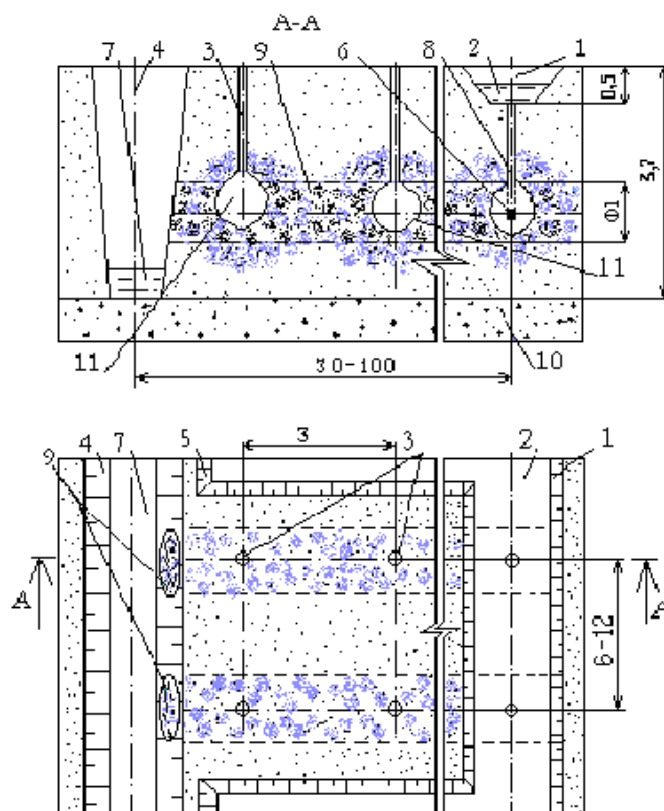


## Расчет параметров взрывогидравлического оттаивания горных пород

Взрывогидравлический способ оттаивания мерзлых горных пород предусматривает использование комбинированного механизма кондуктивно-конвективного переноса тепла, аккумулированного в теплоносителе без применения искусственных энергоисточников (рис.5.3).

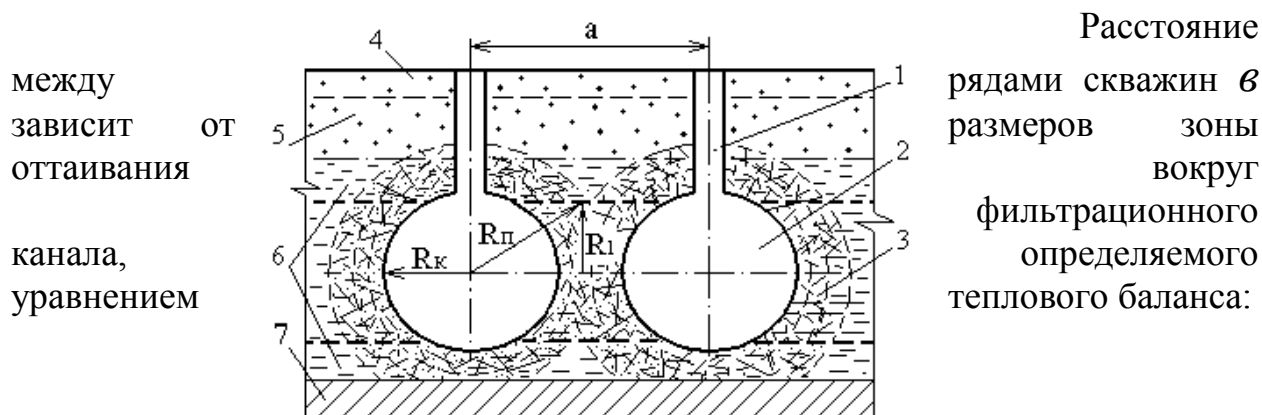
Способ впервые испытан в комбинации с гидроигловым оттаиванием на прииске Колымы [22, 23]. В предложенном позднее варианте [105. 160] в массиве путем одновременного камуфлетного взрывания зарядов взрывчатых веществ (ВВ) линейного ряда скважин создаются фильтрационные каналы, соединяющие питающую (распределительную) и дренажную канавы.



