

## Лекция. Расчёт параметров игловой гидрооттайки

Игловая гидрооттайка – наиболее трудоемкий способ оттаивания мерзлых пород, включающий два основных процесса: установка гидроигл и нагнетание в них воды.

Перед проведением игловой гидрооттайки осуществляют подготовительные работы, включающие полное удаление растительного и илистого слоя до галечников, планировку поверхности, на которой будет производиться оттайка, проведение выработок водозабора и водоотведения, осушение оттаиваемого полигона.

Вода в каждую иглу подается из специальных распределителей. Ее количество регулируется специальной задвижкой. Подаваемая в иглы вода должна быть чистой и не должна содержать взвесей более 50 мг/л. Продолжительность подачи воды в иглы зависит от температуры воды в водоеме из которого ее подают. Продолжительность действия иглы ( $T$ , сут) определяется по формулам [4, 12]:

$$T = \frac{0,866 \times L^2 \times H_0 \times Q_{уд}}{c_e \times \rho_B \times W \times \eta_{\ddagger} \times t_B \times 24}; \quad (3.39)$$

$$T = \frac{0,895 \times b^{2,234} \times \left(\frac{i}{W}\right)^{0,707} \times (0,11H_0 + 1) \times e^{0,02(t_B - 10)}}{t_B}, \quad (3.40)$$

где  $L$  – шаг установки игл, м;

$H_0$  – глубина оттаивания, м;

$Q_{уд}$  – затраты тепла на нагревание и оттаивание 1 м<sup>3</sup> пород, кДж/м<sup>3</sup>;

$c_e$  – удельная теплоёмкость воды,  $c_e = 4,187$  кДж / (кг °С),

$\rho_B = 1000$  кг / м<sup>3</sup> – плотность воды;

$W$  – расход воды на иглу, м<sup>3</sup> / ч;

$t_e$  – температура нагнетаемой в иглу воды, °С;

$K_{\sigma}$  – средний за время действия иглы коэффициент относительной боковой теплоотдачи воды восходящего фильтрационного потока в талике цилиндрической формы, рассчитывают через критерий теплового подобия Фурье, по приближенным формулам или принимают по справочным данным (см. Потемкин, 1991, табл.3, стр.15), в приближенных расчетах принимают  $K_{\sigma} = 0,4 \dots 0,5$ .

Затраты тепла на нагревание и оттаивание 1м<sup>3</sup> пород определяют по формуле (3.34) или по табл. 3.10.

В формуле (3.40) параметр  $b$  принимается в зависимости от шага игл (см. Потёмкин, 1991, с.79).

После определения продолжительности действия иглы рассчитывают:

- годовую производительность иглы, м<sup>3</sup> / сезон [2, 12, 14]

$$P_u = 0,866 \times L^2 \times H_o, \quad (3.46)$$

$$P_u = 0,866 \times L^2 \times H_o; \quad (89)$$

- общее число игл [4,6]

$$N_{\text{общ}} = \frac{1,15 \times S}{L^2}; \quad (90)$$

- число одновременно работающих игл (при  $T = 0,5 T_{\text{общ}}$ ) [4]

$$N_o = \frac{T \times (N_{\text{общ}} - N_{\text{пр}})}{(T_{\text{общ}} - T)}, \quad (91)$$

если  $T > 0,5 T_{\text{общ}}$ , то  $N_o = N_{\text{общ}} - N_{\text{пр}}$ ;

- производительность насосной станции (м<sup>3</sup>/ч)

$$W_H = N_o \cdot W \quad (92)$$

- суммарный расход воды на оттаивание пород участка (м<sup>3</sup>)

$$W_o = 24 W \cdot T \cdot N_{\text{общ}}, \quad (93)$$

где  $S$  - площадь оттаиваемого участка, м<sup>2</sup>;  $N$  - число игл, для которых бурение и оттаивание пород производилось в прошлом сезоне;  $T_{\text{общ}}$  - продолжительность всего сезона оттаивания (тёплый период), сутки.

Для технико-экономического обоснования удельного расхода воды на иглу необходимо вычислить затраты на погружение игл и затраты на нагнетание воды через иглы.

Затраты на бурение определяют по формуле

$$Z_b = N_{\text{общ}} \times H_b \times \left[ \frac{c_b + A}{(P_b \times T_{\text{общ}} \cdot 24)} \right], \quad (94)$$

где  $H_b$  - глубина бурения (обычно  $H_b = H_o - 1,5$ ), м;  $c_b$  – себестоимость бурения (включает заработную плату бурильщиков, стоимость изношенных игл и буровых коронок), р/м;  $A$  - затраты на ремонт и амортизацию бурового станка, р/год;  $P_b$  - средняя за сезон производительность бурового станка, м/ч.

