

РСФСР
МАГАДАНСКИЙ СОВЕТ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЗОЛОТА И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

ВНИИ-1

В. Г. ГОЛЬДТМАН

**Особенности оттаивания слабопроницаемых
грунтов водяными иглами**



МАГАДАН

1960

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. А. ШИЛО (главный редактор),
Б. М. АБРАМОВ, П. П. АЛЕКСАНДРОВ, В. П. БЕРЕЗИН, В. В. ВЕСЕЛОВ,
А. В. ЗИЛЬБЕРМИНЦ, М. А. ИГНАТЕНКО, М. В. КАНЮКОВА, Г. Г. КУЗНЕЦОВ,
Л. П. МАЦУЕВ, С. В. ПОТЕМКИН (зам. гл. редактора),
Л. В. ФИРСОВ (отв. секретарь), Л. А. ШАХНАРОВИЧ

Вальтер Генрихович Гольдтман

Особенности оттаивания слабопроницаемых грунтов водяными иглами

Редактор Л. А. Шахнарович.

Корректор Ю. И. Шкулёв.

АХ—00725.

Подписано к печати 4/VII 1960 г.

Заказ 70. Тираж 550.

Формат бумаги $70 \times 108^{1/16}$. Бум. л. 2,75. Печ. л. 3,87. Уч.-изд. л. 3,62. Цена 2 р. 55 к.

Типография ВНИИ-1. Магадан, ул. Сталина, 11.

В. Г. Гольдтман

ОСОБЕННОСТИ ОТТАИВАНИЯ СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ГРУНТОВ ВОДЯНЫМИ ИГЛАМИ

ВВЕДЕНИЕ

Опытные работы, проведенные Магаданским научно-исследовательским институтом в 1958 г. на дражном полигоне в долине р. Чай-Урьи (Сусуманский район Магаданской области), позволили изучить главные особенности процесса оттаивания слабопроницаемых пылевато-супесчаных галечно-щебенистых грунтов. Был исследован характер движения воды-теплоносителя в оттаявшем грунте, определялись условия, от которых зависит теплоотдача этой воды. Выяснено, что в грунтах, характеризующихся малой водопроницаемостью и сохраняющих в талом состоянии некоторую связность, процесс постепенного развития цилиндрического талика вокруг нагнетательной иглы проходит иначе, чем в песчано-гравелистых грунтах, хорошо фильтрующих в талом состоянии воду.

В результате обработки наблюдений за действительными скоростями фильтрации и распределением температур в талике иглы выяснены положения, которыми можно руководствоваться при выборе параметров и режима проведения гидрооттайки на слабопроницаемых грунтах.

Материалы исследований дают возможность обоснованно назначать расход воды через иглу, расстояние между иглами и продолжительность действия иглы при подготовке глинистых грунтов и этим самым обеспечивать минимальную стоимость при достаточной полноте оттаивания.

Публикуемая работа представляет несомненный интерес для гидротехников, мерзлотоведов, гидрогеологов и горняков, решающих задачи применения игловой гидрооттайки.

Опытный участок

Опытный участок для исследований был выделен в пределах полигона драги № 170 на площади, где в предшествующем году производились подготовительные вскрышные работы. Вскрышными работами был удален верхний слой грунтов мощностью 1,5 м, включавший раститель-

ный и торфяно-илистый покров, а также верхнюю часть слоя галечных отложений. Довольно ровный рельеф опытного участка имел общий уклон около 0,01 по падению долины.

В толще рыхлых отложений, которыми сложен участок, выделены три слоя.

Непосредственно под дневной поверхностью здесь залегал галечник русловой фации аллювия р. Чай-Урьи. В его составе валуны диаметром до 300 мм занимают 15%, галька — 40%, гравий — 30% и пылеватый песок, заполняющий поры гравия, — 15%; обломки имеют среднюю степень окатанности. В обломках преобладают алевролиты и мелкозернистые кварцево-полевошпатовые песчаники, реже — глинистые сланцы или изверженные породы. Коэффициент фильтрации галечников близок к 100 м/сутки, их естественная влажность в зоне насыщения — 12%. В пределах опытного участка слой имел мощность от 0,8 до 1,2 м. Грунт этого слоя ко второй декаде июня протаял под влиянием солнечной радиации.

Наибольшее место в толще рыхлых отложений участка занимал слой пылеватосупесчаного галечно-дресвяного грунта, представляющий собой продукт переотложения делювия без существенной сортировки по крупности. По гранулометрическому составу в этом грунте выделяется 40% гравия, 35% гальки, 15% песка и 5% пылеватых зерен. Кроме того, в этом слое встречаются валуны диаметром до 300 мм. Более подробно гранулометрический состав грунта представлен в табл. 1.

