

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
ГЛАВНИИПРОЕКТ

ВСЕСОЮЗНЫЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ  
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

**УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ СИСТЕМ ОБОГРЕВА  
ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

**ВСН 029-70**  
**Минэнерго СССР**

«ЭНЕРГИЯ»  
Ленинградское отделение  
1971

СОДЕРЖАНИЕ

[Введение](#)

- [1. Назначение и область применения «Указаний»](#)
- [2. Обозначения и численные значения основных коэффициентов](#)
- [3. Принятая терминология](#)
- [4. Основные положения борьбы с обмерзанием](#)
- [5. Расчет обогрева сороудерживающих решеток](#)
- [6. Расчет обогрева затворов](#)
- [7. Расчет обогрева закладных частей](#)

[Приложения](#)

ВВЕДЕНИЕ

Обогрев является основным средством борьбы с обмерзанием сороудерживающих решеток, затворов и их закладных частей. История развития методов обогрева в то же время есть история развития наших знаний по физике ледообразования и по преодолению ряда ошибочных представлений. Так, вначале полагали, что для защиты решеток от обмерзания надо обогревать весь поток воды, затем стали обогревать решетки равномерно по всей поверхности и, наконец, было установлено, что для поддержания на поверхности стержней решеток одинаковой температуры тепло должно подводиться дифференцированно. Серьезным препятствием для рационального проектирования обогрева решеток явилось длительно существовавшее ошибочное представление о том, что сварные швы во много раз увеличивают электрическое сопротивление решетки.

Одновременно с ходом познания физики ледообразования и вытекавшими отсюда изменениями принципов использования тепла для борьбы с обмерзанием шло интенсивное развитие технических средств осуществления обогрева и совершенствовались конструктивные решения. В результате в настоящее время существуют разнообразные системы обогрева - пропускание электрического тока непосредственно через стержни решеток и закладные части, закладка нагревательных элементов внутрь обогреваемых элементов, индукционные, маслообогрев (масло служит теплоносителем) и др.

Очевидно, что число тепловых задач, которые могут возникнуть при разработке различных систем, весьма велико. Поэтому в «Указаниях» даны лишь решения для наиболее часто встреча-

ющихся случаев и даны методические советы, облегчающие решение возможных других задач. Облегчению использования «Указаний» должны также служить материалы приложения и расчетные графики.

Настоящие «Указания» являются итогом многолетних исследований, которые выполнялись во ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева в лаборатории зимнего режима рек и водохранилищ ст. научн. сотр. А. И. Пеховичем и заведующим группой С. М. Алейниковым совместно с СКБ Ленгидросталь и утверждены Главтехстройпроектом Минэнерго СССР в 1970 г.

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР	ВЕДОМСТВЕННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ	ВСН 029-70
	<b>Указания по расчету систем обогрева элементов гидромеханического оборудования гидротехнических сооружений</b>	МИНЭНЕРГО СССР

Внесены Всесоюзным научно-исследовательским институтом гидротехники имени Б. Е. Веденеева	Утверждены Главтехстройпроектом Минэнерго СССР 23 января 1970 г.	Срок введения II квартал 1970 г.
--	---	-------------------------------------

## 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ «УКАЗАНИЙ»

1.1. Указания предназначены для выполнения тепловых расчетов систем обогрева элементов гидромеханического оборудования ГЭС. В «Указаниях» дается методика тепловых расчетов обогрева сороудерживающих решеток, затворов и закладных частей с учетом существующих способов обогрева (маслообогрев, электрообогрев с непосредственным пропусканием тока, индукционный электрообогрев).

1.2. Область применения «Указаний» - вновь проектируемые системы обогрева элементов гидромеханического оборудования ГЭС, а также различные системы обогрева, применяемые для борьбы с обледенением в других областях техники.

## 2. ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

$\theta$  - температура атмосферного воздуха, °С;

$t_{в}$  - температура воды, °С;

$t_{л.ср.}$  - начальная средняя температура льда, °С;

$t_{о}$  - начальная температура масла, трубы и бетона, °С;

$t_{x=0}$  - заданная положительная температура поверхности щита, °С;

$T$  - температура воздуха в межщитовом пространстве, °С;

$t_{A}$  - температура в заданной точке А, °С;

$t_{тр}$  - температура стенки трубы, °С;

$t_{тр}^{max}$  - максимальная температура стенки трубы, °С;

$t_{м}$  - температура масла, °С;

$\lambda_{м}$  - коэффициент теплопроводности масла, ккал/м·ч·град;

$\lambda_{ст}$  - коэффициент теплопроводности стали, ккал/м·ч·град;

$\lambda_{л}$  - коэффициент теплопроводности льда, ккал/м·ч·град;

$\lambda_{из}$  - коэффициент теплопроводности теплоизоляции, ккал/м·ч·град;

$\lambda_{б}$  - коэффициент теплопроводности бетона, ккал/м·ч·град;

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от бетона к воздуху, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;

$\alpha_{м}$  - коэффициент теплоотдачи от масла к стенке трубы, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;

$\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи от поверхности теплоизоляционной обшивки в атмосферу,

$\alpha_2$  - коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности теплоизоляционной обшивки к воздуху в межщитовом пространстве, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  
 $\alpha_3$  - коэффициент теплоотдачи от металлической обшивки к воде, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  
 $\alpha_4$  - коэффициент теплоотдачи от металлической обшивки в атмосферу, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  
 $\alpha_5$  - коэффициент теплоотдачи от поверхности льда в атмосферу, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  
 $\alpha_{\text{ср}}$  - среднее значение коэффициента теплоотдачи от поверхности стержня решетки к воде, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  
 $\alpha_x$  - местное значение коэффициента теплоотдачи от поверхности стержня решетки к воде, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  
 $\alpha_v$  - коэффициент теплоотдачи от стержня решетки к воздуху, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  
 $\alpha_n$  - коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности трубы к воздуху, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  
 $\alpha_{\text{макс}}$  - максимальное местное (локальное) значение коэффициента теплоотдачи от поверхности стержня решетки к воде, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  
 $\gamma_l$  - удельный вес льда, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\gamma_m$  - удельный вес масла, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\gamma_{\text{ст}}$  - удельный вес стали, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\gamma_b$  - удельный вес бетона, кг/м<sup>3</sup>;  
 $k$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/ч;  
 $\rho$  - скрытая теплота ледообразования, ккал/кг;  
 $\gamma_m$  - коэффициент кинематической вязкости масла, см<sup>2</sup>/сек или м<sup>2</sup>/час;  
 $c_m$  - теплоемкость трансформаторного масла, ккал/кг·град;  
 $c_{\text{ст}}$  - теплоемкость стали, ккал/кг·град;  
 $c_b$  - теплоемкость бетона, ккал/кг·град;  
 $c_l$  - теплоемкость льда, ккал/кг·град;  
 $v$  - скорость воды, м/сек;  
 $Q$  - расход воды, м<sup>3</sup>/сек;  
 $w$  - скорость ветра, м/сек;  
 $v_m$  - скорость течения масла в трубах, м/сек;  
 $d_{\text{вн}}, d_n$  - внутренний и наружный диаметры трубы, м;  
 $r_n$  - наружный радиус трубы, м;  
 $\delta_{\text{из}}$  - толщина теплоизоляционного слоя, м;  
 $h_{\text{из}}$  - толщина слоя теплоизоляции, м;  
 $\delta_0$  - толщина льда, м;  
 $\delta_{\text{ст}}$  - толщина металлической обшивки, м;  
 $\delta_x$  - толщина теплоизоляционного слоя до точки  $x$ , м;  
 $d_{\text{из}}$  - наружный диаметр трубы с изоляцией, м;  
 $\varepsilon$  - коэффициент полезного действия;  
 $\varepsilon_{\text{ср}}$  - среднее значение коэффициента полезного действия;  
 $f$  - площадь поперечного сечения стержня, м<sup>2</sup>;  
 $S$  - периметр поперечного сечения стержня, м;  
 $l_c$  - длина части стержня, выступающей из воды, м;  
 $F$  - площадь обогреваемой поверхности решетки, м<sup>2</sup>;  
 $d$  - диаметр стержня (оголовка), м;  
 $S_p$  - площадь живого сечения решетки, м<sup>2</sup>;  
 $x$  - расстояние от лобовой точки стержня до рассматриваемой точки поверхности стержня, м;  
 $\delta_b$  - заданная толщина теплоизоляции в кормовой части стержня, м;  
 $\tau$  - заданное время, ч;  
 $\tau_1'$  - время на разогрев масла и трубы, ч;  
 $V_m'$  - объем масла в трубах, м<sup>3</sup>;  
 $V_{\text{наг}}$  - объем масла в нагревателе, м<sup>3</sup>;  
 $V_m$  - суммарный объем масла, м<sup>3</sup>;  
 $V_{\text{тр}}$  - объем металла труб, м<sup>3</sup>;  
 $l$  - длина труб, м;

$n$  - количество задвижек;  
 $L$  - эквивалентная длина магистральных труб, м;  
 $n_1$  - число пар фланцев;  
 $Q_{\text{маг}}$  - суммарные тепловые потери в магистральных трубах, ккал/ч;  
 $Q_{\text{фл}}$  - тепловые потери во фланцах, ккал/ч;  
 $Q_{\text{наг}}, N_{\text{наг}}$  - мощность нагревателя масла, ккал/ч; кВт;  
 $q_{\text{маг}}$  - тепловые потери с 1 пог. м магистрали, ккал/м·ч;  
 $q''$  - мощность погонного метра трубы, ккал/м·ч;  
 $R_1$  - термическое сопротивление между нагревателем и атмосферой, м<sup>2</sup>·ч·град/ккал;  
 $R_2$  - термическое сопротивление между нагревателем и водой, омывающей щит, м<sup>2</sup>·ч·град/ккал;  
 $R_3$  - термическое сопротивление с учетом льда, м<sup>2</sup>·ч·град/ккал;  
 $R_4$  - термическое сопротивление между нагревателем и поверхностью щита, м<sup>2</sup>·ч·град/ккал;  
 $q$  - суммарный тепловой поток, ккал/м·ч;  
 $q_{\text{л}}$  - тепловой поток, идущий ко льду, ккал/м·ч;  
 $q_{\text{с}}$  - тепловой поток, идущий в бетон, ккал/м·ч;  
 $\rho$  - мощность на единицу поверхности, кВт/м<sup>2</sup>;  
 Коэффициент теплопроводности бетона  $\lambda_{\text{б}} = 1,83$  ккал/м·ч·град;  
 Удельная теплоемкость бетона  $c_{\text{б}} = 0,2$  ккал/кг·град;  
 Удельный вес бетона  $\gamma_{\text{б}} = 2200$  кг/м<sup>3</sup>;  
 Коэффициент теплопроводности стали  $\lambda_{\text{ст}} = 40$  ккал/м·ч·град;  
 Удельная теплоемкость стали  $c_{\text{ст}} = 0,11$  ккал/кг·град;  
 Удельный вес стали  $\gamma_{\text{ст}} = 7850$  кг/м<sup>3</sup>;  
 Коэффициент теплопроводности трансформаторного масла  $\lambda_{\text{м}} = 0,10$  ккал/м·ч·град;  
 Удельная теплоемкость трансформаторного масла  $c_{\text{м}} = 0,5$  ккал/кг·град;  
 Удельный вес трансформаторного масла  $\gamma_{\text{м}} = 900$  кг/м<sup>3</sup>;  
 Коэффициент теплопроводности льда  $\lambda_{\text{л}} = 1,95$  ккал/м·ч·град;  
 Удельная теплоемкость льда  $c_{\text{л}} = 0,54$  ккал/кг·град;  
 Удельный вес льда  $\gamma_{\text{л}} = 920$  кг/м<sup>3</sup>;  
 Теплота плавления льда  $\rho = 80$  ккал/кг;  
 $Re$  - критерии Рейнольдса,  $Re = vd / \nu$ ;  
 $F_o$  - критерий Фурье,  $F_o = k\tau / l^2$ ;  
 $Pr$  - критерий Прандтля,  $Pr = \nu / k$ ;  
 $Nu$  - критерий Нуссельта,  $Nu = \alpha l / k$ ;  
 $Gr$  - критерии Грасгофа,  $Gr = \beta g l^3 \Delta t$ .