Затраты на нагнетание воды определяют по формуле (р/год)

$$Z_H = c_w \times W_o + 24 \times c_T \times T_{\text{общ}} + Z_M, \quad (95)$$

где  $c_w$  - себестоимость нагнетания воды в иглы (включая затраты на электроэнергию для насосов, смазочные материалы, замену изношенных деталей), р/м<sup>3</sup>;  $c_T$  - расходы на заработную плату

персонала, обслуживающего насосную станцию, систему водоснабжения и действующие иглы, р/ч;  $Z_m$  - затраты на монтаж и демонтаж насосного оборудования, магистральных и распределительных трубопроводов, р/год.

Суммарные и удельные затраты определяют по формулам:

$$Z = Z_6 + Z_n, \quad (96)$$

$$Z_{уд} = \frac{Z}{(S \times H_0)}. \quad (97)$$

Расчёты выполняют для нескольких вариантов расхода воды через иглу - обычно в диапазоне  $W = 0,5 - 3,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . При этом руководствуются следующими указаниями и рекомендациями. В хорошо проницаемых породах с коэффициентом фильтрации более 20 м/сутки увеличение расхода воды сокращает продолжительность действия иглы и повышает суточную производительность оттайки. В слабо проницаемых породах с высоким содержанием глинистых и пылеватых частиц увеличение расхода воды способствует образованию в талике суффозионных каналов, по которым вода-теплоноситель без существенной теплоотдачи выносится из оттаиваемого массива.

Предельно большие расходы назначают в зависимости от коэффициента фильтрации пород и глубины погружения иглы (табл.28).

*Таблица 28*

**Наибольший расход воды на иглу в зависимости от свойств пород и глубины погружения [6]**

Характеристика пород	Коэффициент фильтрации, м/сутки	Наибольший расход при глубине погружения, $\text{м}^3/\text{ч}$
----------------------	---------------------------------	---

		менее 12 м	более 12 м
Суглинки и супеси пылеватые (илистые), однородные с включениями гравия, дресвы гальки, щебня, валунов	менее 3	1,1	1,5
Песок однородный или с гравием и галькой	3 - 8	2,1	2,5
Гравий с песком и галькой	8 - 20	3,6	4,1
Галька с гравием и песком	более 20	не ограничивается	

В неоднородных породах и массивах расход воды назначают с учётом мощности и водопроницаемости слоёв.

Принятый расход не должен превышать пропускную способность иглы (гидравлические расчёты системы водоснабжения выполняют по соответствующим инструкциям и методическим указаниям [6]). Практически предельный расход воды через иглу длиной 10 м при внутреннем диаметре 20 мм не может превышать 2,5 м<sup>3</sup>/ч и при внутреннем диаметре 28 мм пропускная способность иглы той же длины не превышает 4 м<sup>3</sup>/ч.

### ПРИМЕР 7.

Определить технико-экономические показатели гидроигловой оттайки мерзлых горных пород, если средняя температура воды  $t_v = 10$  °С, площадь участка оттайки  $S = 10000$  м<sup>2</sup>, глубина оттаивания  $H_0 = 8$  м, содержание льда в породе (льдистость)  $G = 250$  кг/м<sup>3</sup>, температура мёрзлых пород  $t_m = - 2,0$  °С, продолжительность тёплого периода  $T_{общ} = 2160$  ч (90 суток), шаг иглы  $L = 4,0$  м число предварительно пробуренных игл  $N_{пр} = 10$  % от общего числа  $N_{общ}$ ,

производительность бурового станка  $P = 1,5$  м/ч, себестоимость бурения  $c = 100$  р/м, себестоимость нагнетания  $1\text{ м}^3$  воды  $c_w = 40$  р/м<sup>3</sup>, амортизация и ремонт бурового станка  $A = 400$  тыс. р/год, повременные затраты на водоснабжение участка (зарплата персонала)  $c_T = 1000$  р/ч, затраты на монтаж-демонтаж оборудования  $Z_M = 750$  тыс.р/сезон.

