

Всесоюзный научно-исследовательский институт  
по проектированию магистральных трубопроводов  
ВНИИСТ

Институт "НИПИОРГнефтегазстрой"

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ВНИИСТ  
*А.М. Яковлев*  
" 20 " 1983 г.

УТВЕРЖАЮ  
Директор НИПИОРГнефтегазстроя  
*Н.М. Павлов*  
" 23 " 1983 г.

СОГЛАСОВАНО  
Начальник Горзатрубопроводного  
В.Н. Герасимов  
" 26 " 1983 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по гидравлическому испытанию плетей  
трубопроводов в условиях низких температур

Р 508-83

Зам.директора ВНИИСТ, к.т.н.

*И.Д. Красулин* И.Д. КРАСУЛИН

Зав. ОПН ВНИИСТ, к.т.н.

*В.В. Рождественский* В.В. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ

Зав. лабораторией ВНИИСТ

*Е.М. Климовский* Е.М. КЛИМОВСКИЙ

Зав. лабораторией ВНИИСТ, к.т.н.

*С.И. Левин* С.И. ЛЕВИН

Мл.научный сотрудник ВНИИСТ

*Т.П. Богачева* Т.П. БОГАЧЕВА

Зав. лабораторией НИПИоргнефтегазстроя,  
д.т.н.

*Б.Л. Кривошеин* Б.Л. КРИВОШЕИН

Ст. научный сотрудник  
НИПИоргнефтегазстроя, к.т.н.



В.П.КОВАЛЬКОВ

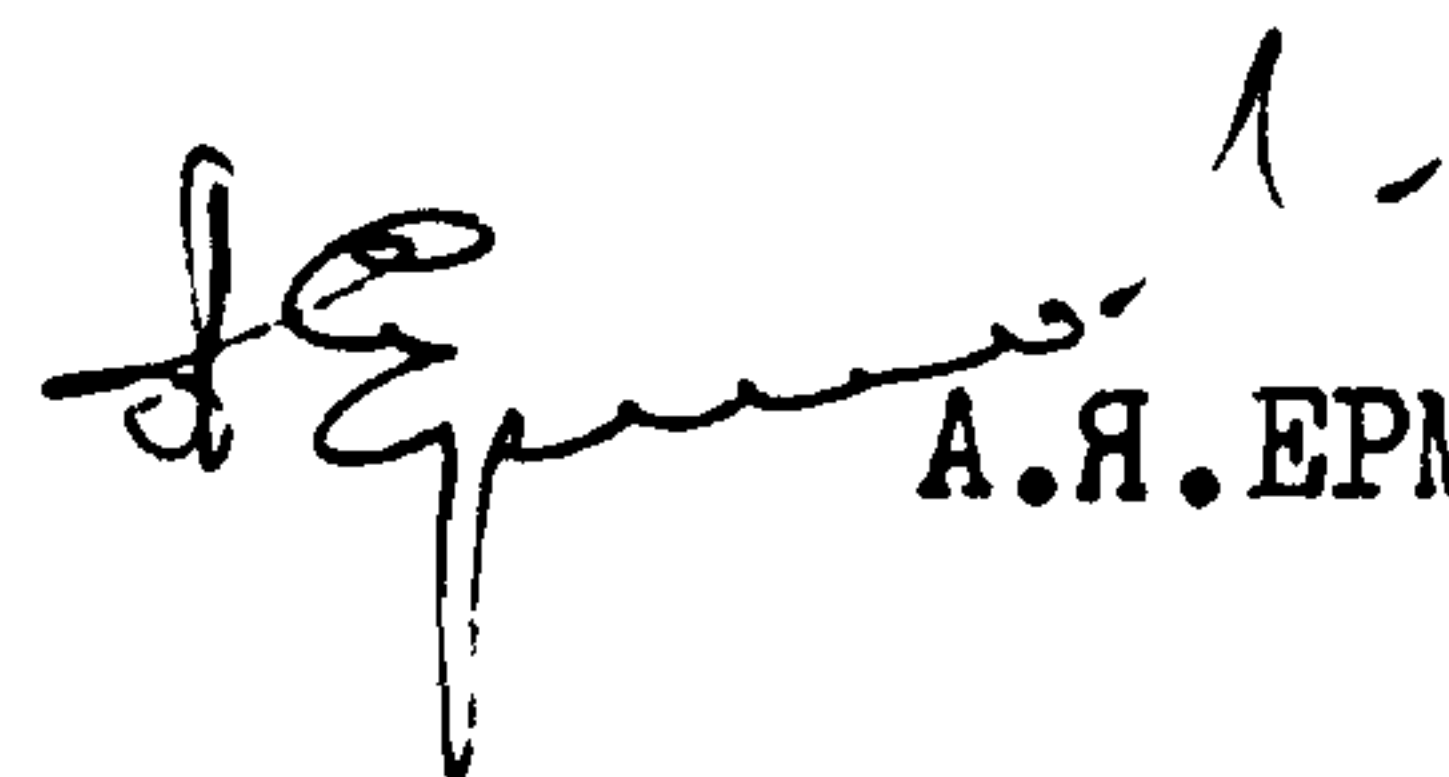
Мл. научный сотрудник  
НИПИоргнефтегазстроя