Определения производились по пробам весом более 10 кг, которые содержали фракции всех размеров, за исключением валунов (диаметр — более 200 мм). Действующий диаметр d_{10} равен 0,01 мм; $d_{60}=11$ мм; коэффициент неоднородности — 1100. Объемный вес данного грунта при естественной текстуре составляет от 2,2 до 2,3 г/см³, естественная влажность его колеблется от 8,5 до 11,2%; удельный вес грунта — 2,72 г/см³; коэффициент пористости — около 0,38. Это весьма неравномерно проницаемый грунт; в нем линзы практически водоупорного материала перемежаются с линзами водопроницаемого грунта. Лабораторные и послойные полевые определения водопроницаемости показали, что коэффициент фильтрации варьирует между значениями 0,3 и 16 м/сутки, а в большинстве случаев близок к 4 м/сутки.

Таблица 1

**Гранулометрический состав пылеватосупесчаного галечно-дресвяного грунта
опытного участка**

Размер фракций, мм	30	50	50	40	40	20	10	5	5	3	3	2	2	1	1	0,25	0,25	0,05	0,05	0,01	0,01	0,005	0,005	0,001	0,001
	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—

Содержание, % 7,3 3,1 17,9 15,9 11,2 7,5 3,9 3,32 11,0 6,49 2,39 8,81 0,60 0,59

Классы Галька—28,3% Гравий—38,5% Песок—20,82% Пыль—11,20% Глинистые—1,18%

Мощность описанного слоя 5—5,5 м; подошва его залегала на глубине 6 м; ниже шел слой пылеватосупесчаной дресвы элювиального происхождения. В этом грунте содержится 31% пылевой супеси, 44% дресвы, 25% щебня. В нем встречаются отдельные валуны и глыбы пес-

чаника. Естественная влажность грунтов этого слоя колеблется от 6 до 11,2%. Коэффициент фильтрации имеет значения примерно от 0,01 до 5 м/сутки, мощность слоя — 0,8 м.

Толща рыхлых пород покоится на размывтой поверхности наклонных слоев глинистого сланца и песчаника, весьма трещиноватого.

Под обнаженной поверхностью галечников сезонное протаивание распространялось на глубину 1,6—2,5 м. Наиболее глубокому сезонному протаиванию в отдельных местах способствовал фильтрационный поток в верхнем слое. Сезонное протаивание началось 22 мая. Сезоннопротаивающий слой был слитно заморожен с многолетнемерзлой толщей; последняя здесь распространяется на глубину приблизительно 200 м. На глубине 8 м среднегодовая температура пород составляла $-5,5^{\circ}$. Распределение температур по глубине ко времени начала действия водяных игл опытного участка показано в табл. 2. Вся толща мерзлых горных пород до момента оттаивания была насыщена льдом и непроницаема.

Таблица 2

Температура пород вне влияния игл

На 19 июня (по Т-1)		На 29 июня (по Т-3)		На 15 июля (по Т-9)	
Глубина, м	Температура, град.	Глубина, м	Температура, град.	Глубина, м	Температура, град.
1,5	-0,3	2,1	-1,0	1,9	+7,0
2,5	-2,8	3,1	-3,1	2,9	-0,0
3,5	-4,5	4,1	-4,1	3,9	-0,8
4,5	-5,4	5,1	-4,9	4,9	-1,7
5,5	-5,7	6,1	-5,1	5,9	-2,3
6,5	-6,2	7,1	-5,2	6,9	-3,0
7,5	-6,0			7,9	-3,1
8,3	-6,0				

На опытном участке действовало 19 игл, образующих три группы (рис. 1). Центральные иглы каждой группы (И-1, И-2 и И-3) служили для наиболее подробных наблюдений за расходом нагнетаемой воды, ростом образующегося вокруг них талика и характером фильтрации через оттаявший грунт. Вокруг каждой из центральных игл в шести направлениях на определенном расстоянии помещались вспомогательные иглы, которыми воспроизводились условия массовой промышленной гидрооттайки с расстановкой игл по сетке равносторонних треугольников. Действие этих вспомогательных игл исключало из условий опыта потери теплоты от талика центральной иглы на радиально-расходящийся тепловой поток в окружающую мерзлую толщу. Потери такого рода были бы неизбежны из цилиндрического талика одиночной иглы.

Расстояние между иглами в первой группе (вокруг И-1) составляло 8 м, во второй (вокруг И-2) — 6 м, а в третьей — соответственно 4 м. Расположение трех групп игл на опытном участке вдоль горизонтали рельефа, перпендикулярно к направлению фильтрации воды в сезоннопротаивающем слое извлекло от необходимости учета влияния отходящих фильтрационных потоков одной группы игл на поверхностные условия другой.