### 3. ПРИНЯТАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

3.1. *Зимний режим* - совокупность процессов и явлений, имеющих место на водном объекте в зимний период. Зимний период - период с момента появления на водном объекте первых ледяных образований до момента их полного исчезновения.

3.2. *Поверхностный лед* - лед, образующийся на поверхности водоемов и водотоков, а также на поверхности затворов, ворот шлюзов и т. д., при отводе скрытой теплоты ледообразования от границы ледообразования через лед в атмосферу.

3.3. *Внутриводный лед* - лед, образующийся и переохлажденной воде при отводе скрытой теплоты ледообразования в переохлажденную воду.

3.4. *Донный лед* - внутриводный лед, образующийся на поверхности тел, погруженных в переохлажденную воду.

3.5. *Шуга* - находящийся в глубине потока или всплывший на поверхность, внутриводный лед в виде отдельных зерен и их скоплений, комьев, венков; может находиться в состоянии движения (шугоход) или в виде скоплений; массы шуги, сужающие живое сечение водотока, создают зажор.

3.6. *Граничные условия* - тепловые условия на границах тела; складываются из внешних источников тепла и условий теплообмена между источниками и поверхностью тела.

- 3.7. *Граничные условия I рода* - задана температура поверхности тела.
- 3.8. *Граничные условия II рода* - задана интенсивность теплового потока извне в тело.
- 3.9. *Граничные условия III рода* - заданы температура среды, окружающей тело, и коэффициент теплоотдачи между средой и поверхностью тела.
- 3.10. *Начальное условие* - температурное поле в теле в какой-либо момент времени; дальнейший отсчет времени ведется от этого начального момента.
- 3.11. *Неустановившийся (нестационарный) тепловой режим* - режим, при котором температура тела меняется во времени. Неустановившийся режим может быть:
- иррегулярным - температурная функция является сложной относительно времени и координат и существенно зависит от начального распределения температуры;
  - регулярным - температурная функция относительно простая и не зависит от начального распределения температуры;
  - квазиустановившимся - значения температурной функции периодически повторяются или остаются неизменными относительно движущегося источника тепла.
- 3.12. *Установившийся (стационарный) тепловой режим* - режим, при котором температура тела во времени неизменна. Установившийся режим может быть:
- равновесным - температура тела во всех точках постоянна и одинакова;
  - неравновесным - температура в каждой точке тела постоянна, но эти температуры не одинаковы.

#### 4. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ БОРЬБЫ С ОБМЕРЗАНИЕМ

4.1. Основным условием, определяющим появление того или иного рода льда, является направление теплового потока от границы ледообразования (рис. 1). Когда тепловой поток от границы замерзания идет через лед, образуется поверхностный лед; в случае, когда тепло от границы замерзания отводится в воду, образуется внутриводный лед (табл. 1).

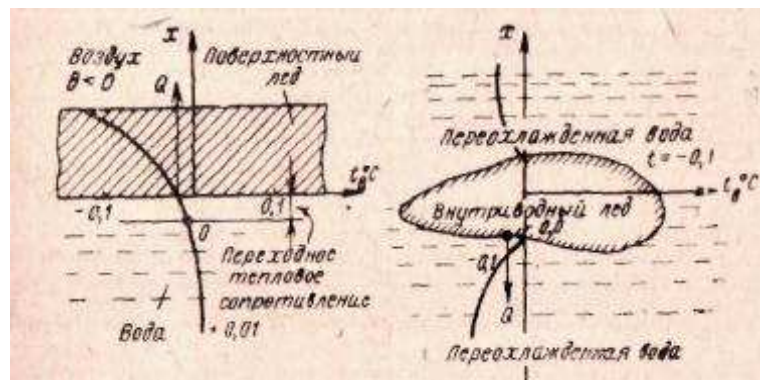


Рис. 1. Схема образования поверхностного и внутриводного льда.

4.2. Следует различать два вида ледовых затруднений:

а) *от внутриводного льда:*

- механическая забивка приплывающими к решетке комками шуги;
- прилипание к стержням решетки частичек шуги, приплывающих к решетке;
- образование донного льда на стержнях решетки за счет кристаллизации переохлажденной воды;

Таблица 1

Термические условия	Условия образования	
	поверхностного льда	внутриводного льда

Температура воды в водотоке, °С	$\geq 0^{\circ}\text{C}$	$< 0^{\circ}\text{C}$
Температура льда, °С	$< 0^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$
Направление теплового потока от поверхности кристаллизации	в лед	в воду

б) *от поверхностного льда:*

- механическая забивка приплывающими к решетке кусками ледяного покрова;
- нарастание поверхностного льда на стержнях решетки, неполностью погруженной в воду;
- нарастание поверхностного льда на щите затвора с напорной стороны;
- нарастание поверхностного льда на закладных частях и примыкающих к ним поверхностях сооружения с напорной стороны и со стороны нижнего бьефа.

4.3. Обогрев не может предохранить решетку от механической забивки кусками поверхностного льда или комками внутриводного льда. Что касается предотвращения образования на стержнях поверхностного льда, то для этого надо погрузить решетку полностью в воду или же утеплять выступающую из воды часть решетки таким образом, чтобы ее температура была не ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . Обмерзание стержней в результате неполного погружения решетки в воду в большинстве случаев очень слабо выражено и не представляет опасности. Обогрев может защитить решетку лишь от прилипания частичек шуги к стержням и от образования на них донного льда. При этом достаточно поддерживать на поверхности стержней температуру немного выше нуля.

Из перечисленных видов ледовых затруднений на решетках наиболее распространенными являются затруднения от внутриводного льда, для предотвращения которых обогрев является эффективным средством.

4.4. В сроки, установленные местной инструкцией, должны производиться наблюдения за:

- фильтрацией воды через затворы и их обледенением;
- воздействием льда на сооружения и их обледенением;
- действенностью обогрева (сопоставление с необогреваемыми затворами).

Результаты осмотров и наблюдений записываются в журнал, который ведется отдельно для каждого сооружения. При обнаружении ненормальных явлений в сооружениях должны быть установлены причины их появления и приняты меры к устранению дефектов.

## **5. РАСЧЕТ ОБОГРЕВА СОРОУДЕРЖИВАЮЩИХ РЕШЕТОК**

### **Основные положения**

5.1. Обогрев является надежным средством предотвращения кристаллизации переохлажденной воды на стержнях решеток, а также прилипания к ним плавучей в потоке шуги. Обогрев не может предохранить решетку от механической забивки ее кусками поверхностного или комками внутриводного льда.

5.2. Обогрев не может приостановить начавшийся процесс обмерзания решетки внутриводным льдом, поэтому включение обогрева должно осуществляться заблаговременно, до начала переохлаждения воды (в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей»). Основное правило, которому должен удовлетворять обогрев, состоит в том, что все части поверхности решетки, которые подлежат защите от обмерзания, должны иметь температуру несколько более высокую, чем температура таяния льда.

### **Тепловой расчет мощности при равномерном способе обогрева**

5.3. При равномерном способе обогрева тепло подводится с одинаковой интенсивностью к различным участкам поверхности стержней решетки (например обогрев, осуществляемый пропусканием электрического тока непосредственно по стержням решетки).

5.4. Мощность, достаточная для предотвращения обмерзания стержней или других элементов решетки произвольного поперечного сечения, равна

$$p = 0,00116 \tau_{\text{макс}} (0,01 - t_n), \text{ кВт/м}^2, \quad (5.1)$$

$t_n$  - температура переохлажденной воды, град; 0,01- температура поверхности стержня в точке, где коэффициент теплоотдачи к воде имеет максимальное значение (как правило в лобовой части), град; 0,00116 - коэффициент перехода от ккал/ч к квт.

5.5. Температура переохлаждения воды  $t_n$  в случае отсутствия данных натурных, наблюдений принимается в расчет по эмпирическим данным:

а) на реках с большими глубинами и малыми скоростями течения на участке расположения водоприемника

$$t_n = - 0,04 \div - 0,05^\circ\text{C};$$

б) на реках с малой глубиной воды и большими скоростями течения

$$t_n = - 0,06 \div - 0,08^\circ\text{C}.$$

При наличии данных натурных наблюдений в расчет принимается наиболее низкое значение температуры переохлаждения воды  $t_n$ .

5.6. Величина среднего значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{ср}}$  для стержней прямоугольного сечения определяется из критериального уравнения

$$\text{Nu} = 0,0356 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \quad (5.2)$$

и для воды нулевой температуры с учетом наличия шуги в потоке (что увеличивает значение  $\alpha_{\text{ср}}$  в среднем на 10%) выражается зависимостью

$$\alpha_{\text{ср}} = 2000 v^{0,8} / b^{0,2}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}, \quad (5.3)$$

где  $v$  - скорость воды в решетке, м/сек;  $b$  - ширина стержня, м.

5.7. Скорость воды в решетке  $v$  определяется из соотношения

$$\begin{aligned} \text{где} \quad v &= 1,5 v_{\text{ср}}, \text{ м/сек}, \\ v_{\text{ср}} &= \frac{Q}{S_p}, \text{ м/сек}. \end{aligned}$$

5.8. Местное значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  для стержней прямоугольного сечения (с учетом того, что  $\alpha_{\text{ср}} = \frac{1}{b} \int_0^b \alpha_x dx$ ) будет равно

$$\alpha_x = 1672 v^{0,8} / x^{0,2}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

За расчетную величину максимального местного значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{макс}}$  для стержней прямоугольного сечения принимается его величина в точке непосредственно у лобовой части стержня ( $x = 0,001$  м):

$$\alpha_{\text{макс}} = 6670 v^{0,8}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}. \quad (5.4)$$

5.9. Мощность, достаточная для предотвращения обмерзания стержней прямоугольного сечения (с учетом 5.1 и 5.4), будет равна

$$p = 7,7 v^{0,8} (0,01 - t_n), \text{ квт/м}^2. \quad (5.5)$$

5.10. Величина среднего значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{ср}}$  для стержней круглого сечения и для стержней других сечений с полукруглым оголовком определяется из критериального уравнения

$$Nu = 0,226Re^{0,6} Pr^{0,4} \quad (5.6)$$

и для воды нулевой температуры с учетом наличия шуги в потоке выражается зависимостью

$$\alpha_{\text{ср}} = 946v^{0,6} d^{0,4}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град.} \quad (5.7)$$

5.11. За расчетную величину максимального местного значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{макс}}$  для стержней круглого сечения принимается его величина в лобовой точке стержня (которая превышает среднее значение коэффициента теплоотдачи на 80%):

$$\alpha_{\text{макс}} = 1703v^{0,6} d^{0,4}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град.} \quad (5.8)$$

5.12. Мощность, достаточная для предотвращения обмерзания стержней круглого сечения (с учетом 5.1, 5.8), будет равна

$$p = 2 \frac{v^{0,6}}{d^{0,4}} (0,01 - t_a), \text{ квт/м}^2, \quad (5.9)$$

### Тепловой расчет мощности при дифференцированном обогреве

5.13. При дифференцированном способе обогрева тепло подводится к различным участкам поверхности с различной интенсивностью, обеспечивающей поддержание на всех участках поверхности одинаковой температуры (+ 0,01° C).