Т.И.ПРОНЯЕВА

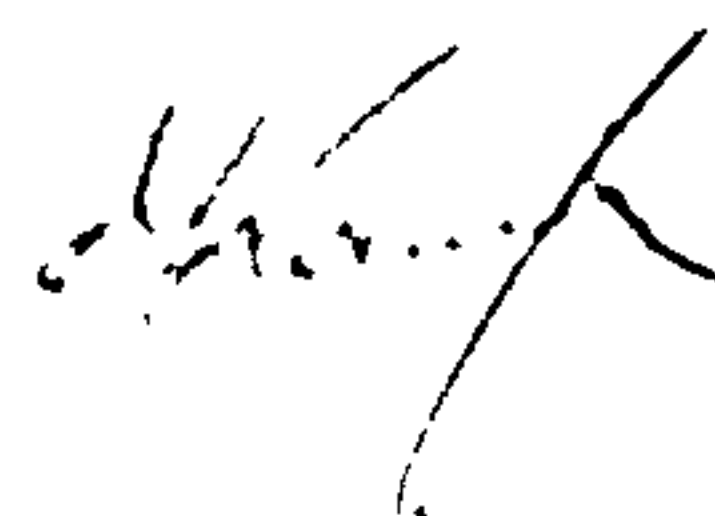
Соисполнители:

Гл.инженер Союзподводтрубопровод-  
строя



А.Я.ЕРМОЛИН

Зам. начальника технического  
отдела Союзподводтрубопроводстроя



В.Я.КАНАЕВ

Москва, 1983 г.

Одной из проблем круглогодичного строительства магистральных трубопроводов является проведение гидравлического испытания в условиях низких температур плетей переходов трубопроводов.

Известные способы предотвращения замерзания жидкости в плетях переходов при низких температурах (использование антифризов, растворов поваренной соли и др.) мало эффективны по техническим и экономическим соображениям. Вместе с тем такие испытания при температурах до  $-40^{\circ}\text{C}$  могут осуществляться путем реализации технологии, изложенной в настоящих Рекомендациях и предусматривающей подачу перегретого водяного пара в трубчатые греющие элементы, расположенные внутри плетей.

Рекомендации предназначены для инженерно-технических работников строительных и проектных организаций, занятых организацией и производством работ по испытанию трубопроводов.

Рекомендации разработали: инж.Климовский Е.М., к.т.н. Левин С.И., м.н.с. Богачева Т.П. (ВНИИСТ); д.т.н. Кривошеин Б.Л., к.т.н. Ковальков В.П., м.н.с. Проняева Т.И. (НИПИоргнефтегазстрой) при участии инженеров Ермолина А.Я. и Канаева В.Я. (Союзподводтрубопроводстрой).

|                         |                           |                |
|-------------------------|---------------------------|----------------|
| Министерство строитель- | Рекомендации по гидравли- | Р 508-83       |
| ства предприятий нефтя- | ческому испытанию плетей  | Миннефтегазстр |
| ной и газовой промыш-   | трубопроводов в условиях  | Впервые        |
| ленности                | низких температур         |                |

## **I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

I.1. Рекомендации разработаны в развитие СНиП Ш-42-80 "Магистральные трубопроводы. Правила производства и приемки работ".

I.2. Рекомендации разработаны во исполнение решения секции организации и технологии строительства магистральных трубопроводов научнотехнического совета Миннефтегазстроя от 3 ноября 1982 г.

I.3. При производстве испытаний трубопроводов следует учитывать требования действующих нормативных документов и в том числе требований по технике безопасности проведения указанных работ.

I.4. Рекомендации предназначены для использования при проведении I этапа испытаний, регламентированного таблицей I7 СНиП Ш-42-80 для участков:

категорий В и I - переходов нефти и нефтепродуктопроводов через водные преграды и прилегающие прибрежные участки;

категории I - переходов газопроводов через водные преграды и прилегающие участки;

категории I - переходы через железные и автомобильные дороги, пересечения с воздушными линиями электропередачи напряжением 500 кВ и более.

## **II. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПЛЕТЕЙ ПЕРЕХОДОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

2.1. Технологическая схема гидравлического испытания плетей переходов в условиях низких температур приведена на рис. I.

|               |                            |                          |
|---------------|----------------------------|--------------------------|
| Внесены ОПН и | Утверждено ВНИИСТом        | Срок введения            |
| ОПТС ВНИИСТа  | " 1 " <u>ИЮНЯ</u> 1983 г.  | в действие               |
|               | и НИПИОРГнефтегазстроем    | " 1 " <u>января</u> 1984 |
|               | " 16 " <u>ИЮНЯ</u> 1983 г. |                          |