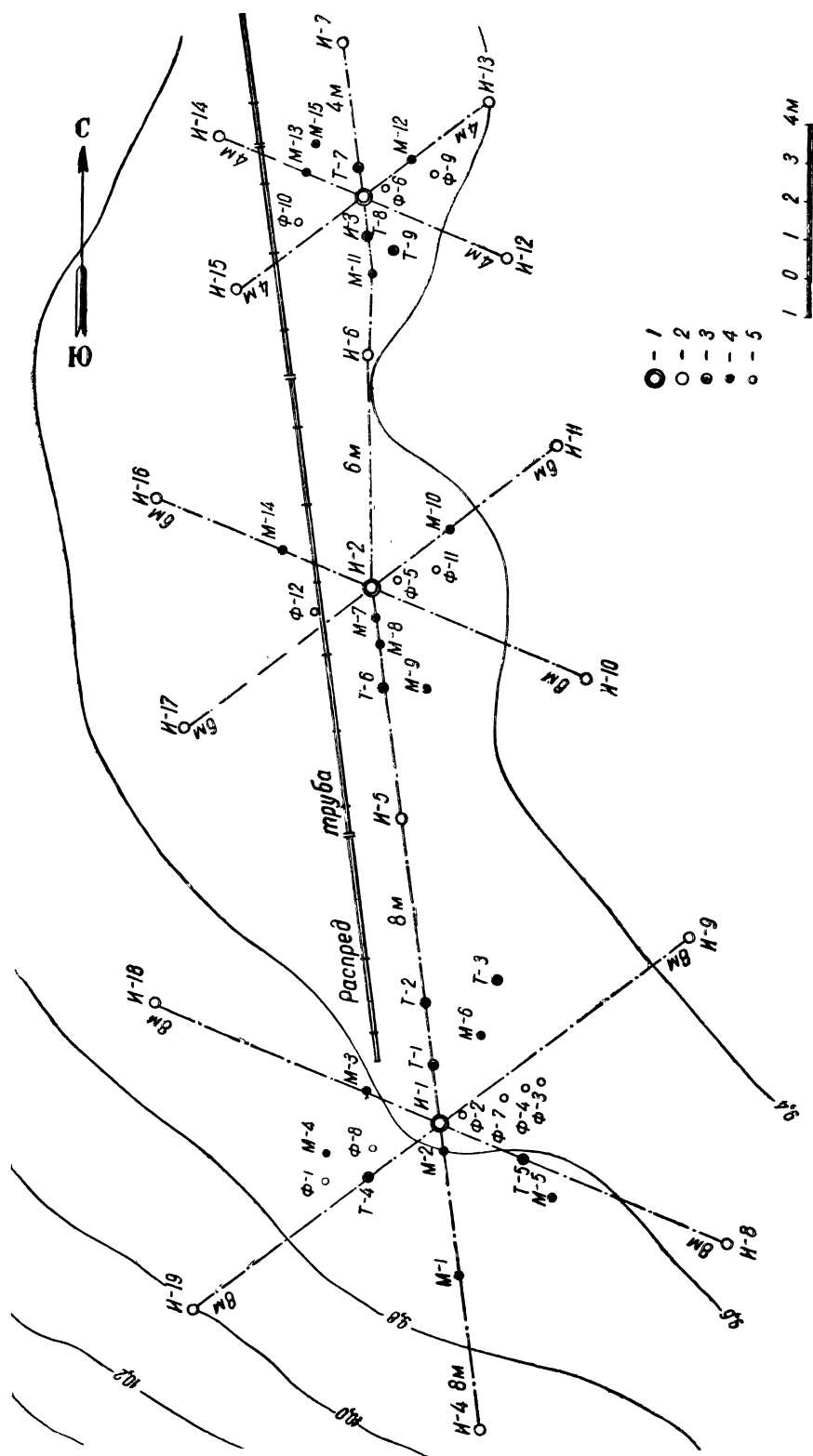


Рис. 1. План расположения нгп и наблюдательных скважин на опытном участке.
 1 — центральная опытная нгла; 2 — вспомогательная нгла; 3 — термометрическая скважина;
 4 — электрометрическая скважина (мерзлотомер); 5 — пьезометр.

Погружение водяных игл производили последовательно, одним буровым станком ГП-1 после окончания бурения и оборудования сети наблюдательных скважин, которыми были зафиксированы начальные температурные условия. Буровое погружение занимало 2—3 час., ежедневно вводилось в действие по две-три иглы: в первую очередь — вдоль нижнего по течению ряда, затем — по среднему и наконец — по верхнему.