5.14. Мощность, достаточная для предотвращения обмерзания стержней (или других элементов) решеток произвольного поперечного сечения, равна

$$p = 0,00116z_{\text{ср}} (0,01 - t_a), \text{ квт/м}^2, \quad (5.10)$$

5.15. Мощность, достаточная для предотвращения обмерзания стержней прямоугольного сечения (с учетом 5.3 и 5.10), будет равна

$$p = 2,4 \frac{v^{0,8}}{b^{0,2}} (0,01 - t_a), \text{ квт/м}^2, \quad (5.11)$$

5.16. Мощность, достаточная для предотвращения обмерзания стержней круглого сечения (с учетом 5.7 и 5.10), будет равна

$$p = 1,1 \frac{v^{0,6}}{d^{0,4}} (0,01 - t_a), \text{ квт/м}^2, \quad (5.12)$$

5.17. Одним из возможных способов осуществления дифференцированного обогрева может служить покрытие стержней теплоизоляцией переменной толщины. Распределение толщины теплоизоляционного покрытия стержней прямоугольного сечения описывается уравнением

$$\delta_x = \delta_b (x/b)^{0,2}, \quad (5.13)$$

где  $\delta_b > 20 \frac{t_{\text{нз}}}{\alpha_b}$ , м.



### Тепловой расчет мощности при лобовом обогреве

5.18. При лобовом обогреве тепло подводится лишь к лобовой части стержня с интенсивностью, обеспечивающей на ее поверхности заданную температуру (+ 0,01° С). Расчет необходимой мощности выполняется по формулам для равномерного обогрева. Отличие состоит лишь в том, что мощность определяется на единицу обогреваемой части поверхности стержней.

5.19. В расчетные уравнения вводится коэффициент  $\eta$ , учитывающий потерю части тепла, отводимого от решетки, через необогреваемые участки поверхности стержней. Величина  $\eta$  находится в пределах 0,85 - 0,95.

5.20. Мощность, обеспечивающая поддержание температуры +0,01°С в лобовой части стержня прямоугольного сечения, будет равна

$$P = 7,7 \frac{v^{0,8}}{\eta} (0,01 - t_a), \text{ кват/м}^2. \quad (5.14)$$

5.21. Мощность, обеспечивающая поддержание температуры +0,01°С лобовой части стержня круглого сечения, будет равна

$$P = 2 \frac{v^{0,8}}{d^{0,4} \eta} (0,01 - t_a), \text{ кват/м}^2. \quad (5.15)$$

### Коэффициент запаса мощности обогрева

5.22. При назначении проектной мощности обогрева рекомендуется увеличивать ее расчетное значение на 30 - 50% (коэффициент запаса  $k = 1,3 - 1,5$ ).

### Обмерзание неполностью погруженных в воду решеток

5.23. Если решетка неполностью погружена в воду, то величина теплового потока, отводимого из воды в воздух (в период, когда температура воздуха ниже температуры воды), будет равна

$$Q = (t_w - \theta) \lambda_{эф} m th (ml_c), \text{ ккал/ч.} \quad (5.16)$$

где  $m = \sqrt{\frac{\alpha_в S}{\lambda_{см} f}}$ , 1/м;  $th$  - гиперболический тангенс (приложение I).

Для стержней прямоугольного сечения

$$\alpha_в = 5,3 \frac{w^{0,8}}{b^{0,2}}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}; \quad (5.17)$$

для стержней круглого сечения

$$\alpha_в = 3,2 \frac{w^{0,8}}{d^{0,4}}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}. \quad (5.18)$$

5.24. Количество льда, образующегося на стержне (в воде) при тепловом потоке, проходящем от воды в воздух, будет равно

$$V_л = \frac{Q}{\rho \gamma_л}, \text{ м}^3/\text{ч.} \quad (5.19)$$

5.25. Выступающая из воды часть стержня будет нагрета до 0°С при условии

$$p > 0,00116 \sigma_{\text{н}} (-\theta), \text{ кВт/м}^2. \quad (5.20)$$

### Пример теплового расчета обогрева решеток

И с х о д н ы е д а н н ы е. Стержни прямоугольного сечения 10 x 100 мм; высота стержня 10 м; число стержней в решетке 30; скорость воды в решетке  $v = 1,5$  м/сек; температура переохлаждения воды  $t_{\text{в}} = -0,10^\circ\text{C}$ ; температура воздуха  $\theta = -30^\circ\text{C}$ ; скорость ветра  $w = 3$  м/сек.

**Расчет.** Потребная мощность на единицу поверхности стержней при равномерном обогреве

$$p = 7,7 \cdot v^{0,8} (0,01 - t_{\text{в}}) = 7,7 \cdot 1,5^{0,8} \cdot 0,11 = 1,17 \text{ кВт/м}^2;$$

При коэффициенте запаса  $k = 1,3$

$$p_{\text{пр}} = 1,3 \cdot 1,17 = 1,52 \text{ кВт/м}^2.$$

Площадь обогреваемой поверхности решетки равна

$$F = 30 \cdot 10 \cdot 2(0,01 + 0,1) = 66 \text{ м}^2$$

Расходуемая мощность на решетку

$$N = 1,52 \cdot 66 = 100,3 \text{ кВт.}$$

Потребная мощность на единицу поверхности стержней при дифференцированном обогреве

$$p = 2,4 \frac{v^{0,8}}{b^{0,2}} (0,01 - t_{\text{в}}) = 2,4 \frac{1,5^{0,8}}{0,10^{0,2}} 0,11 = 0,58 \text{ кВт/м}^2$$

При коэффициенте запаса  $k = 1,3$

$$p_{\text{пр}} = 1,3 \cdot 0,58 = 0,75 \text{ кВт/м}^2$$

Расходуемая мощность на решетку

$$N = 0,75 \cdot 66 = 49,5 \text{ кВт.}$$

Как видно, при дифференцированном обогреве потребная мощность в два раза меньше, чем при равномерном обогреве.

Потребная мощность на единицу поверхности стержней при лобовом обогреве

$$p = 7,7 \frac{v^{0,8}}{\gamma} (0,01 - t_{\text{в}}) = 7,7 \frac{1,5^{0,8}}{0,9} 0,11 = 1,3 \text{ кВт/м}^2.$$

При коэффициенте запаса  $k = 1,3$

$$p_{\text{пр}} = 1,3 \cdot 1,3 = 1,69 \text{ кВт/м}^2.$$

Расходуемая мощность на решетку при обогреве лобовых частей стержней (по периметру каждого стержня 0,05 м)

$$N = 1,69 \cdot 30 \cdot 10 \cdot 0,05 = 25,4 \text{ кВт.}$$

При лобовом обогреве удастся достигнуть еще меньшего расхода мощности.

Рассмотрим, что произойдет, если стержни решетки будут выступать из воды на 0,5 м ( $l_c = 0,5$  м). Найдем  $\alpha_{\text{в}}$ ,  $m$ ,  $ml_c$ ,  $th(ml_c)$ :

$$\alpha_B = 5,3 \frac{w^{0,8}}{b^{0,2}} = 5,3 \frac{3^{0,8}}{0,1^{0,2}} = 20,2 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град};$$

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_B S}{\lambda_{ст} J}} = \sqrt{\frac{20,2 \cdot 0,22}{40 \cdot 0,001}} = 10,5 \text{ 1/м};$$

$$\text{th}(ml_c) = \text{th}(10,5 \cdot 0,5) = \text{th} 5,25 = 1;$$

$$Q = (t_a - \theta) \lambda_{ст} f m \text{th}(ml_c) = (-0,1 + 30) \cdot 40 \cdot 0,001 \cdot 10,5 = 12,6 \text{ ккал/ч.}$$

Количество льда, которое образуется на стержнях, вследствие проникновения холодного воздуха по стержням (при отсутствии обогрева), будет равно

$$V_{\text{л}} = \frac{Q}{\rho \gamma_{\text{л}}} = \frac{12,6}{80 \cdot 920} = 0,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Включение обогрева мощностью не менее  $p = 0,00116 \cdot 20,2 \cdot 30 = 0,7 \text{ кВт/м}^2$  предохранит стержни от обмерзания.

## 6. РАСЧЕТ ОБОГРЕВА ЗАТВОРОВ

6.1. В зимнее время могут быть предусмотрены следующие четыре расчетные схемы обогрева:

- а) затвор находится в воде; требуется предотвратить его обледенение;
- б) затвор находится в воде; необходимо за заданное время освободить его от намерзшего льда;

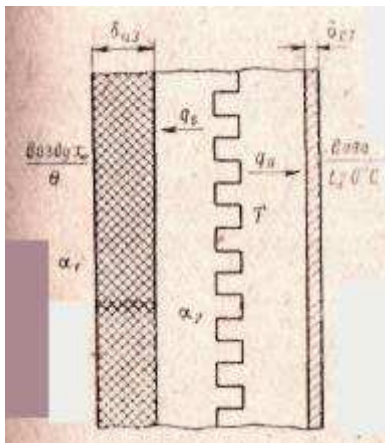


Рис. 2. Схема обогрева затвора, опущенного в воду (предотвращение обледенения).

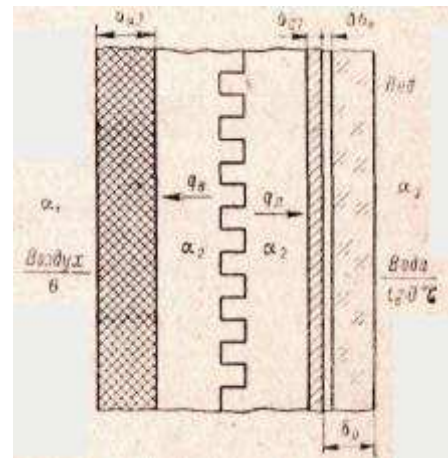


Рис. 3. Схема обогрева затвора, опущенного в воду (растопление льда).

- в) затвор поднят над водой (полностью или частично); требуется предотвратить его обледенение;
- г) затвор поднят над водой, необходимо за заданное время освободить его от намерзшего льда.

Основными параметрами, которые должны быть определены в результате теплового расчета, являются необходимая мощность обогрева и температура в межщитовом пространстве.

6.2. Мощность, необходимая для предотвращения обледенения затвора, когда он опущен в воду (рис. 2) равна

$$p = 0,00116 \frac{\theta - \theta}{R_1}, \text{ квт/м}^2; \quad (6.1)$$

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}}} + \frac{1}{\alpha_2}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град/ккал}, \quad (6.2)$$

где  $\alpha_1 = f(w)$  (см. приложение II);  $\alpha_2 = 7,5 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$ .

Температура воздуха в межщитовом пространстве должна быть не ниже нуля градусов

$$T > 0^\circ \text{C}. \quad (6.3)$$

6.3. Мощность, необходимая для того, чтобы за время  $\tau_0$  после включения обогрева освободить поверхность затвора, опущенного в воду (рис. 3) от слоя льда толщиной  $\Delta\delta_0$ , равна

$$p = 0,00116 q_{\Delta} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right), \text{ квт/м}^2; \quad (6.4)$$

$$q_{\Delta} = \frac{-c_{\Delta} \gamma_{\Delta} \delta_{\Delta} t_{\Delta, \text{ср}} + \gamma_{\Delta} \Delta\delta_0}{\tau_0}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}; \quad (6.5)$$

где  $\Delta\delta_0$  - толщина слоя льда, который должен растаять, чтобы освободить щит от всего намерзшего льда, м;  $\tau_0$  - время, за которое должен растаять слой льда, толщиной  $\Delta\delta_0$ ;  $t_{\Delta, \text{ср}}$  - начальная средняя температура льда,  $^\circ\text{C}$ ;

$$t_{\Delta, \text{ср}} = \frac{\theta/2}{1 + \frac{R_1}{R_2}}, \quad (6.6)$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_4}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град/ккал}; \quad (6.7)$$

$$R_3 = R_2 + \frac{\delta_0}{\lambda_{\Delta}}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град/ккал}. \quad (6.8)$$

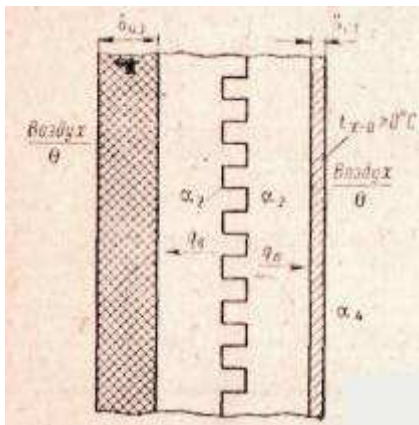


Рис. 4. Схема обогрева затвора поднятого над водой (предотвращение обледенения).