### Решение

1. Затраты тепла на нагревание и оттаивание  $1\text{ м}^3$  пород (формула 74)

$$Q_{уд} = 0,8 \times 2650 \times \left( \frac{1-250}{917} \right) \times \left( \frac{0,5}{10^{*} + 2,0} \right) + 250 \times \left( \frac{0,5}{10^{*} \times 4,187 + 2,0 \times 2,26 + 333,6} \right) =$$

$$= 100558 \text{ к Дж/м}^3$$

\*) - температуру талых пород  $t_m$  можно принимать по соотношению  $t_m = \frac{(0,4 - 0,5)}{t_B}$ .

2. Продолжительность действия иглы:

- по формуле (87)

$$T = \frac{0,866 \times 4^2 \times 8 \times 100588}{4,187 \times 1000 \times 0,5 \times 0,45 \times 10 \times 24} = 49,35 \text{ с ул}$$

- по формуле (88)

$$T = \frac{(0,895 \times 4,7) \times \left( \frac{250}{0,5} \right)^{0,707} \times (0,11 \times 8,0 + 1) \times 2,718^{\left[ \left( \frac{0,02}{10} \right)^{-10} \right]}}{10} = 64 \text{ суток}$$

3. Производительность иглы (формула 89)

$$P_{и} = 0,866 \times 4^2 \times 8 = 111 \text{ м}^3/\text{сезон.}$$

4. Общее число игл (формула 90)

$$N_{общ} = \frac{1,15 \times 10000}{4^2} = 719 \text{ игл.}$$

5. Число одновременно работающих игл (формула 91)

$N_o = 719 - 72 = 647$  игл (так как  $T = 50$  или  $T = 64$  суток, т.е. более  $0,5 \times 90 = 45$  суток).

6. Производительность насосной станции (формула 92)

$$W_n = 647 \times 0,5 = 324 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

7. Суммарный расход воды на оттаивание пород участка (формула 93)  $W_o = 24 \times 0,5 \times 50 \times 719 = 431400 \text{ м}^3$ , или  $W_o = 24 \times 0,5 \times 64 \times 719 = 552200 \text{ м}^3$ ,

8. Затраты на бурение (формула 94)

$$Z_b = 719 \cdot (8 - 1,5) \cdot \left[ \frac{1000 + 400000}{(1,5 \cdot 90 \cdot 24)} \right] = 5,25 \text{ млн.р.}$$

9. Затраты на нагнетание воды (формула 95)

$$Z_n = 40 \cdot 431400 + 24 \cdot 1000 \cdot 90 + 750000 = 20,17 \text{ млн. р,}$$

$$\text{или } Z_n = 40 \cdot 522200 + 24 \cdot 1000 \cdot 90 + 750000 = 25,00 \text{ млн. р.}$$

10. Суммарные затраты (формула 96)

$$Z = 5,25 + 20,17 = 25,42 \text{ млн. р,}$$

$$\text{или } Z = 5,25 + 25,00 = 30,25 \text{ млн. р.}$$

11. Удельные затраты (формула 97)

$$Z_{уд} = \frac{25,42 \cdot 10^6}{(8 \cdot 10000)} = 318 \text{ р/м}^3,$$

$$\text{или } Z_{уд} = \frac{30,25 \cdot 10^6}{(8 \cdot 10000)} = 378 \text{ р/м}^3.$$

Аналогично выполнены расчёты для расходов воды  $W = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Результаты расчётов приведены в табл.29.

Таблица 29

**Основные технико-экономические показатели гидрооттайки \*)**

**( $S = 10 \text{ тыс.м}^2$ ,  $H_o = 8 \text{ м}$ ,  $G = 250 \text{ кг/м}^3$ ,  $t_b = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{общ} = 90 \text{ суток}$ )**

Показатели	Расход воды (W), м <sup>3</sup> /ч				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Продолжительность действия иглы (T),	<u>50</u>	<u>25</u>	<u>17</u>	<u>13</u>	<u>10</u>

сутки	64	39	29	24	21
Число одновременно действующих игл (N <sub>0</sub> ), шт	<u>647</u> 647	<u>249</u> 495	<u>145</u> 308	<u>103</u> 235	<u>81</u> 197
Производительность насосной станции (W <sub>н</sub> ), м <sup>3</sup> /ч	<u>324</u> 324	<u>249</u> 495	<u>217</u> 461	<u>206</u> 470	<u>202</u> 492
Суммарный расход воды на оттаивание пород участка (W <sub>0</sub> ), тыс. м <sup>3</sup>	<u>431</u> 552	<u>431</u> 673	<u>431</u> 751	<u>431</u> 828	<u>431</u> 906
Затраты на бурение (З <sub>б</sub> ), млн.	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
Затраты на нагнетание воды (З <sub>н</sub> ), млн.р	<u>20,17</u> 25,00	<u>20,17</u> 29,83	<u>20,17</u> 32,95	<u>20,17</u> 36,03	<u>20,17</u> 39,15
Суммарные затраты на гидрооттайку (З), млн. р	<u>25,42</u> 30,25	<u>25,42</u> 35,08	<u>25,42</u> 38,20	<u>25,42</u> 41,28	<u>25,42</u> 45,61
Удельные затраты (З <sub>уд</sub> ), р/м <sup>3</sup>	<u>318</u> 378	<u>318</u> 453	<u>318</u> 493	<u>318</u> 531	<u>318</u> 570