**Рис. 5.3. Схема взрывогидравлического оттаивания мерзлых горных пород:**

1 - питающая канава,  $i = 0,008$ ; 2 - подогретая солнечной энергией вода; 3 -взрывные скважины; 4 - дренажная канава; 5 - оросительные канавы; 6 - заряд ВВ,  $q = (7-11)$  кг; 7- профильтрованная и охлажденная вода; 8 - питающая скважина; 9 - зона фильтрации; 10 - коренные породы; 11- камуфлетные полости

Воду подают через питающую и оросительную канавы и, кроме того, через фильтрационные каналы, что позволяет ускорить оттаивание массива. С поверхности массив оттаивает фильтрационно-дренажным способом или при слабопроницаемых породах обычным солнечно-радиационным способом. Расчет параметров данного варианта взрывогидравлического фильтрационно-дренажного оттаивания (ВГФДО) проводят по следующей схеме (рис. 5.4).



**Рис. 5.4. Схема создания зоны фильтрации в мерзлом массиве горных пород при ВГФДО:**

$a$  - расстояние между взрывными скважинами в ряду, м;  $R_l$  - радиус фильтрационного канала, м;  $R_k$  - радиус камуфлетной полости, м;  $R_n$  - радиус зоны проницаемости, м;  $R_2$  - радиус зоны взрывогидравлического оттаивания, м; 1 - взрывные скважины; 2 - камуфлетные полости; 3 - зона проницаемости; 4 - зона фильтрационно - дренажного оттаивания; 5 - оросительные каналы; 6 - зона взрывогидравлического оттаивания; 7 - плотик.

$$a = 2R_2; \quad (5.6)$$

$$R_2 = R_l \sqrt{\kappa_\phi t_\phi c_\phi \tau \kappa_u / l_\kappa (Q_\phi + t_\Pi c_\Pi) + 1}, \quad (5.7)$$

где  $R_l$ ,  $R_2$  - радиусы фильтрационного канала и зоны оттаивания,  $\kappa_\phi$  - коэффициент фильтрации пород в канале, м/сутки;  $t_\phi$  - температура воды, °C;  $c_\phi$  - теплоемкость воды, Дж/(м<sup>3</sup>·°C);  $\tau$  - время оттаивания пород в зоне ( $R_2 - R_l$ ), сутки;  $\kappa_u = (t_{ex} - t_{вых}) / (t_{ex} - t_0)$  - коэффициент теплоотдачи фильтрационного потока  $t_{ex}$ ,  $t_{вых}$  - температура воды, соответственно на входе и выходе фильтрационного потока, °C;  $l_\kappa$  - длина фильтрационного канала, м;  $Q_\phi$  - температура фазового перехода, Дж/м<sup>3</sup>;  $t_n$  - температура пород, °C;  $c_n$  - теплоемкость пород, Дж/(м<sup>3</sup>·°C).

Время оттаивания  $\tau_0$  пород в фильтрационном канале в основном зависит от проницаемости пород и температуры воды:

$$\tau_0 = (Q_\phi + t_n c_n) / \kappa_\phi t_\phi c_\phi \kappa_u \quad (5.8)$$

Радиус фильтрационного канала  $R_l$  зависит от параметров камуфлетного взрывания и находится из геометрических соотношений:

$$R_1 = \sqrt{R_n^2 - a^2 / 4}, \quad (5.9)$$

где  $a$  – расстояние между скважинами в ряду, м;  $R_n$  – радиус зоны трещинообразования, м.

Для определения размеров зоны трещинообразования воспользуемся моделью грунта при камуфлетном взрыве в скважине, предложенной Д. М. Кушнаревым [57].