Расход воды через иглы систематически учитывался по водомерам и дифманометрам; он по мере необходимости регулировался при помощи вентиля. Следует отметить, что поддержание заданного расхода небольшой величины затруднялось вследствие постепенного засорения проходных отверстий кранов взвесями воды — хвоей и волокнами торфа. Требовалось иногда несколько раз в день доводить расход до заданной величины. Во вспомогательные иглы подавали на 30% меньше воды, чем в соответствующую центральную, с таким расчетом, чтобы развивающиеся талики вспомогательных игл не сливались преждевременно с таликом центральной иглы.

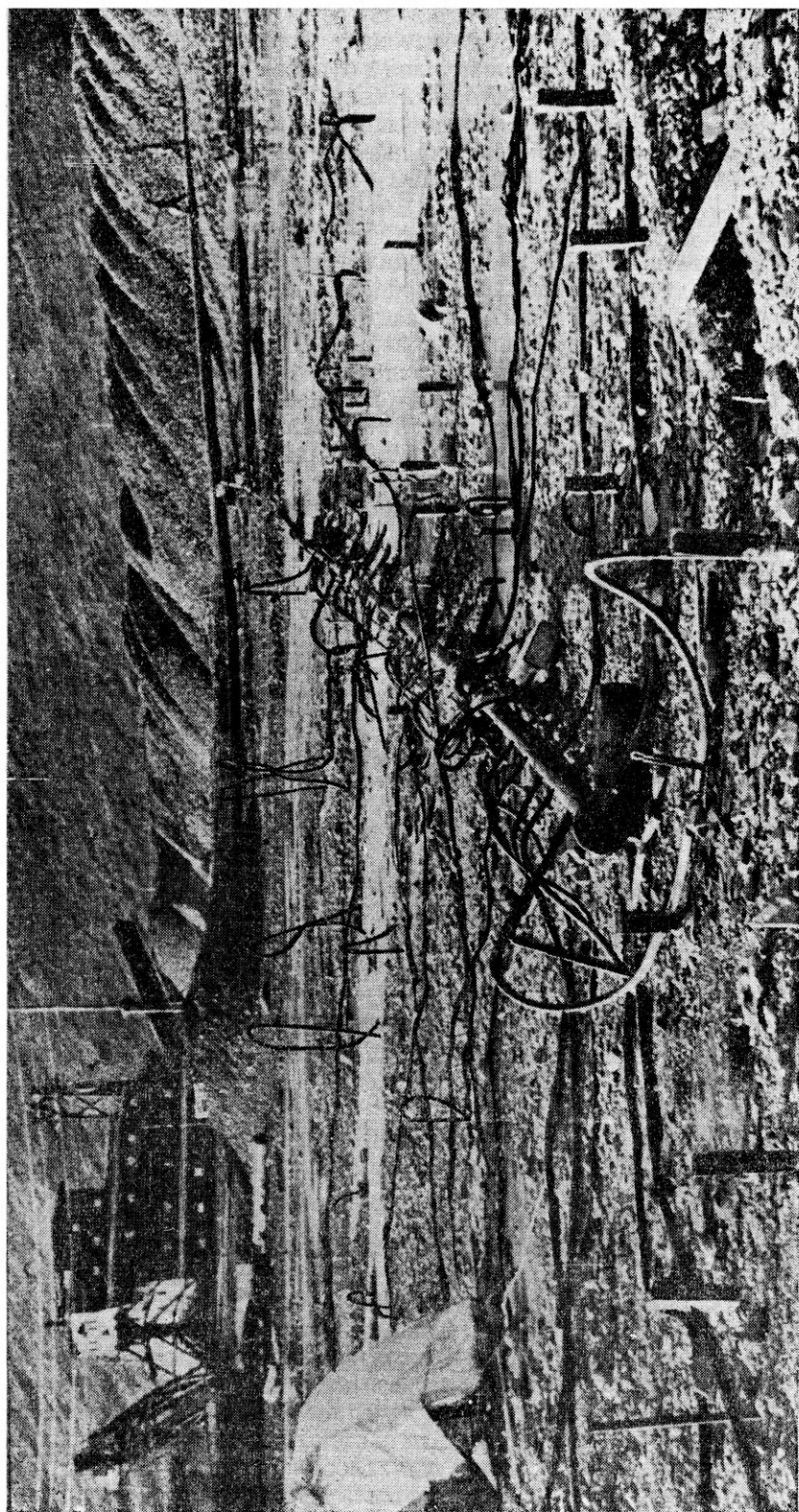
Три центральные иглы различались главным образом по расстоянию до смежных игл, а также по среднему и, что особенно важно, по максимальному расходу воды:

№ иглы	Дата начала действия	Глубина погружения, м	Расстояние до смежных игл, м	Средний расход, м ³ /час	Наибольший среднесуточный расход, м ³ /час
И-1	21 июня	7,4	8	1,35	2,2
И-2	7 июля	7,5	6	0,73	1,0
И-3	10 июля	7,0	4	1,6	3,5

Центральные иглы погружали до верхней границы трещиноватых сланцев и песчаников, даже несколько глубже — на 0,3 м в толщу последних, — вспомогательные иглы — на меньшую глубину — около 6,5 м.