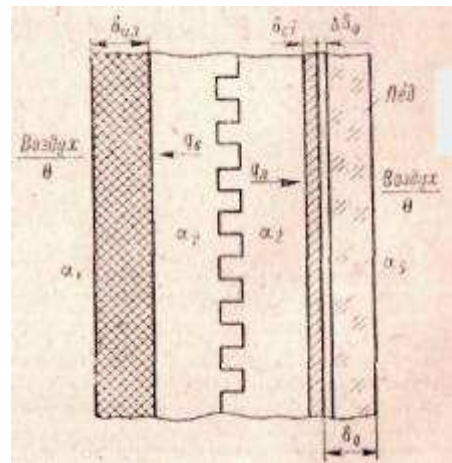


Рис. 5. Схема обогрева затвора, поднятого над водой (растопление льда).

Температура воздуха в межщитовом пространстве будет равна

$$T = q_{\Delta} R_2, ^\circ\text{C}. \quad (6.9)$$

6.4. Мощность, необходимая для предотвращения обледенения затвора, поднятого над водой, равна (рис. 4):

$$p = 0,00116 \left( \frac{T - \theta}{R_1} + \frac{T - t_{x=0}}{R_4} \right), \text{ кВт/м}^2, \quad (6.10)$$

где  $R_4 = \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\lambda_{ст}}{\lambda_{ст}} \approx R_2, \quad (6.11) \quad T = \alpha_1 (t_{x=0} - \theta) R_1 + t_{x=0}; \quad (6.12)$

$$\alpha_4 = \alpha_1. \quad (6.13)$$

6.5. Мощность, необходимая для того, чтобы освободить от намерзшего льда поверхность затвора, поднятого над водой за время  $\tau_0$ , равна (рис. 5)

$$p = 0,00116 q_{л} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right), \text{ кВт/м}^2. \quad (6.14)$$

<sup>1</sup> Для практических расчетов величиной  $1/\alpha_3$  можно пренебречь.

Величина теплового потока  $q_{л}$ , расходуемого на таяние льда, может быть определена из соотношения

$$\tau_0 = \frac{a}{q_{л}} \Delta \vartheta_0 - \frac{\lambda_{л} \theta}{q_{л}^2} a \ln \frac{m}{m - q_{л} \Delta \vartheta_0}; \quad (6.15)$$

где  $a = c_{л} \gamma_{л} \frac{\theta}{2}; \quad m = q_{л} b + \lambda_{л} \theta; \quad b = \frac{\lambda_{л}}{\alpha_3} + \vartheta_0.$

Для определения значения  $q_{л}$ , соответствующего заданному значению  $\tau$ , должна быть построена зависимость  $\tau = f(q_{л})$ , по которой находят искомое значение  $q_{л}$ . Минимальное значение  $q_{л}$ , обеспечивающее таяние льда на поверхности затвора, будет определяться соотношением

$$q_{л, \text{ мин}} > \frac{-\lambda_{л} \theta}{\frac{\lambda_{л}}{\alpha_3} + \vartheta_0 - \Delta \vartheta_0}. \quad (6.16)$$

Температура воздуха в межщитовом пространстве будет равна

$$T = q_{л} R_2. \quad (6.17)$$

6.6. Затвор поднят над водой, требуется предотвратить его обледенение.

В отличие от предыдущего случая (обогрев с помощью нагревателя, находящегося в межщитовом пространстве), индукционный обогрев затвора осуществляется с помощью нагревателей, размещенных на обшивке. Это обстоятельство вносит особенности в методику расчета.

Принимаем, что нагреватели располагаются на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. б), температурное поле обшивки является одномерным.

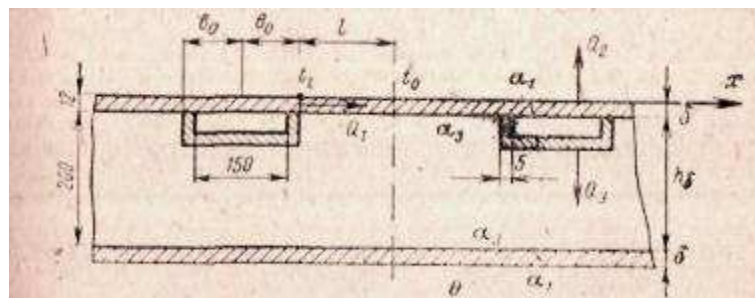


Рис. 6. Схема индукционного обогрева затвора, поднятого над водой.

Величина мощности на один нагреватель, необходимая для поддержания в точке, наиболее



удаленной от нагревателей, температуры  $t_0$ , будет равна

$$p = 2,32 \cdot 10^{-3} (t_0 - \theta) \left[ \frac{2\alpha h_{жк}}{m} \operatorname{sh} ml + b_0 h_{жк} (\alpha_1' + \alpha_2') \operatorname{ch} ml \right], \text{ катм.} \quad (6.18)$$

Температура нагревателя будет равна

$$t_t = (t_0 - \theta) \operatorname{ch} ml + \theta, \quad (6.19)$$

где  $\alpha$  средняя величина коэффициента теплоотдачи от поверхности стержня в атмосферу, ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  $h_{жк}$  - длина нагревателя, м;  $b_0$  - половина ширины нагревателя, м;  $m$  - параметр, величина которого определяется из выражения

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda_{ст} b_{ст}}}, \quad (6.20)$$

Величина коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  будет равна:

$$\alpha = \frac{\alpha_1' + \alpha_2'}{2}, \quad (6.21)$$

где  $\alpha_1'$  - коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности затвора в атмосферу (в сторону верхнего бьефа);  $\alpha_2'$  - коэффициент теплоотдачи с поверхности затвора в атмосферу (в сторону нижнего бьефа).

Если межщитовое пространство затвора заполнено теплоизоляционным материалом, величина  $\alpha_2$  определяется по формуле

$$\frac{1}{\alpha_2'} = \frac{h_{т}}{\lambda_{т}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_1'}, \quad (6.22)$$

Если в межщитовом пространстве воздух

$$\frac{1}{\alpha_2'} = \frac{2}{\alpha_3} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_1'}, \quad (6.23)$$

где  $\alpha_3$  - коэффициент теплоотдачи от металла к воздуху в межщитовом пространстве.

**Пример расчета.** Рассмотрим два варианта расчета мощности обогрева затвора (рис. 6):

вариант 1 - нагреватели имеют размеры, указанные на чертеже ( $l = 0,075$  м);

вариант 2 - нагреватели имеют размеры, указанные на чертеже ( $l = 0,225$  м).

Расчетная температура воздуха  $\theta = -24^\circ\text{C}$ . Температура в расчетной точке  $t_0 = +1,0^\circ\text{C}$ . Скорость ветра соответствует значению  $\alpha_1' = 20$  ккал/м<sup>2</sup>·ч·град. Расчеты выполнены также для  $\alpha_1' = 10$  и  $\alpha_1' = 15$ . Коэффициент теплоотдачи от металла к воздуху внутри затвора  $\alpha_3' = 7,5$  ккал/м<sup>2</sup>·ч·град. Все значения мощности определены для 1 м закладной части ( $h_{жк} = 1$  м). Ширина нагревателя  $2b_0 = 0,15$  м. Толщина обшивки  $\delta_{ст} = 0,012$  м. Коэффициент теплопроводности стали  $\lambda_{ст} = 40$  ккал/м·ч·град. Коэффициент теплопроводности бетона  $\lambda_6 = 1,3$  ккал/м·ч·град.

Расчеты выполнены для случаев, когда внутри затвора находится воздух и когда затвор заполнен бетоном.

**В а р и а н т 1** ( $l = 0,075$  м). Внутри затвора - воздух; коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1' = 20$  ккал/м<sup>2</sup>·ч·град. Определим значение  $\alpha_2'$  по (6.23):

$$\frac{1}{\alpha_2'} = \frac{2}{\alpha_3} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_1'}$$

По (6.21) найдем  $\alpha = (20 + 3,2) / 2 = 11,6$ .

Найдем далее из (6.20) значение  $m = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,6}{40 \cdot 0,012}} = 6,95$  и, следовательно,  $ml = 6,95 \cdot 0,075 = 0,521$ . Гиперболические функции будут иметь значения:  $sh ml = 0,54$ ,  $ch ml = 1,14$ . Окончательно из (6.18) найдем значение мощности  $p = 2,32(1 + 24) \cdot (2 \cdot 11,6 \cdot 1) / 6,95 [0,54 + 0,075 \cdot 1 \cdot (20 + 3,2) \cdot 1,14] = 219 \text{ Вт/м} = 0,22 \text{ кВт/м}$ .

**В а р и а н т 2** ( $l = 0,225 \text{ м}$ ). Рассчитывается аналогично.  
Для удобства расчетов приведем вспомогательные таблицы.

Приведем значения мощности обогрева для случая, когда полость затвора заполнена бетоном, расстояние между нагревателями соответствует  $l = 0,075 \text{ м}$ , скорость ветра соответствует значению  $\alpha_1' = 20 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$  и температура в расчетной точке ( $t_0$ ) равна  $+ 1,0^\circ\text{C}$ .

При температуре воздуха  $\theta = - 24^\circ\text{C}$ ,  $p_1 = 9,35 (t_0 - \theta) = 9,35 \cdot 25 = 0,234 \text{ кВт/м}$ ; при температуре воздуха  $\theta = - 5,0^\circ\text{C}$ ;  $p_2 = 9,35 (t_0 - \theta) = 9,35 \cdot 6 = 0,056 \text{ кВт/м}$ .

Таблица 2

Вариант		Внутри затвора бетон			Внутри затвора воздух		
$l = 0,075$	$\alpha_1'$	10	15	20	10	15	20
	$\alpha_2'$	3,6	4,1	4,4	2,7	3,0	3,2
	$\alpha$	6,8	9,6	12,2	6,4	9,0	11,6
	$m$	5,23	6,35	7,15	5,16	6,12	6,95
	$ml$	0,40	0,477	0,535	0,386	0,460	0,522
	$sh ml$	0,41	0,49	0,56	0,40	0,48	0,54
	$ch ml$	1,08	1,12	1,15	1,07	1,11	1,14
$l = 0,225$	$ml$	1,20	1,43	1,61	1,16	1,38	1,57
	$sh ml$	1,51	1,97	2,40	1,44	1,86	2,30
	$ch ml$	1,81	2,21	2,59	1,75	2,11	2,51

Выполненные расчеты позволили установить следующие зависимости

Таблица 3

В а р и а н т 1 ( $l = 0,075 \text{ м}$ )			В а р и а н т 2 ( $l = 0,225 \text{ м}$ )		
$P$ , Вт/м	$\alpha_1'$ ккал/м <sup>2</sup> ·ч·град	$\frac{t_l - \theta}{t_0 - \theta}$	$P$ , Вт/м	$\alpha_1'$ ккал/м <sup>2</sup> ·ч·град	$\frac{t_l - \theta}{t_0 - \theta}$
Внутри затвора воздух					
4,64 ( $t_0 - \theta$ )	10	1,07	12,1 ( $t_0 - \theta$ )	10	1,75
6,72 ( $t_0 - \theta$ )	15	1,11	19,3 ( $t_0 - \theta$ )	15	2,11
8,76 ( $t_0 - \theta$ )	20	1,14	29,0 ( $t_0 - \theta$ )	20	2,51
Внутри затвора бетон					
4,95 ( $t_0 - \theta$ )	10	1,08	13,2 ( $t_0 - \theta$ )	10	1,81
7,15 ( $t_0 - \theta$ )	15	1,12	21,2 ( $t_0 - \theta$ )	15	2,21
9,35 ( $t_0 - \theta$ )	20	1,15	30,0 ( $t_0 - \theta$ )	20	2,59

## 7. РАСЧЕТ ОБОГРЕВА ЗАКЛАДНЫХ ЧАСТЕЙ

### Предотвращение образования льда на закладных частях

7.1. Одной из возможных мер для предотвращения примерзания подвижных конструкций гидротехнических сооружений к забетонированным закладным частям и бетонным стенкам паза является обогрев закладных частей и стенок пазов затворов и ворот с помощью подогретого минерального масла.