Принимая границу раздела упругой и пластической зон предельной границей зоны трещинообразования, определим  $R_T$  по формуле, полученной из аналитического решения указанной модели при модуле объемного сжатия –  $K = 0,1 E$  (здесь  $E$  – модуль упругости),

$$R_T = R_K \sqrt{\frac{1}{20x(10x + 1,33) + 10x}}, \quad (5.10)$$

где  $R_K$  – радиус камуфлетной полости, м;  $x = \tau/E$ ;  $\tau$  – максимальные касательные напряжения.

Радиус камуфлетной полости определяется из формулы:

$$R_K = R_0 0,55(\sqrt{2}\varepsilon_{\text{вв}} / E)^{2/5} f(x), \quad (5.11)$$

где  $f(x) = \{x + 1,83[1 - 1,35x + 0,25x^{3/4}]x^{3/4}\}^{-2/5}$ ;  $\beta_{\text{вв}}$  – начальная плотность  $BB$  (в пересчете на объем 1 пог. м скважины), кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_{\text{вв}}$  – массовая плотность энергии заряда (для аммонита  $\varepsilon = 4,187 \cdot 10^6$  Дж/кг);  $R_0$  – радиус скважины, м.

Расчеты показывают, что в пределах вероятных колебаний прочностных и упругих свойств мерзлых пород россыпных месторождений  $\tau = (6,7...22) \cdot 10^5$  Па и  $E = (3,2...3,5) \cdot 10^{10}$  Па радиусы зоны трещинообразования и камуфлетной полости составляют  $R_T = (20...40)R_K$ ,  $R_K \leq (3,7...5,6)R_0$ .

В расчетах по формуле (5.11) использованы данные по определению скорости распространения упругих продольных волн и известное соотношение

$$\mathcal{G} = \sqrt{E(1-\nu) / \rho_0(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (5.12)$$

где  $\nu = 0,25$  – коэффициент Пуассона;  $\rho_0$  – объемная масса пород.

Таким образом, при оттаивании полигона взрывогидравлическим способом в массиве возможно создание неоднородных фильтрационных каналов с размерами зон трещинообразования  $R_T = (75...22)R_0$  или при бурении скважин диаметром 200 мм – от 7 до 22 м. Однако эффективный радиус зоны трещинообразования (радиус зоны проницаемости  $R_n$ ), в пределах которой возможна фильтрация воды по трещинам, незначителен и не превышает  $(3...5)R_K$  или 1,1...2,8 м.

Это подтверждается также исследованиями ЛГИ и ВНИИ-1 на прииске «Экспериментальный», которые показывают, что радиус зоны трещинообразования  $R_T$  изменяется от 6,6 до 9,3 радиусов сферического заряда при расчетной  $R_T = (7,6...20)R_0$ , а зона камуфлетной полости  $R_K$  – от 1,3 до 3,5  $R_0$  при расчетной  $R_K = (2...9,5)R_0$ .

В пределах зоны трещиноватости коэффициент фильтрации убывает, вероятно, экспоненциально в радиальном направлении от поверхности камуфлетной полости до границ зоны проницаемости.

Определение интегральной водопроницаемости такого канала сложно и требует специальных исследований. Из формулы (5.9) следует, что радиус фильтрационного канала  $R_I \leq 1$  м возможен при расстоянии между скважинами не более 1,1...5,2 м.

На рис. 5.5 показана зависимость относительного радиуса оттаивания  $R_2/R_1$  от времени и гидравлической проводимости  $K_\phi/l_k$  фильтрационного канала.

