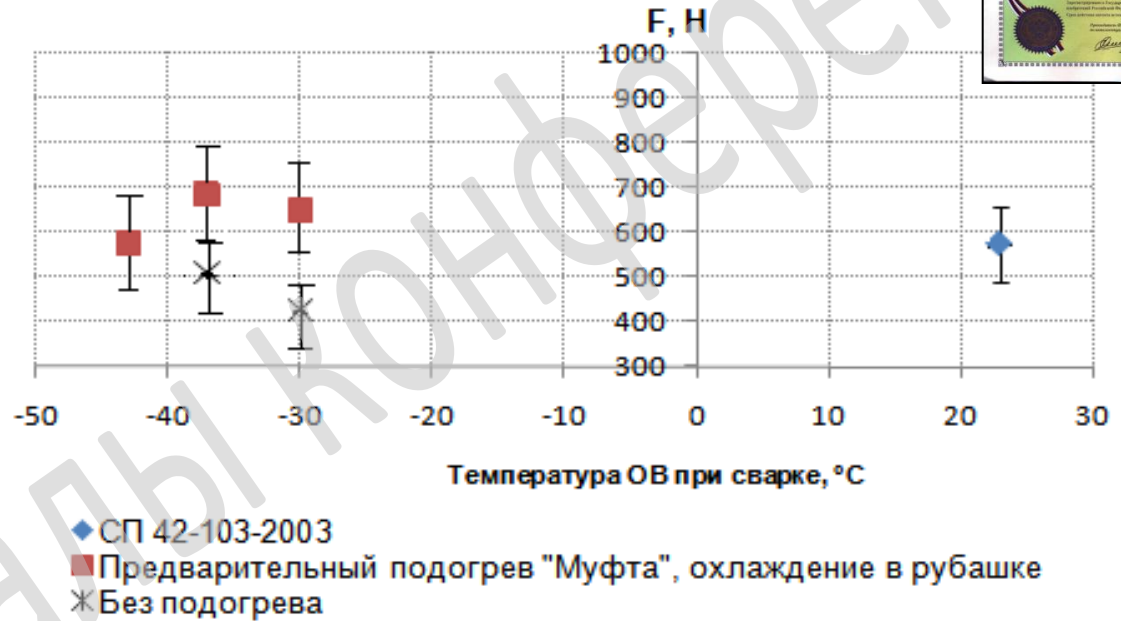


Рис. 36. Значения максимальной разрывной нагрузки сварных соединений, изготовленных при различных температурах ОБ (труба 63 SDR 11 ПЭ 100)



Выводы

- Разработаны научные основы решения проблемы сварки ПЭ труб для газопроводов при низких температурах, заключающиеся в обеспечении протекания теплового процесса сварки по закономерностям, характерным при сварке в допустимых условиях, путем регулирования;
- Для регулирования тепловых процессов сварке при низких температурах разработаны математические модели, адекватно описывающие реальные процессы, и комплексы программ для определения технологических параметров сварки;
- Проведением комплекса испытаний сварных соединений установлено, что предлагаемые технологии стыковой и электромuftовой сварки при естественно низких температурах обеспечивают необходимый уровень качества и по показателям не уступают показателям соединений, изготовленных при температурах из допустимого интервала температур производства сварочных работ;

Спасибо за внимание!

Материалы конференции