Источником тепла являются трубы, заложенные в бетон в непосредственной близости от обогреваемых участков. Все трубы соединяются в единую систему, в которую входят также масляный насос с электродвигателем, нагреватель масла и оборудование трубопроводов. По этой системе циркулирует масло, которое нагревается в нагревателе и отдает тепло через стенки труб и бетон закладным частям.

7.2. Целью теплового расчета установки маслообогрева является определение:

- а) температуры стенок труб;
- б) температуры масла, циркулирующего по трубам;
- в) времени разогрева системы;
- г) температуры теплоотдающих поверхностей в нагревателе;
- д) мощности нагревателя масла.

7.3. При выполнении расчетов необходимо иметь в виду следующие положения:

а) обогреваемые поверхности могут находиться как в воде так и в воздухе; условия обогрева при нахождении обогреваемых поверхностей в воздухе тяжелее, чем при нахождении их в воде. Расчетным случаем будет случай нахождения обогреваемых поверхностей в воздухе;

б) в ряде случаев трубы системы маслообогрева расположены в непосредственной близости от закладных частей, металл которых будет влиять на характер распространения тепла в бетонном массиве и на температурном поле массива. Тем не менее, при выполнении теплового расчета бетонный массив рассматривается как однородный и наличие металла закладных частей не учитывается;

в) для предотвращения примерзания подвижных конструкций к неподвижным обогреваемым поверхностям на последних должна поддерживаться и положительная температура. В расчетах значение температуры обогреваемых поверхностей рекомендуется принимать равным  $+5^{\circ}\text{C}$ ;

г) в расчете все коэффициенты, относящиеся к бетонному массиву ( $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\gamma$ ), принимаются постоянными во времени и пространстве;

д) условия обогрева различных участков поверхности могут резко отличаться друг от друга как вследствие различного количества греющих труб, так и геометрией. Так, например, обогрев участка поверхности может производиться одной, двумя или целым рядом труб. Обогреваемый участок может иметь одну поверхность теплоотдачи (обогрев швеллера), две взаимно перпендикулярные поверхности (обогрев уголка бокового уплотнения) и три поверхности теплоотдачи (обогрев паза щитка, закрывающего паз основного затвора). Эти особенности обуславливают различие расчетных формул;

е) вид расчетных формул зависит от того, каким будет режим обогрева - стационарным или нестационарным.

7.4. Задача определения мощности греющих труб требует ответа на вопрос, какова должна быть мощность труб, заложенных в массив, чтобы в определенной точке поверхности обогреваемого участка установилась заданная температура. При этом известны геометрические параметры заложения труб и теплофизические константы бетонного массива. Эта задача является частным случаем задачи определения температурного поля массива, если задана мощность трубы и геометрические параметры, ее заложения относительно выбранной системы координат. На границе бетон - воздух должны быть заданы граничные условия. За начальную температуру бетонного массива принимается температура воздуха.

### **Определение необходимых мощностей и температуры стенок труб**

7.5. За расчетные приняты приближенные формулы, полученные в результате теоретических решений при граничных условиях I рода, при помощи метода «дополнительного слоя». Точность этих формул вполне достаточна для большинства расчетов установок системы маслообогрева.

7.6. Обогрев обратных и боковых путей швеллеров, двутавровых балок одной трубой. На



расчетном участке массив имеет одну поверхность теплоотдачи (рис. 7). Мощность погонного метра трубы определяется формулами:

а) *стационарный режим*

$$q'' = \frac{2\pi\lambda_6 (t_A - \theta)}{\ln \sqrt{\frac{x^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2}{x^2 + b^2}}}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}; \quad (7.1)$$

б) *нестационарный режим*

$$q'' = \frac{4\pi\lambda_6 (t_A - \theta)}{\text{Ei} \left[ -\frac{x^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{x^2 + b^2}{4k\tau} \right]}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}; \quad (7.2)$$

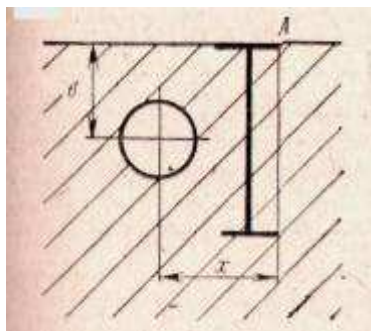


Рис. 7. Схема обогрева закладных частей одной трубой.

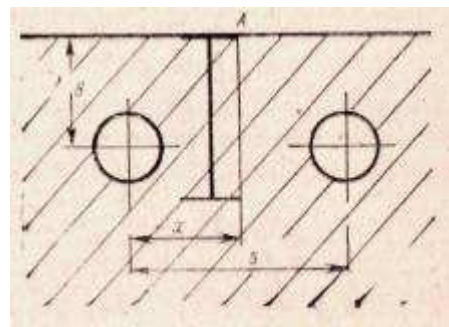


Рис. 8. Схема обогрева закладных частей двумя трубами, (расчетная точка А посередине между трубами  $s = 2x$ ).

Температура стенки трубы определяется формулами:

а) *стационарный режим*

$$t_{\text{тр}} = \theta + \frac{q''}{2\pi\lambda_6} \ln \frac{2 \left( b + \frac{\lambda_6}{\alpha} \right)}{r_{\text{ст}}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (7.3)$$

б) *нестационарный режим.*

$$t_{\text{тр}} = \theta + \frac{q''}{4\pi\lambda_6} \left\{ \text{Ei} \left[ -\frac{r_{\text{ст}}^2 + 4 \left( b + \frac{\lambda_6}{\alpha} \right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{r_{\text{ст}}^2}{4k\tau} \right] \right\}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (7.4)$$

7.7. Обогрев этих же закладных частей *двумя трубами:*

А) точка А находится посередине между трубами ( $s = 2x$ ) (рис. 8). Мощность погонного метра трубы определяется формулами:

а) *стационарный режим*

$$q'' = \frac{2\pi\lambda_0(t_A - \theta)}{\ln \frac{x^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{x^2 + b^2}}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}; \quad (7.5)$$

б) нестационарный режим

$$q'' = \frac{4\pi\lambda_0(t_A - \theta)}{\text{Ei} \left[ -\frac{x^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{x^2 + b^2}{4k\tau} \right] + \text{Ei} \left[ -\frac{(x-s)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{(x-s)^2 + b^2}{4k\tau} \right]}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч} \quad (7.6)$$

Температура стенки трубы определяется формулами:

а) стационарный режим

$$t_{\text{тр}} = \theta + \frac{q''}{2\pi\lambda_0} \left\{ \ln \frac{2\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)}{r_{\text{н}}} + \ln \sqrt{1 + \frac{4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{s^2}} \right\}, \text{ }^\circ\text{C}; \quad (7.7)$$

б) нестационарный режим

$$t_{\text{тр}} = \theta + \frac{q''}{4\pi\lambda_0} \left\{ \text{Ei} \left[ -\frac{r_{\text{н}}^2 + 4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{r_{\text{н}}^2}{4k\tau} \right] + \text{Ei} \left[ -\frac{(r_{\text{н}} + s)^2 + 4\left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{(r_{\text{н}} + s)^2 + b^2}{4k\tau} \right] \right\}, \text{ }^\circ\text{C}. \quad (7.8)$$

Б) точка А находится за трубами (рис. 9). Мощность погонного метра трубы определяется формулами:

а) стационарный режим

$$q'' = \frac{2\pi\lambda_0(t_A - \theta)}{\ln \sqrt{\frac{x^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{x^2 + b^2}} + \ln \sqrt{\frac{(x-s)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{(x-s)^2 + b^2}}}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}; \quad (7.9)$$

б) нестационарный режим - формула (7.6).

Температура стенки трубы определяется формулами:

а) стационарный режим - формула (7.7);

б) нестационарный режим - формула (7.8).

В) Точка А находится между трубами, но не посередине ( $s \neq 2x$ ) (рис. 10).

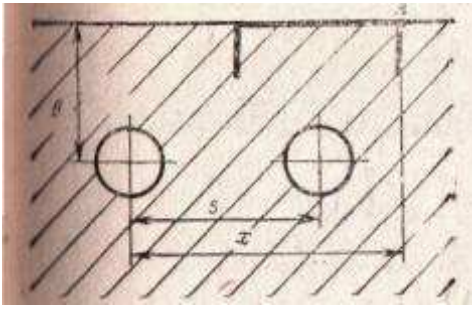


Рис.9. Схема обогрева закладных частей двумя трубами (расчетная точка А за трубами).

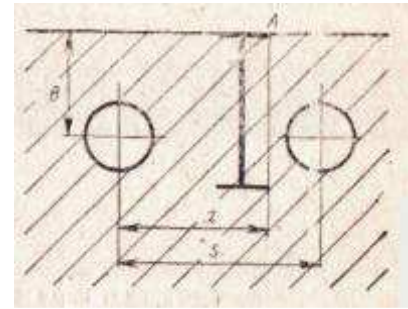


Рис. 10. Схема обогрева закладных частей двумя трубами (расчетная точка А между трубами  $x \neq s/2$ )

Мощность погонного метра трубы определяется формулами:

а) *стационарный режим*

$$q''_s = \frac{2\pi\lambda_0(t_A - \theta)}{\ln \sqrt{\frac{x^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{x^2 + b^2}} + \ln \sqrt{\frac{(x-s)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{(x-s)^2 + b^2}}}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}; \quad (7.10)$$

б) *нестационарный режим* - формула (7.8).

Температура стенки трубы определяется формулами:

а) *стационарный режим* - формула (7.7);

б) *нестационарный режим* - формула (7.8).

7.8. Обогрев уголка уплотнения одной трубой. В этом случае массив имеет две взаимно перпендикулярные поверхности теплоотдачи. Точка А находится в вершине угла, так как вершина угла является наиболее трудной в смысле обогрева точкой (рис. 11).

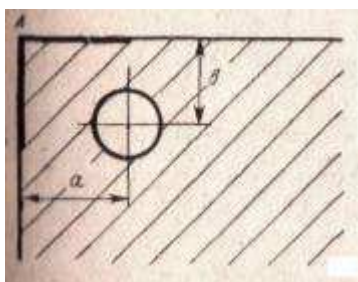


Рис. 11. Схема обогрева уголка уплотнения одной трубой.

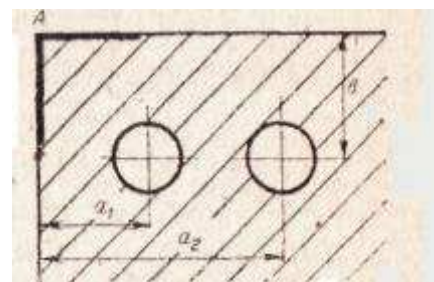


Рис. 12. Схема обогрева уголка уплотнения двумя трубами.