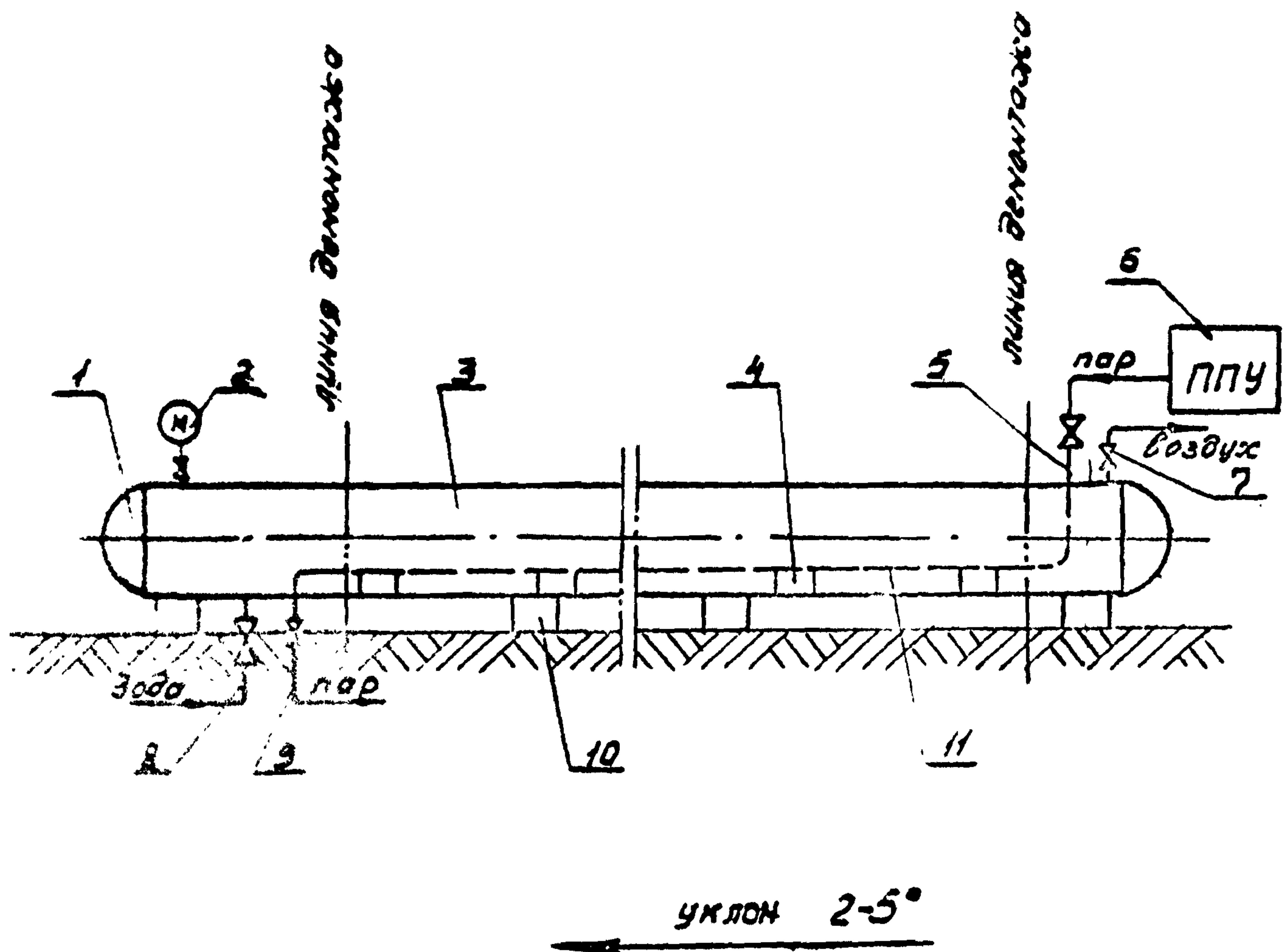


Рис. I. Технологическая схема гидравлического испытания плит переходов в условиях низких температур.

1 - заглушка; 2 - манометр; 3 - испытываемая плита; 4 - подкладка деревянная под трубчатый нагревательный элемент; 5 - входной патрубок с задвижкой для пара; 6 - паропреобразователь; 7 - выпускной патрубок с задвижкой для воздуха; 8 - входной патрубок с задвижкой для воды; 9 - выпускной патрубок с задвижкой для пара; 10 - ложки деревянные; 11 - трубчатый нагревательный элемент.