Иглы опытного участка (рис. 2) снабжались водой из распределительной трубы диаметром 150 мм и длиной 120 м, отведенной от головной части магистрального трубопровода диаметром 420 мм; по магистральному трубопроводу вода поступала от насосной станции промышленной гидрооттайки, где действовали пять параллельно соединенных насосов марки 8-НДВ с электродвигателями мощностью 75 квт, на 960 об/мин. Почти весь период действия опытных игл в распределительной трубе у отводов к иглам вода имела давление 2,8 ати (с небольшими отклонениями).

Насосная станция отбирала воду из затопленных разрезов старых дражных ходов, в которые вода отчасти фильтровалась, но частью заходила из р. Чай-Урьи. Кроме того, к насосной станции поступал сток сильно взмученной воды из разреза действующей драги. В связи с этим вода, которая нагнеталась через иглы опытного участка, была мутной и содержала приблизительно 0,5—1 кг взвешенного пылеватоглинистого грунта. Однако такая грунтовая взвесь заметным образом кольматировала грунт у коронки иглы только в течение 10—15 суток, а к засорению игл приводила лишь во время продолжительных перерывов в питании. Подтянув иглу на 5—10 см вверх, удавалось исключить влияние кольматации грунта. Гораздо труднее оказалось поддерживать заданный расход в дни дождевых паводков, когда отверстия коронки и кранов быстро,



Р и с. 2. Общий вид опытного участка.

за 2—3 час., засорялись взвешенной лиственничной хвоей и торфяной массой. В этих случаях приходилось прочищать иглу толстой стальной проволокой диаметром 6 мм. Кстати, проверочными наблюдениями установлено, что засорение взвешенной хвоей в дни паводков прервало действие одной трети общего числа водяных игл на участке промышленной гидрооттайки; потребовалась очистка сотен игл.

Температура воды, поступавшей на опытный участок, имела во второй половине июня, в июле и августе довольно постоянные среднесуточные значения между 9 и 12°. В сентябре она снизилась до 5.—6°. Амплитуда суточных колебаний температуры воды (ее отклонение от среднесуточной) обычно составляла 1—1,5°, в отдельные солнечные дни достигала 4°, а в дождливые пасмурные дни не превышала 0,5°. Температуру питающей воды регистрировали непрерывно термографами и контролировали замерами при помощи психометрических ртутных термометров.

На опытном участке было девять термометрических скважин, оборудованных константан-медными термопарами, помещенными в герметически закрытую резиновую трубку. Стальные трубы этих скважин после заложения термопар были извлечены, благодаря чему исключаются их влияние на распределение температур. Влияние температурного возмущения, связанного с бурением и оборудованием скважин, исчезало уже через двое-трое суток вследствие поглощения внесенной теплоты окружающей толщей вечномерзлых грунтов. Холодный спай термопар помещался в термосе. Измерение тока термопар производили гальванометром марки М-91/А, что обеспечивало точность до $\pm 0,1^\circ$.

Кроме того, на опытном участке использовали девять электрометрических скважин. Каждая из них представляла собой необсаженную, заплывшую скважину, пробуренную иглой диаметром 32 мм. В скважину были заложены жгуты изолированных проводов, оканчивающихся электродами для передачи тока в грунт. Электроды размещали по глубине с интервалами в 1 м. Такого рода мерзлотомеры позволяли судить сначала о повышении температуры мерзлого грунта, затем — о времени перехода грунта в талое состояние и, наконец, после оттаивания грунта — об изменениях электропроводности воды искусственного фильтрационного потока в цилиндрическом талике иглы во время опытов с запуском раствора хлористого аммония в качестве индикатора истинной скорости фильтрации.

При температуре -6° мерзлые грунты участка, прилегающие к паре электродов диаметром 8 мм и длиной 100 мм, создавали омическое сопротивление приблизительно 400 тыс. ом; повышение температуры до -1° сопровождалось плавным уменьшением сопротивления до 50 тыс. ом; дальнейший прогрев с приближением к нулю вызывал понижение сопротивления до 15—30 тыс. ом. Момент перехода грунта в талое состояние фиксировался такими мерзлотомерами достаточно четко по резкому спаду сопротивления до 3—4 тыс. ом (рис. 3).