Мощность погонного метра трубы определяется формулами:

а) *стационарный режим*

$$q'' = \frac{2\pi\lambda_0 (t_A - \theta)}{\ln \sqrt{\frac{a^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{a^2 + b^2}} + \ln \sqrt{\frac{\left(a + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{\left(a + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + b^2}}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}; \quad (7.11)$$

б) нестационарный режим

$$q'' = \frac{4\pi\lambda_0 (t_A - \theta)}{\text{Ei} \left[ -\frac{a^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{a^2 + b^2}{4k\tau} \right] + \text{Ei} \left[ -\frac{\left(a + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + b^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{\left(a + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right]}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}; \quad (7.12)$$

Температура стенки трубы определяется формулами:

а) стационарный режим

$$t_{\text{ст}} = \theta + \frac{q''}{2\pi\lambda_0} \left\{ \ln \sqrt{1 + \frac{4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{r_n^2}} - \ln \sqrt{1 + \frac{4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{\left(2a - r_n + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}} \right\}, \text{ }^\circ\text{C}; \quad (7.13)$$

б) нестационарный режим

$$t_{\text{ст}} = \theta + \frac{q''}{2\pi\lambda_0} \left\{ \text{Ei} \left[ -\frac{r_n^2 + 4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{r_n^2}{4k\tau} \right] + \text{Ei} \left[ -\frac{\left(2a - r_n + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{\left(2a - r_n + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + 4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] \right\}, \text{ }^\circ\text{C}. \quad (7.14)$$

7.9. Обогрев уголка уплотнения двумя трубами. Массив имеет две взаимно перпендикулярные поверхности теплоотдачи (рис. 12). Мощность погонного метра трубы определяется формулами:

а) стационарный режим



$$q'' = \frac{2\pi\lambda_0(t_A - \theta)}{\ln \sqrt{\frac{a_1^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{a_1^2 + b^2}} - \ln \sqrt{\frac{\left(a_1 + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{\left(a_1 + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + b^2}} + \ln \sqrt{\frac{a_2^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{a_2^2 + b^2}} - \ln \sqrt{\frac{\left(a_2 + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{\left(a_2 + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + b^2}}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}; \quad (7.15)$$

б) нестационарный режим

$$q'' = \frac{4\pi\lambda_0(t_A - \theta)}{\Sigma_1}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}; \quad (7.16)$$

где  $\Sigma_1 = \text{Ei} \left[ -\frac{a_1^2 + 4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{a_1^2 + b^2}{4k\tau} \right] + \text{Ei} \left[ -\frac{\left(a_1 + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + b^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{\left(a_1 + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] + \text{Ei} \left[ -\frac{a_2^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{a_2^2 + b^2}{4k\tau} \right] + \text{Ei} \left[ -\frac{\left(a_2 + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + b^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{\left(a_2 + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right]$

Температура стенки трубы определяется формулами

а) стационарный режим

$$t_{\text{ст}} = \theta + \frac{q''}{2\pi\lambda_0} \left\{ \ln \frac{2\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)}{r_u} - \ln \sqrt{1 + \frac{4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{\left(2a_1 - r_u + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}} - \ln \sqrt{1 + \frac{4\left(b - \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{\left(2a_2 - r_u + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}} \right\}, \text{ }^\circ\text{C}; \quad (7.17)$$

б) нестационарный режим

$$t_{\text{ст}} = \theta + \frac{q''}{4\pi\lambda_0} \left\{ -\text{Ei} \left[ -\frac{r_u^2}{4k\tau} \right] + 2 \left[ -\frac{r_u^2 + 4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] + \text{Ei} \left[ -\frac{\left(2a - r_u + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] + \text{Ei} \left[ -\frac{4\left(a + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - \text{Ei} \left[ -\frac{4\left(a + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + 4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] \right\}, \text{ }^\circ\text{C}. \quad (7.18)$$

7.10. Обогрев паза щитка, закрывающего паз основного затвора. В этом случае массив имеет

три поверхности теплоотдачи (рис. 13). Мощность погонного метра трубы определяется формулами:

а) *стационарный режим*

$$q'' = \frac{2\pi\lambda_6(t_A - \theta)}{\ln \sqrt{\frac{a^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2}{a^2 + b^2}} - \ln \sqrt{\frac{\left(a + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2}{\left(a + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2 + b^2}} - \ln \sqrt{\frac{\left(a + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2 + \left(3b + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2}{a^2 + \left(3b + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2}} - \ln \sqrt{\frac{\left(3a + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2}{\left(3a + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2 + b^2}} \quad \text{ккал/м}\cdot\text{ч}} \quad (7.19)$$

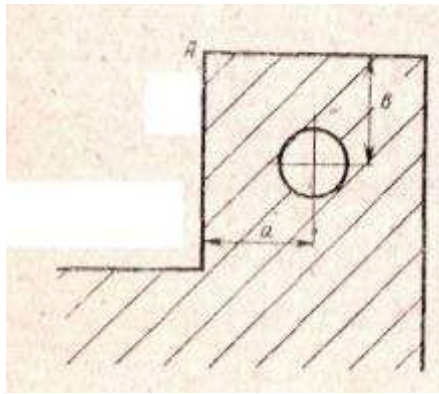


Рис. 13. Схема обогрева паза щитка.

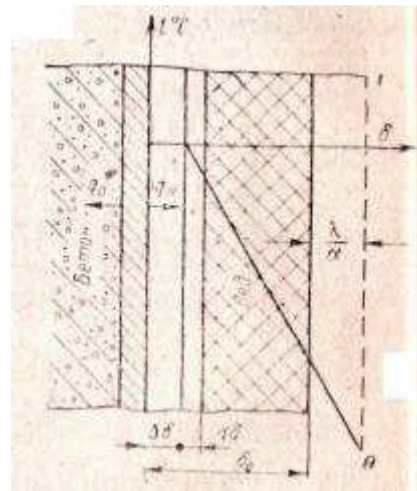


Рис. 14. Начальное распределение температуры при обогреве закладных частей.

б) *нестационарный режим*

$$q'' = \frac{4\pi\lambda_6(t_A - \theta)}{\Sigma_2} \quad \text{ккал/м}\cdot\text{ч}; \quad (7.20)$$

где

$$\Sigma_2 = -Ei \left[ -\frac{a^2 + b^2}{4k\tau} \right] + Ei \left[ -\frac{a^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] - Ei \left[ -\frac{\left(a + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] + Ei \left[ -\frac{\left(a + 2\frac{\lambda_6}{\alpha}\right)^2 + b^2}{4k\tau} \right]$$

$$-Ei \left[ \frac{\left(a + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + \left(3b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] + Ei \left[ \frac{a^2 + \left(3b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] +$$

$$+ Ei \left[ \frac{\left(3a + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + b^2}{4k\tau} \right] - Ei \left[ \frac{\left(3a + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + \left(b + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right].$$

Температура стенки трубы определяется формулами:

а) *стационарный режим*

$$t_{тр} = \theta + \frac{q''}{2\pi\lambda_0} \left\{ \ln \sqrt{1 + \frac{4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{r_n^2}} - \ln \sqrt{1 + \frac{4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{\left(2a - r_n + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}} - \right.$$

$$\left. - \ln \sqrt{1 + \frac{4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{\left(2a + r_n + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}} - \ln \sqrt{\frac{\left(2a - r_n + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + 4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{r_n^2 + 4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}} \right\}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

(7.21)

б) *нестационарный режим*

$$t_{тр} = \theta + \frac{q''}{2\pi\lambda_0} \left\{ -Ei \left[ -\frac{r_n^2}{4k\tau} \right] + 2 \left[ -\frac{r_n^2 + 4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] + \right.$$

$$+ Ei \left[ -\frac{\left(2a - r_n + 2\frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] + Ei \left[ -\frac{4\left(a + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] -$$

$$\left. - Ei \left[ -\frac{4\left(a + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2 + 4\left(b + \frac{\lambda_0}{\alpha}\right)^2}{4k\tau} \right] \right\}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (7.22)$$

### Определение действительных мощностей труб на каждом участке

7.11. Так как один нагреватель масла обслуживает все участки, то температура масла и, следовательно, температура стенок труб будет на всех участках приблизительно одинаковой. Таким образом, получается, что хотя для обогрева определенного участка достаточна температура стенки трубы  $t_{тр}$  (при которой тепловая мощность единицы длины трубы равна  $q''$ ), эта температура повысится и будет равна температуре стенки трубы, максимальной из всех полученных на каждом участке. При этом, естественно, повысится и количество тепла, выделяемое с 1 пог. м труб на участках, где достаточная температура стенок меньше максимальной.

7.12. Если при температуре стенки трубы  $t_{тр}$  с 1 пог. м трубы выделялась мощность  $q''$ , то при температуре стенки, равной максимальной  $t_{тр}^{\text{макс}}$  эта мощность  $q_0$  будет равна:

$$q_0 = q'' \frac{t_{тр}^{\text{макс}} - \theta}{t_{тр} - \theta}, \text{ ККАЛ/М}\cdot\text{Ч}. \quad (7.23)$$

Таким образом, мощности труб на всех участках, где температура стенок была ниже макси-



мальной, значительно повышаются, что неизбежно приводит к дополнительному запасу мощности нагревателя масла.

### Температура масла, циркулирующего в трубах

7.13. Если известна температура стенок труб, то температура масла  $t_m$ , циркулирующего по этим трубам, определяется по формуле

$$t_m = t_{тр}^{макс} + \frac{q_0^{макс}}{\pi} \left( \frac{1}{\alpha_m d_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{d_{вн}}{d_{вн}} \right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7.24)$$

где  $q_0^{макс}$  - максимальное из всех значений  $q_0$ , пересчитанных по формуле (7.23).

7.14. Величина  $\alpha_m$  определяется режимом течения масла по трубам, а режим течения определяется, наряду с другими факторами, вязкостью масла. Так как вязкость масла зависит от его температуры, то очевидно, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha_m$  есть функция температуры масла  $t_m$ . Таким образом, величину  $\alpha_m$  можно определить только методом подбора: задаваясь значением  $t_m$ , определяем величину  $\alpha_m$  и, подставив эту величину в формулу (7.24), проверяем значение  $t_m$ , которым задались. Величина  $t_m$  считается определенной, если значение  $t_m$ , которым задавались и которое получено, отличаются друг от друга не больше, чем на 10%.

Для определения величины  $\alpha_m$  при заданном значении  $t_m$  нужно определить критерии Рейнольдса  $Re$  и Прандтля  $Pr$ . Так как величины этих критериев зависят от температуры, то они определяются при значении температуры  $t_{опр}$ , равной

$$t_{опр} = \frac{1}{2} (t_m + t_{тр}^{макс}), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7.25)$$

Величина критерия Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = \frac{v_m d_{вн}}{\nu_m}$$

Величина  $\gamma_m$  берется при температуре  $t_{опр}$  из графика приложения IV. В установках для маслообогрева обычно  $Re > 2300$ , т. е. режим течения турбулентный. По этому же графику определяется величина критерия Прандтля  $Pr$  (при той же температуре  $t_{опр}$ ). Далее для определения величины  $\alpha_m$  нужно определить величину критерия Нуссельта  $Nu$ . При турбулентном режиме течения его величина определяется по формуле

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}.$$

Величина  $\alpha_m$  определяется по формуле

$$\alpha_m = \frac{\lambda_m Nu}{d_{вн}}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}. \quad (7.26)$$

Величину коэффициента  $\lambda_m$  следует определять из графика приложения IV. Определив по формуле (7.26) значение  $\alpha_m$ , подставляем его в формулу (7.24) и проверяем значение  $t_m$ , которым задавались. Если это значение отличается от полученного меньше, чем на 10%, подбор считается удачным, если же больше, чем на 100% - нужно подбор производить заново.

Следует указать, что обычно температура масла превышает температуру стенок труб на 4 – 5°С. Необходимо иметь ввиду, что при температуре 90°С масло начинает разлагаться, а при температуре 135°С - может воспламениться.