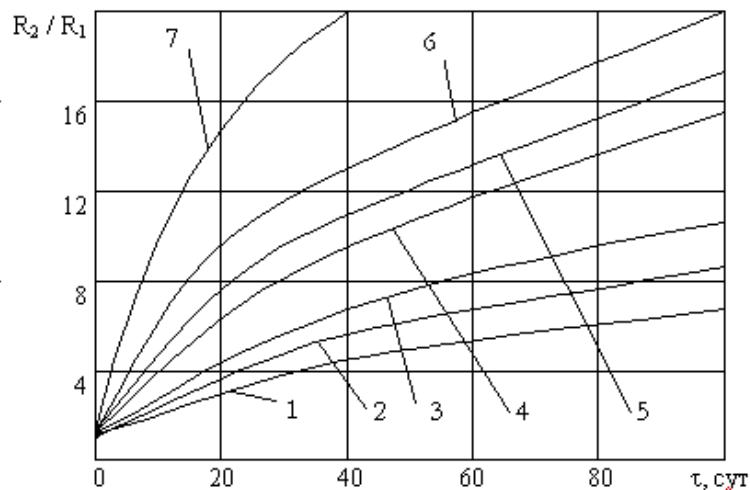


Рис. 5.5. Изменение относительного радиуса зоны оттаивания  $R_2 / R_1$  во времени  $\tau$  при гидравлической проводимости  $K_\phi / l_k$ , равной: 1 – 3; 2 – 4; 3 – 5; 4 – 10; 5 – 15; 6 – 20; 7 – 50.

Как видно, расстояние между рядами скважин при длительности оттаивания 100 суток превышает 6...8 диаметров фильтрационного канала. Следовательно, при среднем расстоянии между скважинами 3,5 м, обеспечивающем фильтрационный канал  $R_I = 1$  м, допустимое расстояние между рядами скважин не должно превышать 12...16 м при льдистости 250 кг/м<sup>3</sup>.

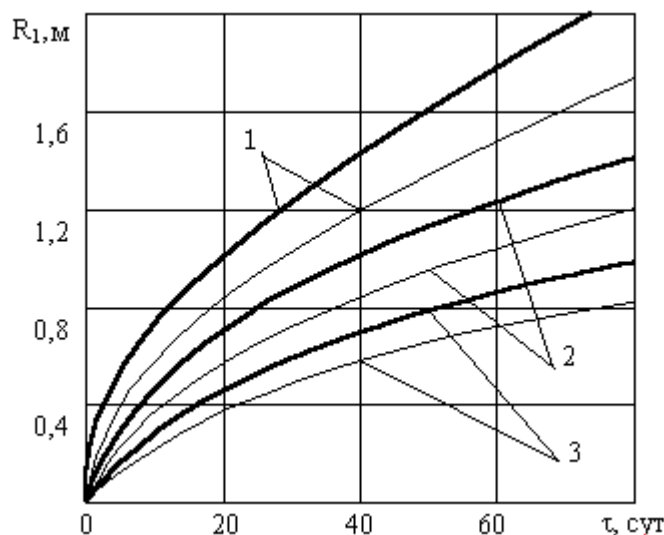
Практический интерес представляет возможное перемерзание канала при нарушении гидравлической связи и прекращении фильтрации. Время замерзания пород в зоне  $(R_2 - R_I)$  определяется по формуле Стефана для бесконечного цилиндра в среде с постоянной температурой  $t_{II}$ :

$$\tau_s = \left[ \left( R_1 / R_2 \right)^2 \left( \ln \frac{R_1}{R_2} + 1/2 \right) + 1/2 \right] Q_\phi R_2^2 / 2\lambda_{II} t_{II} . \quad (5.13)$$

Время замерзания пород в фильтрационном канале определится из формулы (5.13), если положить  $R_1 = 0, R_2 = R_1$

$$\tau_{zo} = Q_{\phi} R_1^2 / 4\lambda_{\Pi} t_{\Pi} . \quad (5.14)$$

Расчеты по (5.14) показали, что продолжительность замерзания пород в канале  $R_1 = 1,0$  м колеблется от 20 до 110 суток при изменении льдистости пород от 200 до 250 кг/м<sup>3</sup> и температуры массива от минус 1,0 до минус 4,0 °С (рис. 5.6.). Это время будет несколько больше, если учесть продолжительность замерзания камуфлетной полости.