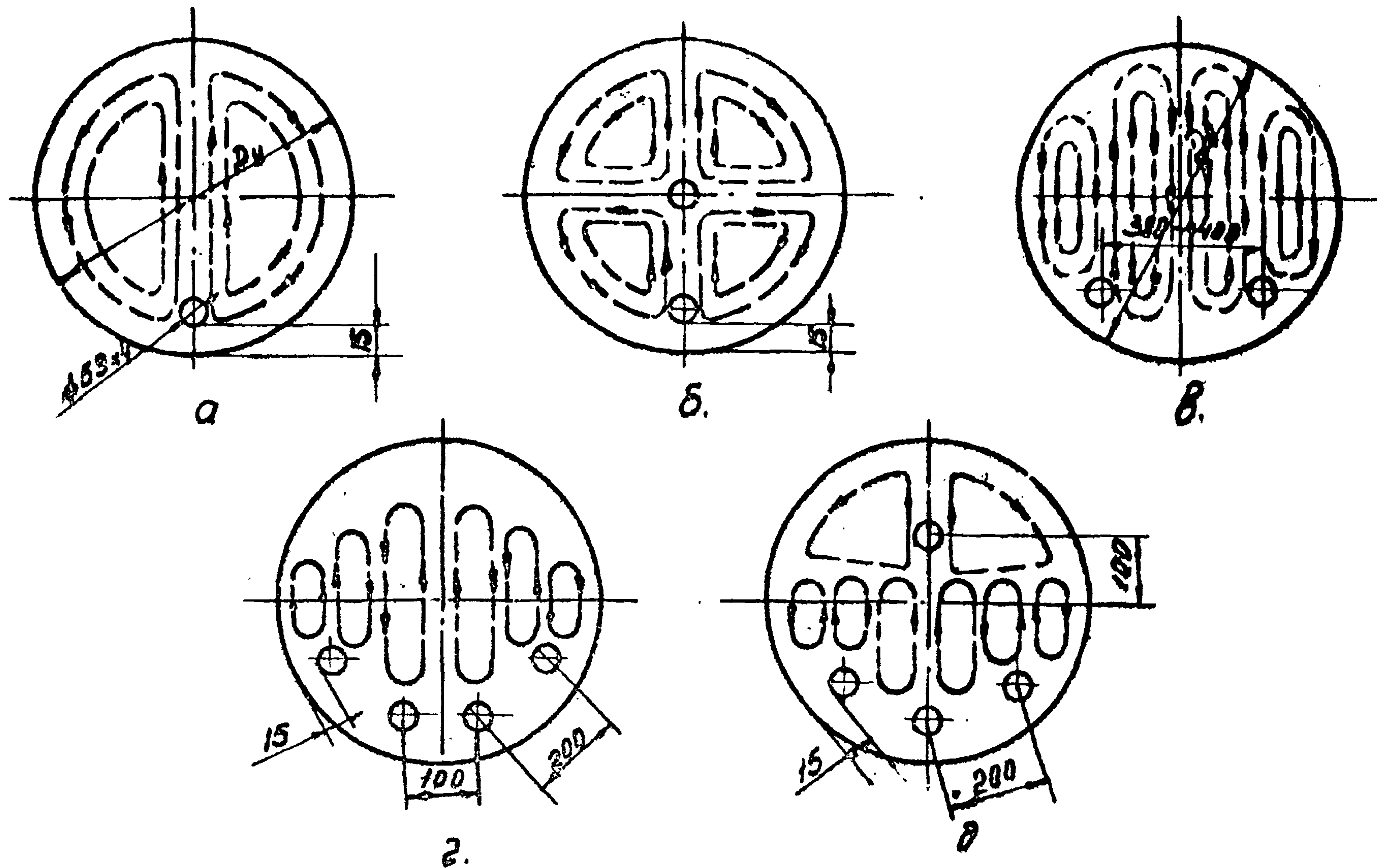


Рис. 2. Варианты расположения в испытываемой плите трубчатых нагревательных элементов. Стрелками с пунктиром показаны циркуляционные токи конвективного движения возд.

а; б и в; г и д — соответственно варианты нагревательных элементов с одной, двумя и четырьмя трубками.

7.

Схема разработана с учетом того, что для предотвращения замораживания воды в испытываемой плети при низких температурах наружного воздуха внутри плети прокладывается трубчатый нагревательный элемент (элементы), по которому пропускается непроход перегретый пар от паропреобразователей.

2.2. Работы по проведению гидравлического испытания плетей в соответствии с указанной выше схемой необходимо выполнять в следующей последовательности:

а) испытываемую плеть 3 монтируют и сваривают из отдельных труб открыто на лежах 10 с уклоном  $2 - 5^\circ$ .

После сварки плети проводят 100%-контроль всех сварных соединений;

б) внутри плети монтируют трубчатый нагревательный элемент, состоящий из одной или нескольких стальных цельнотянутых труб  $59 \times 4$  мм, расположенных в сечении плети в зависимости от числа труб в элементе, как показано на рис. 2. Число труб ( $n$ ) в элементе в зависимости от длины плети ( $L$ ) и температуры наружного воздуха ( $t$ ) определяют по табл. I. Также по табл. I одновременно определяют количество ( $N$ ) паропреобразователей типа Д-563, необходимых для проведения испытаний. Для обеспечения необходимых зазоров (размеры приведены на рис. 2) между внутренней поверхностью плети и трубчатым нагревательным элементом необходимо использовать деревянные подкладки 4 или подставки. Концы нагревательного элемента присоединяют к входному 5 и выпускному 9 патрубкам и задвижкам. Затем на концах плети монтируют, как показано на рис. I, патрубок 8 с задвижкой для подачи в плеть воды, манометр 2 и воздухопускной патрубок 7. После этого к концам подготовленной плети приваривают сферические заглушки и проводят контроль сварных соединений;

в) для проведения испытания к патрубку 8 подключают трубопровод от источника воды (наполнительно-опрессовочный агрегат АНО-201 или другого типа), а к патрубку 5 трубопровод от источника перегретого пара.