### Тепловые потери в магистральных трубах

7.15. Считая, что температура внутренней стенки магистральных труб, покрытых слоем ас-



бозурита, равна температуре масла, получаем формулу для подсчета тепловых потерь с 1 пог. м магистральных труб:

$$q_{\text{маг}} = \frac{(t_m - \theta)}{\frac{1}{\alpha_m \pi d_{\text{вн}}} + \frac{1}{2\pi \lambda_{\text{ст}} \ln \frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{вн}}}}}, \text{ ккал/м}\cdot\text{ч.} \quad (7.27)$$

7.16. Суммарные тепловые потери в магистральных трубах равны

$$Q_{\text{маг}} = q_{\text{маг}} L + Q_{\text{фл}} \text{ ккал/ч.} \quad (7.28)$$

За длину магистральных труб следует принимать эквивалентную длину  $L$ , определяемую равенством

$$L = 1,15 (l + 6,7n), \text{ м,}$$

где  $n$  - количество задвижек; 6,7 - эквивалентная длина одной задвижки;  $l$  - длина труб, м; 1,15 - коэффициент, учитывающий тепловые потери на оголенных местах.

Тепловые потери на фланцах определяются по формуле

$$Q_{\text{фл}} = 50n_1, \text{ ккал/ч,}$$

где  $n_1$  - число пар фланцев.

### Мощность нагревателя масла

7.17. Мощность нагревателя масла складывается из мощностей на каждом участке и из тепловых потерь в магистральных трубах. Суммарные мощности на всех участках равны:

$$Q_1 = \sum q_i l_i, \text{ ккал/ч.} \quad (7.29)$$

где  $q_i$  и  $l_i$  мощность на каждом участке и длина участка соответственно.

Мощность нагревателя масла равна

$$N_{\text{наг}} = Q_1 + Q_{\text{маг}}, \text{ ккал/ч} \quad \text{или} \quad N_{\text{наг}} = Q_{\text{маг}} / 860, \text{ квт.} \quad (7.30)$$

где 1/860 - коэффициент перевода ккал/ч в квт.

### Определение времени разогрева системы

В том случае, когда система работает в стационарном режиме, необходимо определить время разогрева, т.е. время, за которое температура в точке А достигнет температуры  $t_A$ . Этим временем определяется заблаговременность включения установки. За это время должны нагреться:

- а) масло от  $t_0$  до  $t_m$ ;
- б) стенки труб от  $t_0$  до  $t_p^{\text{макс}}$ ;
- в) бетон от  $t_0$  до  $t_A$ .

Указанные три процесса начинаются одновременно, а с некоторым сдвигом во времени. Однако ввиду невозможности одновременного учета всех этих явлений, весь процесс разогрева можно разделить на два режима:

*пусковой* - разогрев масла и стенок труб от  $t_0$  до  $t_m$  и  $t_p^{\text{макс}}$  соответственно; время пускового режима обозначим  $\tau$ ;

*переходный* - разогрев бетона трубой, достигшей  $t_p^{\text{макс}}$  и выделяющей с 1 пог. м расчетную мощность  $q$ ". Время переходного режима обозначим  $\tau_2$ . Суммарное время разогрева системы

$$\tau = \tau_1 + \tau_2, \quad (7.31)$$

### Разогрев труб и масла (пусковой режим)

7.19. При внутреннем диаметре труб  $d_{\text{вн}}$  и длине всех труб  $l$  объем масла в трубах равен

$$V_{\text{м}}' = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2 l}{4}, \text{ м}^3. \quad (7.32)$$

Объем масла в нагревателе  $V_{\text{наг}}$  составляет примерно  $0,3 \text{ м}^3$ . Суммарный объем масла  $V_{\text{м}} = V_{\text{м}}' + V_{\text{наг}}, \text{ м}^3$ . Для нагрева этого объема масла от  $t_0$  до  $t_{\text{м}}$  необходимо количество тепла  $Q_{\text{м}}'$ :

$$Q_{\text{м}}' = c_{\text{м}} (t_{\text{м}} - t_0) \gamma_{\text{м}} V_{\text{м}}, \text{ ккал}. \quad (7.33)$$

Объем металла труб  $V_{\text{тр}}$  равен

$$V_{\text{тр}} = \frac{\pi l}{4} (d_{\text{н}}^2 - d_{\text{вн}}^2), \text{ м}^3. \quad (7.34)$$

Для его нагрева от  $t_0$  до  $t_{\text{р}}^{\text{макс}}$  требуется количество тепла  $Q_{\text{тр}}'$ :

$$Q_{\text{тр}}' = c_{\text{ст}} (t_{\text{р}}^{\text{макс}} - t_0) \gamma_{\text{ст}} V_{\text{тр}}, \text{ ккал}. \quad (7.35)$$

Суммарное количество тепла, необходимое для разогрева масла и труб, равно  $Q' = Q_{\text{м}}' + Q_{\text{тр}}'$ . Нагреватель масла дает:

$$Q_{\text{наг}} = 860 N_{\text{наг}}, \text{ ккал/ч}. \quad (7.36)$$

Следовательно для разогрева масла и труб требуется время

$$\tau_1' = \frac{Q'}{Q_{\text{наг}}}, \text{ ч}. \quad (7.37)$$

Учитывая, что одновременно с нагревом масла и труб имеются и потери тепла от нагретых труб в бетон, принимаем окончательно:

$$\tau_1 = 2\tau_1', \text{ ч}. \quad (7.38)$$

### Разогрев бетона (переходный режим)

7.20. После окончания пускового режима, т. е. после достижения маслом температуры  $t_{\text{м}}$  и стенками труб температуры  $t_{\text{р}}^{\text{макс}}$ , наступает стационарный режим, при котором с одного погонного метра трубы будет сниматься мощность  $q''$  ккал/м·ч, значение которой определяется для каждого участка по соответствующим формулам. Требуется определить время, за которое температура в точке А каждого участка достигнет величины  $t_{\text{А}}$  или, что то же самое время, за которое мощность, снимаемая с погонного метра труб, на каждом участке достигнет значения  $q''$ . Естественно, что время разогрева различных участков неодинаково. Однако подсчитывать время разогрева всех участков не нужно, достаточно определить время разогрева для наиболее теплоинерционного участка, таким участком будет тот, у которого температура стенок труб при стационарном режиме будет максимальной. На всех других участках время разогрева будет меньше.

Для определения времени разогрева используются формулы для нестационарного режима. Формулы для определения  $q''$  имеют вид

$$q'' = \frac{4\pi\lambda (t_{\text{А}} - t_0)}{\Sigma}, \text{ ккал/м} \cdot \text{ч}; \quad (7.39)$$

значение  $\Sigma$  приводится в формулах (7.16) и (7.20).

### Освобождение закладных частей от намерзшего льда

7.21. Целью теплового расчета является определение интенсивности обогрева закладной части  $q$ , обеспечивающей таяние имеющегося на поверхности слоя льда начальной толщины  $\delta_0$  за время  $\tau$  на величину  $\Delta\delta$  (рис. 14).

7.22. Зависимость между интенсивностью теплового потока, поступающего ко льду,  $q_l$ , и временем  $\tau$ , необходимым для таяния слоя льда на закладной части на заданную толщину  $\Delta\delta$ , описывается следующим уравнением:

$$\tau = \frac{a}{q_l} \Delta\delta - \frac{\lambda_l}{q_l^2} a \ln \frac{m}{m - q_l} \Delta\delta, \quad (7.40)$$

где  $a = \rho \gamma_l \frac{c_l \gamma_l \theta}{2}$ ;  $m = q_l b + \lambda_l \theta$ ;  $b = \frac{\lambda_l}{a} + \delta_0$ .

Для определения значения  $q_l$  соответствующего заданному значению  $\tau$ , должна быть построена зависимость  $\tau = f(q_l)$ , по которой находят искомое значение  $q_l$ .

7.23. Минимальное значение интенсивности теплового потока ко льду, обеспечивающее таяние слоя льда толщиной  $\Delta\delta$  на закладной части, будет определяться соотношением:

$$q_{l, \text{ мин}} = \frac{-\lambda_l \theta}{\frac{\lambda_l}{a} + \delta_0 - \Delta\delta}, \quad \text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч.} \quad (7.41)$$

### Определение коэффициента полезного действия обогрева закладных частей

7.24. При обогреве закладных частей часть тепла будет уходить в бетон (расходоваться бесполезно). Соотношение между тепловыми потоками будет следующее:

$$q = q_l + q_0. \quad (7.42)$$

Величина коэффициента полезного действия обогрева закладных частей будет равна:

$$\epsilon = q_l / q. \quad (7.43)$$

7.25. Мгновенное значение к. п. д. обогрева будет определяться следующим соотношением

$$\epsilon = 2 \sqrt{Fo} \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{1}{2 \sqrt{Fo}} \right). \quad (7.44)$$

7.26. В расчетных уравнениях, которыми определяется время таяния льда значение  $q_l$  принято постоянным (для упрощения расчетов). Так как в действительности значение  $\epsilon$  и  $q_l$  не постоянны, в расчет следует принимать среднее значение к. п. д., равное:

$$\epsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{Fo} \int_0^{Fo} \epsilon d Fo, \quad (7.45)$$

график  $\epsilon_{\text{ср}} = f(Fo)$  приводится в приложении V.

**Пример расчета.** Имеется закладная часть (рис. 14), на которую намерз слой льда толщиной  $\delta_0 = 0,03$  м. Требуется определить мощность обогрева  $P$ , обеспечивающую таяние слоя льда толщиной  $\Delta\delta = 0,01$  м за время  $\tau = 1$  ч. Известны: температура воздуха  $\theta = -60^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплоотдачи от поверхности льда к воздуху  $\alpha = 20$  ккал/м<sup>2</sup>·ч·град, коэффициент теплопроводности льда  $\lambda_l = 1,95$  ккал/м·ч·град; теплота плавления льда  $\rho = 80$  ккал/кг; удельная теплоемкость льда  $c_l = 0,5$  ккал/кг·град. Удельный вес льда  $\gamma_l = 920$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент температуропроводности бе-

тона  $k = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{ч}$ . Определим значение  $q_l$ , обеспечивающее выполнение условия

$$q_{l, \text{ мин}} \geq \frac{-\lambda_a \theta}{\frac{\lambda_a}{\alpha} + \delta_0 - \Delta \delta}$$

Имеем

$$q_{l, \text{ мин}} = \frac{1,95 \cdot 60}{\frac{1,95}{20} + 0,03 - 0,01} = 1000 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$$

Определим далее значения коэффициентов  $a$  и  $m$ , входящих в расчетное уравнение  $\tau = f(q_l)$ :

$$a = \gamma \lambda_a - \frac{c_{\lambda} \gamma \lambda_a \theta}{2} = 80 \cdot 920 + \frac{0,5 \cdot 920 \cdot 60}{2} = 87,4 \cdot 10^3$$

$$m = q_l \left( \frac{\lambda_a}{\alpha} + \delta_0 \right) + \lambda_a \theta = q_l \left( \frac{1,95}{20} + 0,03 \right) + 1,95 \cdot 60 = 0,13 q_l + 117$$

Расчетное уравнение будет иметь вид:

$$= \frac{87,4 \cdot 10^3}{q_l} + 0,01 + \frac{1,95 \cdot 60}{q_l^2} + 87,4 \cdot 10^3 \ln \frac{0,13 q_l + 117}{0,13 q_l - 117 - 0,01 q_l} =$$

$$= \frac{87,4}{q_l} + \frac{10^3}{q_l^2} \ln \frac{0,13 q_l + 117}{0,12 q_l - 117}$$

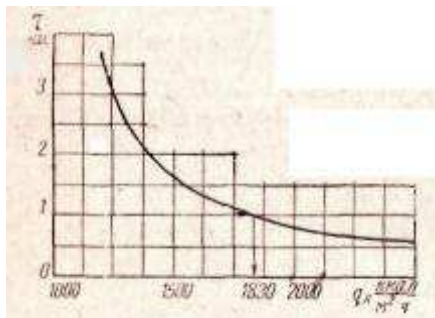


Рис. 15. График зависимости  $q_l = f(\tau)$ .