Таким образом, вокруг трех центральных игл в толще грунта было помещено 60 датчиков для наблюдения за температурой и 93 электрода для замера электропроводности. Применявшийся способ устройства термометрических скважин и заложения проводов в грунт здесь подробно не описывается, поскольку он известен (Инструктивные положения, ч. 1, 1959). Бурение иглой на глубину 8 м занимало 2—3 час., а последующие работы (извлечение иглы, вибрационная посадка трубы с проводами и затем извлечение трубы) требовали 1,5—2 час.

Напор воды фильтрационного потока в развивающемся талике измеряли в пьезометрических трубках, перфорированных у нижнего, за-

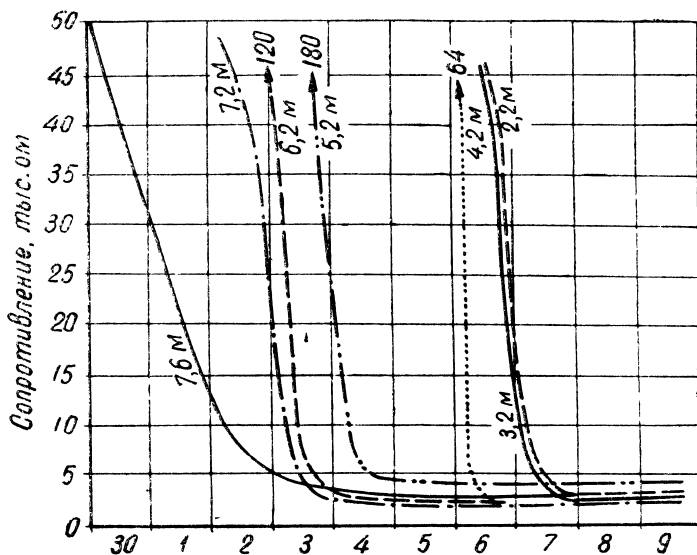


Рис. 3. Пример спада омического сопротивления оттаивающего грунта. Обозначена глубина датчиков.

остренного конца. Вибрационным способом пьезометры были посажены на глубину 1,5—2,5 м; впоследствии некоторые пьезометры тем же способом углубили до 6 м. Если открыть пьезометрическую трубку на уровне земли, можно временно определять температуру самоизливающейся воды, а также следить за ее электропроводностью во время определений истинных скоростей фильтрации с помощью солевого раствора.

Комплекс наблюдений на опытном участке дополнялся зондированием мощности слоя, оттаивающего со стороны дневной поверхности, и периодической нивелировкой поверхности. В результате нивелировок сорока точек поверхности, расположенных над таликами действующих игл, определена средняя осадка за два месяца со дня пуска игл в работу, выразившаяся величиной 108 мм; наименьшая отмеченная осадка составила 55 мм, наибольшая — 280 мм. Судя по равномерности распределения осадок и их небольшой величине (1,8% от мощности оттаивших грунтов), грунты не содержали крупных линз льда, промерзание данных многолетнемерзлых грунтов проходило эпигенетически.

Характер движения воды по талику и производительность иглы

Наиболее подробно изучен талик, развивавшийся под действием иглы И-1. Эта игла погружена вращательным способом в течение 3 час. на глубину 7,4 м так, что коронка с выходными отверстиями для воды находилась в раздробленных песчаниках и сланцах, на 0,5 м от их контакта с элювиальной супесчаной дресвой. Конструктивно игла не отличалась от общепринятых игл; она состояла из стальных труб с внутренним диаметром 20 мм, соединенных ниппелями, и коронки с двумя направленными на забой отверстиями. Потери напора в игле вместе с питающим шлангом составляли, например, при расходе 1,4 м³/час 3,5 м вод. ст.

Во время вращательного погружения иглы через нее нагнеталось 0,9 м³ воды в час с температурой 10,5°. Температура исходящей воды

в грифоне возле игловой трубы колебалась между 7 и 9°. Следовательно, в это время относительная теплоотдача была невелика (0,33—0,14). Интересно отметить, что такая сравнительно небольшая теплоотдача наблюдается обычно во время бурового погружения игл. Диаметр попутно образующегося талика еще настолько мал (1—2 дм), что происходят гидродинамическое взвешивание грунта и вынос мелкозема; при этом обособляются прямоточные струи воды, поднимающиеся к поверхности за короткое время и почти без теплоотдачи.

С момента окончания погружения иглы—21 июня—начался период ее действия. Он продолжался 79 суток, причем перерывы в питании иглы по разным причинам в среднем составляли 1 час в сутки.