**Рис. 5.6.** Время замерзания пород  $\tau$  в фильтрационном канале радиусом  $R_1$  (при  $V_{\phi} = 0$ ): ——— - льдистость 200 кг/м<sup>3</sup>; ——— - льдистость 250 кг/м<sup>3</sup>; 1 -  $t_n = -1$  °С; 2 -  $t_n = -2$  °С; 3 -  $t_n = -4$  °С

В 1977-1978 гг. на полигоне драги 166 (россыпь Дарасун, Забайкалье) были проведены опытные работы по взрывогидравлическому способу оттаивания, которые подтвердили реальность предложенной схемы расчета и заметное ускорение пород на расстоянии до 4 м от центра фильтрационного канала. При испытаниях выявились недостатки способа, которые были особенно заметны в условиях россыпи р. Олга (Софийский прииск) весной 1979 г.: промерзание каналов при взрывании в породах с температурой ниже минус 2,0 °С; преждевременное обрушение стенок скважин из-за таяния снега, льда и пород на дневной поверхности. Поэтому необходимо обуривать массив зимой, а взрывание осуществлять с наступлением положительных температур воздуха. В дальнейшем взрывогидравлический способ оттаивания был усовершенствован (А.с. №1226887) путем создания зон проницаемости внутри мерзлого массива гидроразрывом пород (рис. 5.7).

### Расчет оттаивания сезонно-мерзлых пород паром

Для раннего пуска драги в весенний период года на дражных разработках россыпных месторождений применяется игловая парооттайка

сезонно-мерзлых горных пород с использованием перегретого пара, поступающего в скважины от парового котла, установленного на драге (в последнее время для повышения безопасности выполнения подготовительных работ оттаивание мерзлых пород паром заменяют оттайкой подогретой водой).

Сущность пароттайки заключается в том, что в скважины глубиной 0,8...1,0 м устанавливаются иглы. Пар подводят к иглам по утепленному трубопроводу под давлением 0,8... 0,55 МПа. Длина трубопровода составляет 100...300 м [12].

Постепенно, по мере оттаивания пород, иглы осаживают в скважинах до заданной глубины.

Обычно в работе находятся 40...70 паровых игл. На одну иглу должно приходиться не менее 1,4 м<sup>2</sup> площади нагрева котла.

Игла для подачи пара изготавливается из пустотелой буровой стали У-7 диаметром 28...32 мм. Цилиндрический канал в игле имеет диаметр 9...12 мм [4, 12].

Иглы устанавливают в скважины на расстоянии 2,5...3,5 м по прямоугольной сетке. Одна паровая игла оттаивает 20...50 м<sup>3</sup> сезонно-мерзлых пород при продолжительности ее работы 20...70 ч.

Удельные затраты пара составляют 50...80 кг / м<sup>3</sup> при удельной теплоте пара 95...125 МДж / м<sup>3</sup> или 25...35 кВт·ч / м<sup>3</sup>. КПД паровых игл низкий. Теряется 30...40 % начального тепла пара [12, 13].

Расход угля при работе парового котла определяется теплотворной способностью угля и КПД. Обычно на оттаивание 1 м<sup>3</sup> мерзлых горных пород расходуется 7...12 кг угля, т.е. КПД равен 50 %.

В соответствии с правилами безопасности для выполнения работ по оттайке мерзлых пород паром допускаются специально подготовленные лица [12].

Запрещается снимать парозапорные вентили, заглушки и подключать трубы, присоединять или снимать шланги под давлением пара. Запрещается присоединять паровые иглы к магистрали и шлангам, имеющим трещины.

Обслуживающему персоналу необходимо знать порядок оказания помощи при ожогах паром и кипятком.

### **Пример №8**

Рассчитать объем работ и параметры игловой пароттайки для обеспечения подготовки мерзлых горных пород к разработке 250 литровой драгой.

Время оттаивания с 20 мая по 25 июня ( $T_{от} = 36$  сут). Мощность рыхлых отложений составляет  $h = 10$  м.