\*) – в числителе результаты расчетов с использованием формулы (87), в знаменателе – формулы (88)

Расчёты показывают, что использование формулы (87) по сравнению с формулой (88) занижает продолжительность действия иглы, число одновременно действующих игл и требуемую производительность насосной станции, не позволяет выявить зависимость суммарных и удельных затрат от расхода воды. Эта зависимость обусловлена уменьшением коэффициента боковой теплоотдачи при увеличении расхода воды через иглу. Поэтому при расчётах целесообразно коэффициент теплоотдачи определить по формуле

$$K_6 = 0,052 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot H_0}{W}}, \quad (98)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность талых водо-насыщенных пород Вт/(м °С).

Как видно из расчётов (по формуле 88) минимальные затраты на гидрооттайку достигаются при наименьших расходах воды, но при этом необходимо иметь большое количество одновременно действующих игл (например, при  $W = 0,5$  м<sup>3</sup>/ч - 647 игл, а при  $W = 2,5$  м<sup>3</sup>/ч - 197 игл), что повлечёт увеличение затрат, фактически не отражённых в формуле (94).

## Практическая работа № 7

Выполнить расчет гидроигловой оттайки мерзлых горных пород. Исходные данные представлены в табл.30, 31. Температуру мерзлых пород и продолжительность тёплого периода принять по данным табл. 16. Льдистость – по табл. 22. При использовании формулы (98) коэффициент теплопроводности талых водонасыщенных пород принимать по результатам задачи №1 для соответствующего варианта.

*Таблица 30*

### Исходные данные к расчету параметров игловой гидрооттайки

№ варианта	Глубина оттаивания $H_0$ , м	Шаг иглы $L$ , м	Расход воды $W$ м <sup>3</sup> /ч	Температура воды $t_b$ , °C	Площадь участка $S$ , тыс. м <sup>2</sup>	Число предварительно пробуренных игл $N_{пр}$ , % от общего числа их $N_{общ}$
1	4	2,0	0,8	11,0	40	10
2	5	2,5	1,8	10,5	50	15
3	6	3,0	0,9	9,8	60	12
4	7	3,5	2,0	10,1	70	15
5	8	4,0	1,1	9,8	80	14
6	9	4,5	2,2	9,5	90	16
7	10	5,0	2,3	8,5	100	20
8	11	5,5	2,4	8,1	55	10
9	12	6,0	2,5	9,2	45	17
10	14	6,5	2,6	12,0	35	10
11	10	5,5	2,7	11,9	30	15
12	20	7,5	2,8	10,2	110	10

Затраты на монтаж оборудования в вариантах принимать пропорционально объёму оттаиваемых пород на участке

$$Z_m = 10 \cdot H_0 \cdot S, \text{ р/сезон} \quad (99)$$

Например, для варианта №3

$$Z_m = 10 \cdot 6 \cdot 60000 = 3600000, \text{ р/сезон.}$$

*Таблица 31*

### Исходные данные к расчету технико-экономических показателей

### гидрооттайки

№ варианта	Производительность бурового станка $P_6$ , м/ч	Себестоимость бурения $c_6$ , р/м	Себестоимость нагнетания $c_w$ , р/м <sup>3</sup>	Повременные затраты $c_T$ , р/ч	Амортизация и ремонт $A$ , р/год
1	1,0	500	10	800	200000
2	1,1	600	15	900	250000
3	1,2	700	20	1000	300000
4	1,3	800	25	1100	350000
5	1,4	900	30	1200	400000
6	1,5	1000	35	1300	450000
7	1,6	1100	40	1400	500000
8	1,7	1200	45	1500	550000
9	1,8	1300	50	1600	600000
10	1,9	1400	55	1700	650000
11	2,0	1500	60	1800	700000
12	2,1	1600	65	1900	750000
13	2,2	1700	70	2000	800000
14	2,3	1800	75	2100	850000