Затем при открытых задвижках на патрубках 5 и 9 пропускают по нагревательному элементу пар с выпуском пара на открытый конец в атмосферу.

Одновременно заполняют плеть водой при открытых задвижках на патрубках 8 и 7. В момент, когда из задвижки на патрубке 7 закончится выход воздуха и начнет поступать сплошная струя воды, задвижку на патрубке 7 закрывают и начинают подъем давления в плети для испытания;

г) испытания плети проводят в соответствии с требованиями табл. I7 СНиП III-42-80 и составляют соответствующий акт;

д) сразу после проведения испытаний из плети необходимо полностью слить воду. Для этого давление в плети снижают до атмосферного путем сброса воды через задвижку на патрубке 7. Затем через задвижку на патрубке 8 сливают из плети и после этого прекращают подачу пара; открытие задвижек производится дистанционно;

е) для проведения дальнейших операций по подготовке плети к монтажу ее конечные участки с заглушками и задвижками на переходе следует демонтировать. Демонтаж проводится по линиям, указанным на рис. I.

2.2. Рекомендуемое число труб нагревательного элемента и количества паропреобразователей приведены в табл. I; теплотехнический расчет приведен в прил. I.

Таблица I

| Допустимая<br>$t_{\text{возд}}$ ,<br>°C | Открытый ветру трубопровод |     |     |     |     |     |     |     | Прикрытый от ветра<br>трубопровод |     |     |     |
|-----------------------------------------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------------------|-----|-----|-----|
|                                         | -7                         |     | -14 |     | -20 |     | -40 |     | -20                               |     | -40 |     |
|                                         | $n$                        | $N$ | $n$ | $N$ | $n$ | $N$ | $n$ | $N$ | $n$                               | $N$ | $n$ | $N$ |
| $L$ , м                                 |                            |     |     |     |     |     |     |     |                                   |     |     |     |
| 50                                      | 1                          | 1   | 2   | 1   | 4   | 1   | 4   | 2   | 1                                 | 1   | 2   | 1   |
| 100                                     | 1                          | 1   | 2   | 1   | 4   | 2   | 4   | 3   | 1                                 | 1   | 2   | 1   |
| 150                                     | 1                          | 1   | 2   | 1   | 4   | 3   | 4   | 5   | 1                                 | 1   | 2   | 1   |
| 200                                     | 1                          | 1   | 2   | 2   | 4   | 4   | 4   | 6   | 1                                 | 1   | 2   | 2   |
| 250                                     | 1                          | 1   | 2   | 2   | 4   | 5   | 4   | 7   | 1                                 | 1   | 2   | 2   |
| 300                                     | 1                          | 1   | 2   | 2   | 4   | 6   | 4   | 9   | 1                                 | 1   | 2   | 2   |

$n$  — количество труб нагревательного элемента  $\varnothing 59 \times 4$  мм;

$N$  — количество паропреобразователей Д-563;

$L$  — расчетная длина испытываемой плети.

В таблице приведены данные, рассчитанные для трубопровода диаметром 1220 — 1420 мм.

### III. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

3.1. Работы по гидравлическому испытанию плетей должны проводиться в соответствии с требованиями СНиП III-4-80 "Техника безопасности в строительстве", Правилами устройства и безопасности паровых и водогрейных котлов", "Правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов", "Правилами техники безопасности при строительстве магистральных стальных трубопроводов".

3.2. Проведение гидравлического испытания плетей переходов в условиях низких температур ~~разрешается~~ по технологии, разработанной в данных "Рекомендациях...", разрешается только <sup>на</sup> трубопроводах диаметром не менее 1020 мм с соблюдением следующих требований безопасности:

передвигаться внутри плети можно только на специальной тележке на расстояние не более 36 м от торца;

у торца плети должны постоянно находиться двое страхующих рабочих; между страхующими и работающими внутри трубопровода следует установить сигнальную связь;

освещение внутри трубопровода должно осуществляться от источника питания напряжением не более 12 В.

3.3. Категорически запрещается проведение испытания плетей в непосредственной близости от железных дорог, действующих газопроводов, а также воздушных линий электропередач напряжением 500 кВ и более.

3.4. На период проведения работ непосредственно по испытанию плетей переходов устанавливается охранная зона, из пределов которой до начала работ выводятся все люди, техника.

3.5. Размеры охранной зоны назначаются в зависимости от ~~давления~~ величины давления испытания  $P_{исп}$ . При  $P_{исп} \leq 82,5 \text{ кгс/см}^2$  (8,25 МПа) охранная зона в обе стороны от оси трубы назначается 100 м, а в направлении отрыва заглушки от торца трубопровода - 1000 м. При  $P_{исп}$  свыше  $82,5 \text{ кгс/см}^2$  (8,25 МПа) границы охранной зоны назначаются соответственно 150 м и 1500 м.

3.6. Люди, механизмы и оборудование во время испытания должны находиться за пределами охранной зоны.