Годовая производительность драги  $Q_d = 800\ 000$  м<sup>3</sup> / год. Количество рабочих дней, когда драга находится в работе (продолжительность чистого времени работы драги в году), составляет  $T = 140$  сут. Породы песчано-галечные.

Льдистость пород  $G = 150$  кг / м<sup>3</sup>. Температура мерзлых пород  $t_m = -5$  °С. Глубина промерзания горных пород составляет  $h_{пр} = 3,5$  м.

Решение:

1. Среднесуточная производительность драги ( $P_{\text{д.с.}}$ , м<sup>3</sup> / сут) зависит от продолжительности промывочного сезона и определяется по формуле

$$P_{\text{д.с.}} = Q_{\text{д}} / T. \quad (3.61)$$

$$P_{\text{д.с.}} = 800\,000 / 140 = 5714 \text{ м}^3 / \text{сут.}$$

2. В холодный период (ранний пуск драги весной) среднесуточная производительность драги снижается и определяется с учетом сезонного коэффициента:

$$P_{\text{д.в.}} = P_{\text{д.с.}} \times K_c, \quad (3.62)$$

где  $K_c$  – коэффициент, учитывающий снижение производительности драги в период ее весеннего сезона работы,  $K_c = 0,7 \dots 0,9$ .

Принимаем  $K_c = 0,7$ . Тогда

$$P_{\text{д.в.}} = 5714 \cdot 0,7 = 3\,999 \text{ м}^3 / \text{сут.}$$

3. Переходящий от прошлого года объем готовых к выемке запасов ( $V_{36}$ , тыс.м<sup>3</sup>) определяется по формуле

$$V_{36} = T_{\text{от}} \times P_{\text{д.в.}}. \quad (3.63)$$

Тогда 
$$V_{36} = 36 \cdot 3999 = 143,9 \text{ тыс. м}^3.$$

4. Площадь участка дражного полигона с переходящим объемом готовых к выемке запасов ( $S_{36}$ , тыс. м<sup>2</sup>) равна:

$$S_{36} = V_{36} / h, \quad (3.64)$$

$$S_{36} = 143,9 / 10 = 14,39 \text{ тыс. м}^2.$$

5. Объем пород сезонного промерзания или необходимый объем парооттайки ( $V_{\text{np}}$ , тыс. м<sup>3</sup>) составит:

$$V_{\text{np}} = h_{\text{np}} \times S_{36}. \quad (3.65)$$

$$V_{\text{np}} = 3,5 \cdot 14,39 = 50,365 \text{ тыс. м}^3.$$

6. Глубина погружения игл подающих пар в скважины ( $h_{\text{игл}}$ , м) определяется по формуле

$$h_{\text{игл}} = 0,85 \times h_{\text{np}}. \quad (3.66)$$

$$h_{\text{игл}} = 0,85 \cdot 3,5 = 3,0 \text{ м.}$$

7. Шаг установки паровых игл (расстояние между скважинами в ряду и между рядами скважин) составляет  $L_{\text{игл}} = 2,5 \dots 3,0$  м.

8. Объем породы, оттаиваемый одной паровой иглой ( $V_n$ , м<sup>3</sup>), определяется по формуле

$$V_n = 0,87 \times L_{\text{игл}}^2 \times h_{\text{игл}}. \quad (3.67)$$

Для расчетов принимаем  $L_{\text{игл}} = 3,0$  м. Тогда

$$V_n = 0,87 \cdot 3^2 \cdot 3,5 = 27,4 \text{ м}^3.$$

Обычно одной паровой иглой оттаивают мерзлые породы в объеме  $V_n = 20 \dots 50 \text{ м}^3$ .

Полученная величина  $V_n = 27,4 \text{ м}^3$  не выходит из рекомендуемого диапазона.