Расход воды через иглу за период ее действия имел среднее значение 1,35 м³/час, но специально регулировался несколько раз для сравнительного изучения теплоотдачи и распределения температур в разные стадии роста талика.

Ниже указаны средние значения расхода воды через иглу И-1 во время ее питания и температуры воды по периодам.

	Расход, м ³ /час	Средняя температура воды, град.
21/VI —23/VI	0,46	8,6
23/VI — 7/VII	0,95	10,7
7/VII —16/VII	1,63	12,6
16/VII —20/VII	0,48	11,6
20/VII —24/VII	0,98	9,6
24/VII — 7/VIII	1,8	9,6
7/VIII—22/VIII	1,34	11,1

Термографические наблюдения и показания водомеров позволили вычислить количество теплоты, поступившей в грунт с нагнетаемой водой, для шестичасовых периодов, а затем и для периодов одинакового расхода и температуры, отмеченных выше. До рассмотрения полученных величин теплоотдачи необходимо рассмотреть данные о характере движения воды в талике.

Талик иглы И-1 создавался в сплошной толще вечномерзлых грунтов, насыщенных льдом. Нагнетаемая вода образовывала фильтрационный поток, который расходился от коронки иглы и далее направлялся вверх. Только на глубине 1—2 м от дневной поверхности этот поток отклонялся в сторону по сезоннопротаявшему слою галечников. Для наблюдения за восходящим потоком воды по лучу от иглы была пройдена неглубокая канава. На дне ее наблюдались многочисленные округлые каналцы диаметром по 4—6 мм с движущимся гидродинамически взвешенным песком, которые размещались между галечными и крупногравелистыми зернами грунта. Таких грифонов насчитывалось по 50—80 на 1 м², скорость фильтрации составляла почти 0,5 м/час в восходящем направлении.

О распределении напоров восходящего фильтрационного потока в цилиндрическом талике на глубине 2 м можно судить по следующим данным:

	Пьезометры верхнего луча на расстоянии от иглы, м:		Пьезометры нисходящего луча на расстоянии от иглы, м:			
	3,3	1,8	0,6	1,8	2,4	2,7
№ пьезометра	Ф-1	Ф-8	Ф-2	Ф-7	Ф-4	Ф-3
Горизонт уровня над услов- ным нулем на 23 июля при расходе 1,1 м ³ /час, м	9,52	9,57	9,55	9,45	9,42	9,38
То же на 23 августа при расходе 1,6 м ³ /час, м	9,51	9,54	10,22	9,47	9,36	9,39

На фоне общего уклона уровня надмерзлотных вод, движущихся в сезоннопротаявшем слое, восходящий поток воды вызвал местный подъем уровня. Наиболее высокие пьезометрические уровни (с глубины 2 м) наблюдались в центральной части; по мере удаления от иглы уровни оказались ниже.

Изменения расхода воды через иглу вызывали мгновенно, через несколько секунд, соответствующие изменения уровня в пьезометрах.

Получены ориентировочные значения гидравлических сопротивлений движению воды в грунте на протяжении 6—7 м от наконечника иглы до поверхностного галечного слоя; начиная с первых дней действия иглы, они колебались в пределах 2—5 м вод. ст. при расходах 0,5 — 1,5 м³/сутки. В последние дни действия иглы И-1 пьезометр Ф-2, посаженный на глубину 7,2 м, позволил измерить потери напора на восходящую фильтрацию с расходом 0,6 м³/час, оказавшиеся в пределах 1,5 — 2 м вод. ст. в зависимости от степени мутности нагнетаемой воды.

По мере нарастания диаметра талика потери напора на восходящее движение воды сохранялись приблизительно одинаковыми, ожидаемого постепенного уменьшения этих потерь не отмечено. Видимо, разрыхление грунта во время оттаивания при частичном взвешивании его восходящей фильтрацией влечет за собой увеличение водопроницаемости уже с первых часов действия иглы.

Судя по наблюдениям, пьезометрический уровень восходящего потока плавно и довольно равномерно распределен для определенного горизонтального сечения. Но ряд опытов с солевыми растворами позволил определить, что действительные скорости струй восходящего потока воды в грунте распределяются весьма неравномерно по горизонтальному сечению талика.

Первое определение истинной скорости движения воды в грунтах сделано 5 июля, когда диаметр искусственного талика иглы И-1 был еще сравнительно мал, а именно 3 — 3,6 м, а площадь сечения талика горизонтальной плоскостью составляла $S = 11 \text{ м}^2$. Запущенный через иглу раствор хлористого аммония вызвал увеличение электропроводности во много раз. По времени прохождения максимума электропроводности грунта у электродов скважины М-2, расположенной в 1 м от иглы, определено, что средняя истинная скорость движения воды вертикально вверх составляла $v_{\text{и}} = 3 \text{ м/час}$. В это время расход воды через иглу составлял $q = 0,95 \text{ м}^3/\text{час}$.