3.7. Обнаруженные дефекты плетей подлежат устранению после снижения давления до уровня, обеспечивающего безопасность ведения ремонтных работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП Ш-42-80 "Магистральные трубопроводы. Правила производства и приемки работ". М., Стройиздат, 1981 г.
2. СНиП Ш-4-80 "Техника безопасности в строительстве". М., Стройиздат", 1979 г.
3. Правила устройства и безопасности эксплуатации паровых и водогрейных котлов. М., Недра, 1974 г.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. М., Металлургия, 1976 г.
5. Правила техники безопасности при строительстве магистральных трубопроводов. М., Недра, 1982 г.

# П Р И Л О Ж Е Н И Я

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

При выборе схемы расположения трубчатого нагревательного элемента надо руководствоваться тем, чтобы нагрев воды в трубопроводе компенсировал его теплопотери, был равномерным по всему периметру трубопровода, не допуская локальных образований льда на внутренней его поверхности.

Учитывая, что конвективное движение жидкости развивается лишь в зоне выше нижних образующих поверхностей нагревательного элемента последний следует располагать на небольшом расстоянии ( $\delta_H$ ) от дна горизонтально расположенного с малым наклоном трубопровода.

Внешние условия: температура воздуха  $t_{воз} = - (30 - 40)^\circ\text{C}$ , скорость ветра  $v_B = 20 - 25$  м/с. Для этих параметров эффективный коэффициент теплоотдачи к воздуху  $\alpha_B = 25$  ккал/м<sup>2</sup>·ч·град. В случае установки защитных щитов или тента от ветра над трубопроводом  $\alpha_B$  снижается до значения 8 - 10 ккал/м<sup>2</sup>·ч·град.

Примем в качестве расчетного сечения самое последнее (по ходу течения греющего пара) испытываемой плети трубопровода. Будем исходить из ограничения, чтобы температура воды в самой удаленной точке внутренней поверхности трубопровода данного расчетного сечения имела минимальную температуру  $0^\circ\text{C}$  (без образования льда), а температура греющего пара в трубках снизилась бы в этом сечении до  $100^\circ\text{C}$  (конденсация пара). Таким образом, расчетная температура при выборе значений физических характеристик для вычисления критериев Гроссгоффа  $G_z$  и Прандтля  $Pr$  будет равна  $50^\circ\text{C}$  как средняя в полученном интервале температур.

Выбирая в качестве характеристического размера  $\ell$  среднюю величину толщины зазора между греющей трубкой и наиболее удаленной образующей внутренней полости трубопровода, определяем значения критериев

$$G_z = Ar = \frac{g \cdot \ell^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_0 - \rho}{\rho}; \quad Pr = \frac{\nu}{a},$$

где  $Ar$  - критерий Архимеда;

- $g$  - ускорение свободного падения; м/ч<sup>2</sup>;
- $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости; м<sup>2</sup>/ч;
- $\rho_0, \rho, \bar{\rho}$  - соответственно плотность воды у стенки трубы, у нагревательного элемента и их среднее значение; г/см<sup>3</sup>;
- $a$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/ч.

Находим  $R_{z_{50}} = 3,54$ ,  $A_{z_{50}} = 3,64 \cdot 10^{II}$  при  $\ell = 0,65$  м.

По номограмме из работы\* для произведения  $R_{z_{50}} G_{z_{50}} = 1,2 \cdot 10^{I2}$  находим  $\frac{\lambda_{ж}}{\lambda_B} = 80$ , определяем эквивалентный коэффициент теплопроводности асимметричного кольцевого слоя воды  $\lambda_{ж} = 40$  ккал/м·ч·град принимая коэффициент теплопроводности воды равный

$\lambda_B = 0,52$  ккал/м·ч·град. Тогда термическое сопротивление верхнего слоя воды над нагревательным элементом диаметром 59 мм составит

$$z_B = \frac{2 \cdot \ell}{\lambda_{ж}} = \frac{1 \cdot 1}{40} = 0,0275 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал}$$

Считая, что термическое сопротивление нижнего слоя воды  $z_H = \frac{\delta_H}{\lambda_B}$ , находим из условия  $z_B = z_H$  расстояние от нагревательного элемента до дна трубы  $\delta_H = 0,0144$  м  $\approx 15$  мм.

Поскольку при течении греющего пара будет возможна конденсация его, следовательно, необходимо всю плеть испытываемого трубопровода располагать с некоторым уклоном в сторону движения греющего пара, с тем, чтобы способствовать сдуву конденсата, который является дополнительным термическим сопротивлением. В настоящей работе не учитывалось это дополнительное термическое сопротивление конденсата, а также и радиационная составляющая коэффициента теплоотдачи от греющего пара, считая, что эти два фактора примерно взаимно компенсируются.

В дальнейшем расчет построен таким образом, чтобы определять при данной скорости ветра минимальную температуру наружного воздуха, при которой исключается образование льда в испытываемом трубопроводе.

Расчетная схема термических сопротивлений и соответствующих им температурных перепадов показана на рис. 3. Из подобия треугольников этой схемы находим выражение для допустимой температуры наружного воздуха

$$t_{возд} = - t_K \cdot \frac{z_{нар}}{z_{вн}}, \quad (I)$$

\* Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача, М.; Энергия, 1969.