9. Расход пара на одну иглу ( $P_n$ , кг) определяется по формуле

$$P_n = V_n \times Q_{y\partial} / (L_n \times k_u), \quad (3.68)$$

где  $Q_{y\partial}$  – удельные затраты теплоты на оттаивание  $1 \text{ м}^3$  мерзлой породы (см. табл. 3.34, формула 3.10),  $Q_{y\partial} = 70900 \text{ кДж} / \text{м}^3 = 70,9 \text{ МДж} / \text{м}^3$ ;

$L_n$  – теплота парообразования,  $L_n = 2250 \text{ кДж} / \text{кг} = 2,25 \text{ МДж} / \text{кг}$ ;

$k_u$  – коэффициент использования тепла,  $k_u = 0,8$ .

Тогда расход пара на оттаивание мерзлого объема породы одной иглой составит:

$$P_n = 27,4 \cdot 70,9 / (2,25 \cdot 0,8) = 1\,079 \text{ кг}.$$

10. Продолжительность работы паровой иглы ( $T_{игл}$ , ч) определяется по формуле

$$T_{игл} = P_n / \rho, \quad (3.69)$$

где  $\rho$  – удельный расход пара одной иглой, для галечно-гравийных пород  $\rho = 20 \dots 30 \text{ кг} / \text{ч}$ ; для илисто-глинистых –  $10 \dots 20 \text{ кг} / \text{ч}$ .

$$T_{игл} = 1\,079 / 25 = 43 \text{ ч, или } 43 / 24 = 1,8 \text{ сут.}$$

11. Возможное число одновременно работающих игл ( $N_o$ , шт.), исходя из паропроизводительности дражного котла ( $P_k = 2000 \dots 2500 \text{ кг} / \text{ч}$ ), определяется по формуле

$$N_i = D_e / \rho; \quad (3.70)$$

$$N_o = 2\,500 / 25 = 100 \text{ шт.}$$

12. Необходимое число паровых игл для обеспечения оттаивания сезонно-мерзлых горных пород на участке дражного полигона определяется по формуле

$$N_{игл} = V_{np} / V_n. \quad (3.71)$$

$$N_{игл} = 50\,365 / 27,4 = 1\,838 \text{ шт.}$$

13. Число перестановок комплекта паровых игл, находящихся в одновременной работе ( $\Pi$ , ед.) за весь период оттаивания сезонно-мерзлого участка определяется по формуле

$$\Pi = N_{игл} / N_o. \quad (3.72)$$

$$\Pi = 1\,838 / 100 = 18 \text{ перестановок.}$$

14. Уточненное время оттаивания сезонно-мерзлого участка дражного полигона определяется по формуле

$$T_{от}^I = \Pi \times T_{игл}. \quad (3.73)$$

$$T_{от}^I = 18 \cdot 1,8 = 33 \text{ сут.}$$

### Задание для самостоятельной работы №8

Выполнить расчет пароигловой оттайки мерзлых горных пород.  
Температура мерзлых пород  $t_m = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Породы песчано-галечные.  
Остальные исходные данные представлены в табл. 3.23.

Таблица 3.23

#### Исходные данные к расчету параметров игловой парооттайки

Номер вар и- анта	Глубина оттаива- ния, $h_{np}$ , м	Производител ьность драги за сезон, $A$ , тыс. м <sup>3</sup> /год	Льдистос ть породы, $G$ , кг / м <sup>3</sup>	Глубина россыпи, $h$ , м	Продолжител ьность дражного сезона $T$ , сут	Период парооттайки	
						начало	окончан ие
1	3,0	900	100	7,0	160	15.03	01.05
2	3,4	550	350	8,5	140	20.03	25.04
3	3,5	650	250	9,0	165	20.03	10.05
4	2,8	800	150	10,0	150	30.03	01.06
5	3,3	950	100	7,5	145	01.04	15.05
6	3,2	850	150	8,5	155	05.04	10.05
7	3,6	500	200	9,5	160	10.04	20.05
8	3,8	600	250	10,5	145	15.04	31.05
9	3,1	700	150	9,0	135	20.04	27.05
10	4,0	800	100	8,0	140	25.04	29.05
11	3,7	950	100	10,0	155	05.05	15.06
12	3,9	750	200	9,0	150	12.05	25.06