Задавшись значениями  $q_l$  (большими  $q_{l, \text{ мин}}$ ) 1200, 1500, 2000, 2500 ккал/м<sup>2</sup>·ч, получим соответствующие значения  $\tau$ : 3,69, 1,62, 0,84, 0,57 ч.

Построим зависимость  $q_l = f(\tau)$  (рис. 15) и найдем значение  $q_l$  соответствующее заданному времени  $\tau = 1$  ч. Будем иметь  $q_l = 1830$  ккал/м<sup>2</sup>·ч.

Определим величину к. п. д. обогрева  $\epsilon_{\text{ср}}$ . Найдем значение критерия Фурье

$$Fo = k \tau / l^2$$

Толщина слоя, в котором выделяется тепло, будет равна  $l = 0,1$  м, следовательно:

$$Fo = \frac{4,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{10^{-2}} = 0,46$$

По графику  $\epsilon_{\text{ср}} = f(Fo)$  (приложение V) найдем  $\epsilon_{\text{ср}} = 0,42$ . Найдем значение  $q = q_l / \epsilon_{\text{ср}} = 4380$  ккал/м<sup>2</sup>·ч. Мощность, необходимая для растопления слоя льда толщиной 0,01 м за 1 ч, будет равна  $p = 4380 / 860 = 5,1$  квт/м<sup>2</sup>

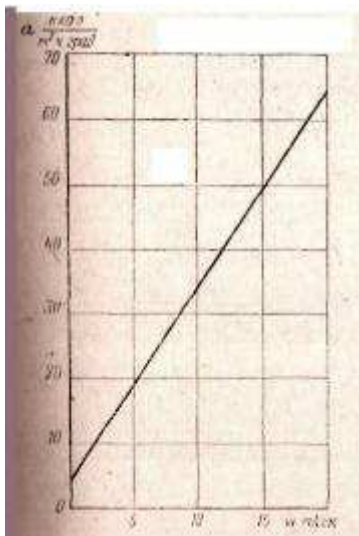
## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ I

#### Таблица гиперболических функций

$x$	$sh x$	$ch x$	$th x$	$x$	$sin x$	$ch x$	$thx$
0,00	0,0000	1,0000	0,0000	0,90	1,0265	1,4331	0,7163
0,10	0,1002	1,0050	0,0997	1,00	1,1752	1,5431	0,7616
0,20	0,2013	1,0201	0,1974	1,10	1,3356	1,6685	0,8005
0,30	0,3045	1,0453	0,2913	1,20	1,5095	1,8107	0,8337
0,40	0,4108	1,0811	0,3799	1,30	1,6984	1,9709	0,8617
0,50	0,5211	1,1276	0,4621	1,40	1,9043	2,1509	0,8854
0,60	0,6367	1,1855	0,5370	1,50	2,1293	2,3524	0,9051
0,70	0,7586	1,2552	0,6044	1,60	2,3756	2,5775	0,9217
0,80	0,8881	1,3374	0,6640				

## ПРИЛОЖЕНИЕ II



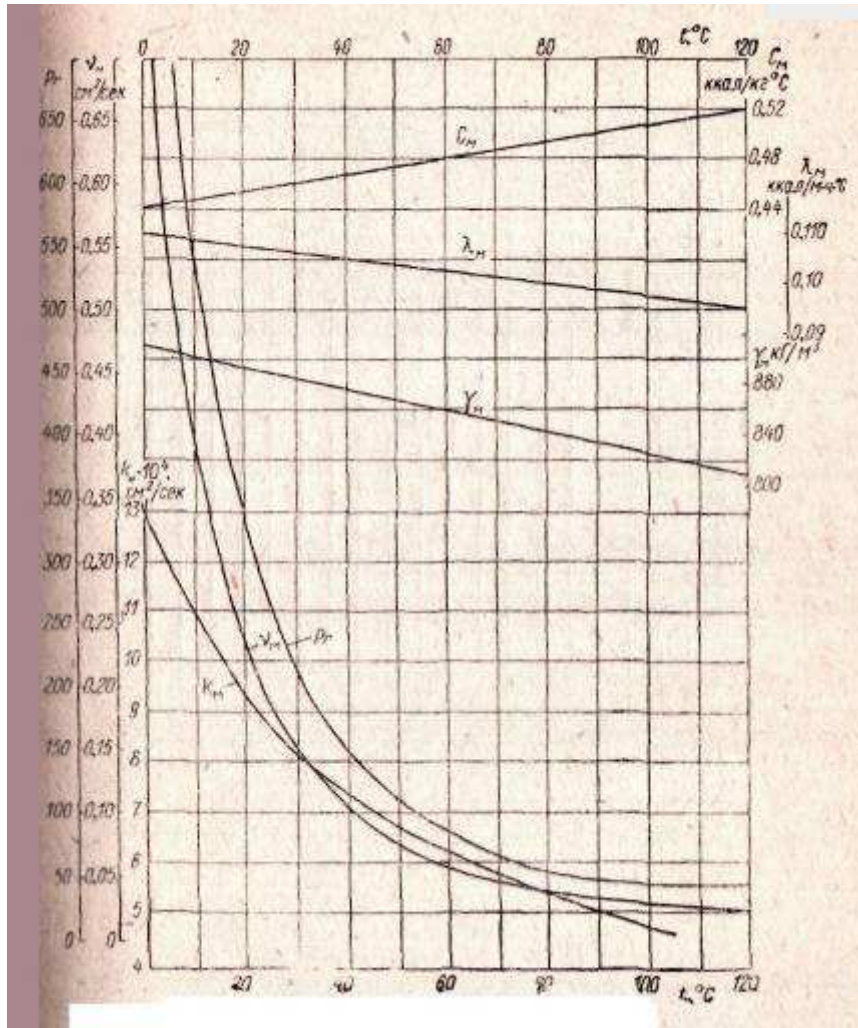
Зависимость коэффициента  
теплоотдачи от скорости ветра  
 $\alpha_1 = 3,75 + 3,05 w$ .

**Интегральная функция**

$x$	$E_i(-x)$	$x$	$E_i(-x)$	$x$	$E_i(-x)$
0,00	$-\infty$	0,85	-0,2840	3,1	0,01149
0,01	-4,0379	0,90	-0,2601	3,2	-0,01013
0,02	-3,3547	0,95	-0,2387	3,3	-0,00893
0,03	-2,9591	1,00	-0,2194	3,4	-0,00789
0,04	-2,6813	1,1	-0,1860	3,5	-0,00697
0,05	2,4679	1,2	-0,1584	3,6	-0,00616
0,06	-2,2953	1,3	-0,1355	3,7	-0,00544
0,07	-2,1508	1,4	-0,1162	3,8	-0,00482
0,08	-2,0269	1,5	-0,1000	3,9	-0,00426
0,09	-1,9187	1,6	-0,08631	4,0	-0,00377
0,10	-1,8229	1,7	-0,07465	4,1	-0,00334
0,15	-1,4645	1,8	-0,06471	4,2	-0,00296
0,20	-1,2227	1,9	-0,05620	4,3	-0,00263
0,25	-1,0443	2,0	-0,04890	4,4	-0,00233
0,30	-0,9057	2,1	-0,04261	4,5	-0,00207
0,35	-0,7942			4,6	-0,00184
0,40	-0,7024	2,2	-0,03719	4,7	-0,00163
0,45	-0,6253	2,3	-0,03250	4,8	-0,00145
0,50	-0,5598	2,4	-0,02844	4,9	-0,00129
0,55	-0,5034	2,5	-0,02491	5,0	-0,00114
0,60	-0,4544	2,6	-0,02185		
0,65	-0,4115	2,7	-0,01918	6,0	-0,00036
0,70	-0,3738	2,8	-0,01686	7,0	-0,00011
0,75	-0,3403	2,9	-0,01482	8,0	-0,00003
0,80	-0,3106	3,0	-0,01304	9,0	0

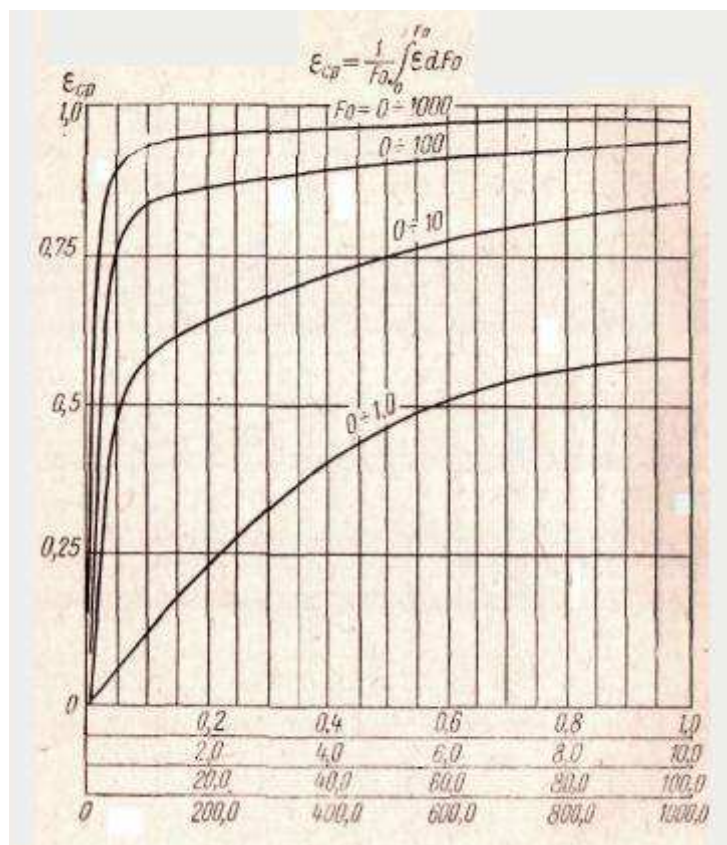
**Основные физические параметры трансформаторного масла**





ПРИЛОЖЕНИЕ V

Зависимость среднего значения коэффициента полезного действия обогрева  $\epsilon_{\text{ср}}$  от его мгновенного значения  $\epsilon$  и критерия  $F_0$



## ЛИТЕРАТУРА

1. Эккерт Э. Р. Введение в теорию тепло- и массообмена. Госэнергоиздат. 1957.
2. Гребер Г., Эрк С. и Григуль У. Основы учения о теплообмене. Изд-во иностранной литературы. 1958.
3. Пехович А. И. Обогрев сороудерживающих решеток ГЭС и водоприемных сооружений. Госэнергоиздат. 1959.
4. Типовая инструкция по эксплуатации механического оборудования гидротехнических сооружений, ВСН 39-70. Госэнергоиздат. 1971.
5. Указания по определению ледовых нагрузок на речные сооружения. СН 76 66. Изд-во лит. по строительству. 1967.
6. Гуль В. Е., Царский Л. Н. и др. Электропроводящие полимерные материалы. «Химия». 1968.
7. Пехович А.И., Алейников С. М. Обогрев затворов гидротехнических сооружений. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. XVII. «Энергия». 1965.
8. Пехович А.И. К расчету мощности обогрева решеток водоприемников. Известия ВНИИГ. т. 53. 1955.
9. Алейников С. М., Гуткин Р. Л., Пехович А. И. Определение мощности обогрева закладных частей. Информационный бюллетень Гидростальпроекта. № 26. 1962.
10. Указания по термическому расчету водохранилищ, ВСН 46-71. «Энергия». 1971.
11. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат. 1956.