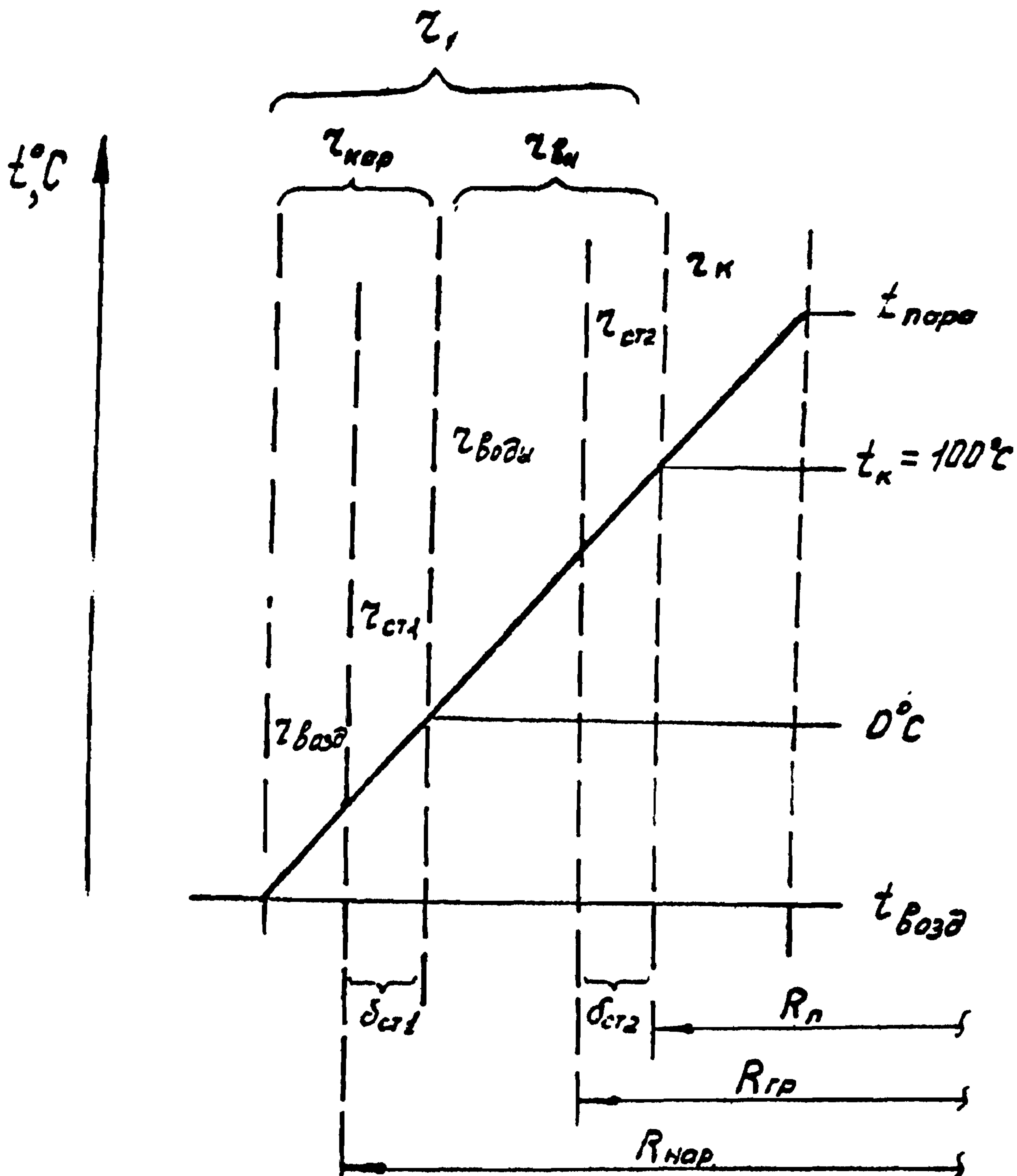


Рис. 3. Расчетная схема термических сопротивлений ( $Z$ ) и соответствующих им температурных перепадов;  $R_n, R_{гр}, R_{нор}$  — радиусы соответственно внутренней и наружной поверхности нагревательного элемента и наружной поверхности трубопровода;  $\delta_{ст1}, \delta_{ст2}$  — толщина стенки элемента и трубопровода.

$$\text{где } \tau_{\text{нар}} = \tau_{\text{возд}} + \tau_{\text{ст}1} = \frac{R_{\text{гр}}}{R_{\text{нар}}} \left( \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_{\text{ст}1}}{\lambda_{\text{ст}}} \right) \quad (2)$$

$$\tau_{\text{вн}} = \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{ст}2} = \tau_{\text{в}} + \frac{\delta_{\text{ст}2}}{\lambda_{\text{ст}}} \quad (3)$$

$\lambda_{\text{ст}}$  — коэффициент теплопроводности стали, принят 40 ккал/м ч град;  
 $\delta_{\text{ст}1}$  и  $\delta_{\text{ст}2}$  — толщины стенок двух труб (см. рис. 3);  
 $R_{\text{гр}}, R_{\text{нар}}$  — условные радиусы наружной поверхности нагревательного элемента и трубопровода;  
 $t_{\text{к}}$  — температура внутренней поверхности нагревательного элемента;  
 $\tau_{\text{возд}}, \tau_{\text{ст}1}, \tau_{\text{ст}2}$  — соответственно удельные термические сопротивления пограничного слоя воздуха, стенки трубы и стенки нагревательного элемента, м<sup>2</sup> ч град/ккал;  
 $\tau_{\text{нар}}$  — сумма термических сопротивлений воздуха и стенки трубы, м<sup>2</sup> ч град/ккал;  
 $\tau_{\text{вн}}$  — сумма термических сопротивлений воды и стенки нагревательного элемента, м<sup>2</sup> ч град/ккал.

Для трубопровода Ду 1220 мм, одного нагревательного трубчатого элемента  $\varnothing 59 \times 4$  мм,  $t_{\text{к}} = 100^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha_{\text{в}} = 25$  ккал/м<sup>2</sup> ч град и  $\tau_{\text{в}} = 0,0275$  м<sup>2</sup> ч град/ккал находим по формуле (1) — (3)

$\tau_{\text{нар}} = 0,002$  м<sup>2</sup> ч град/ккал,  $\tau_{\text{вн}} = 0,028$  м<sup>2</sup> ч град/ккал и  $t_{\text{возд}} = -7,1^{\circ}\text{C}$ .

При установке защитных щитов или тента от ветра над трубой допустимая температура воздуха, согласно (1) — (3) составит  $t_{\text{возд}} = -(17,5 - 22,2)^{\circ}\text{C}$ . Однако в реальных условиях температура воздуха ~~ниже~~ бывает гораздо ниже, поэтому одного нагревательного элемента часто бывает недостаточным. При установке двух, трех или четырех элементов по дну горизонтально расположенного трубопровода характеристический размер  $\ell$  определяем уменьшенным размером в то же число раз. Аналогичные вычисления по формулам (1) — (3) дают результаты для допустимой отрицательной температуры воздуха  $t_{\text{возд}}$ , приведенные в табл. I.

Греющий пар предложено генерировать с помощью выпускаемого отечественной промышленностью паропреобразователя Д-563 производительностью 750 кг/ч пара при  $t_{\text{н}} = 150^{\circ}\text{C}$  и давлении 4,7 кгс/см<sup>2</sup>, что соответствует общему теплотоклу  $Q = 4,1 \cdot 10^5$  ккал/ч (наиболее распространенный режим работы паропреобразователя).

Без учета величины удельного термического сопротивления пограничного слоя конденсируемого пара  $\gamma_k$ , удельный поток тепла на неперекрывтый трубопровод составит:

при одном трубчатом нагревательном элементе

$$q = \frac{\bar{\Delta t} - t_{возд}}{\gamma_{нар} + \gamma_{н}} = \frac{125 + 7}{0,002 + 0,028} = 4400 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$$

где  $\bar{\Delta t} = \frac{t_p + t_k}{2}$  — средняя температура пара,  $^{\circ}\text{C}$ .

При двух нагревательных элементах

$$(t_{возд} = -14^{\circ}\text{C})$$

$$q = \frac{\bar{\Delta t} - t_{возд}}{\gamma_{нар} + 0,5\gamma_{н}} = \frac{125 + 14}{0,002 + 0,014} = 8700 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$$

При четырех нагревательных элементах

$$(t_{возд} = -40^{\circ}\text{C})$$

$$q = \frac{\bar{\Delta t} - t_{возд}}{\gamma_{нар} + 0,25\gamma_{н}} = \frac{125 + 40}{0,002 + 0,007} = 18300 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$$

Для прикрытого щитами или тентом трубопровода Ду 1220 мм возрастает значение термического сопротивления  $\gamma_{нар}$ , появляется возможность испытания плетей трубопровода при более низких температурах воздуха.

Значение удельного теплового потока при одном нагревательном элементе ( $t_{возд} = -20^{\circ}\text{C}$ )

$$q = \frac{\bar{\Delta t} - t_{возд}}{\frac{\gamma_{нар}}{3} + \gamma_{н}} = \frac{125 + 20}{0,06 + 0,028} = 4300 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$$

При двух нагревательных элементах ( $t_{возд} = -40^{\circ}\text{C}$ )

$$q = \frac{\bar{\Delta t} - t_{возд}}{\frac{\gamma_{нар}}{3} + \frac{\gamma_{н}}{2}} = \frac{125 + 40}{0,006 + 0,014} = 8300 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$$

Максимально допустимая длина  $L$  плети испытываемого трубопровода в зависимости от числа  $n$  труб нагревательного элемента и количества  $N$  паропреобразователей определяется по формуле

$$L = \frac{QN}{nqF} = \frac{QN(\gamma_{н} + \gamma_{нар})}{nF(\bar{\Delta t} - t_{возд})}, \quad (4)$$

где  $F$  — внутренняя поверхность теплосъема одного метра длины нагревательного элемента; для  $\varnothing 59 \times 4$ ,  $F = 0,16 \text{ м}^2/\text{м}$ .