Отсюда может быть вычислена эффективная для восходящего фильтрационного движения воды пористость талого грунта (n):

$$n = \frac{q}{Sv_{\text{и}}} = \frac{0,95}{11 \cdot 3} = 0,029, \text{ то есть около } 3\%.$$

Поскольку общая пористость грунта, равная 0,26, в девять раз больше эффективной, можно заключить, что преобладающая часть восходящего потока воды движется не по общей массе пор, а только по разветвленной сети промытых каналов, приуроченных к наиболее крупным порам и пространствам между гравелистыми и галечными частицами. Площадь поперечного сечения этих водопроводящих пор составляет не более 3% общей площади сечения талика.

Следующий опыт производился 24 июля, когда игла действовала уже 33 суток и площадь поперечного сечения талика достигла 24 м. Во время опыта через иглу в грунт нагнеталось $1,9 \text{ м}^3$ воды в час. Результаты наблюдений поясняются рис. 4, на котором изображен вертикальный разрез талика, а на его фоне показаны кривые изменения электропроводности по времени, начиная с момента запуска раствора. У каждой точки нахождения электрода отмечено время наступления максимума концентрации (в минутах).

Во время опыта вода двигалась от коронки вверх на 6 м приблизительно за 1—3 час., но скорости распределялись неравномерно. В осевой части таликового цилиндра при помощи электродов мерзлотомера М-2 уже через 2 мин. после запуска раствора отмечен пик электропро-

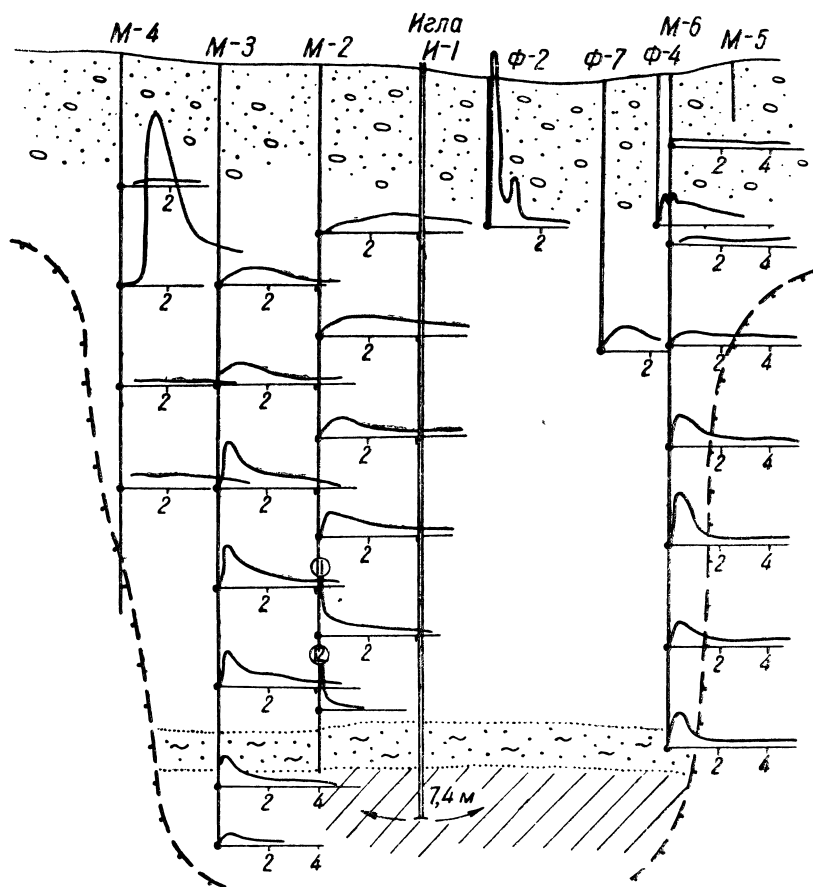


Рис. 4. Графики колебания концентрации в разных точках талика после запуска солевого раствора через иглу (опыт 24 июля). По ординатам отложен прирост концентрации, по абсциссам — время (в часах); пунктиром обозначена граница талика.

водности на глубине 6,7 и 5,7 м. Ближе к поверхности по этому же мерзлотомеру максимумы электропроводности наступали: на глубине 4,7 м через 10 мин., на глубине 3,7 м через 30 мин. и т. д.

Интересно, что через пьезометрическую трубку Ф-2, фильтр которой находился на глубине 1,5 м, в 0,6 м от иглы, солевой раствор начал выходить на поверхность уже через 2 мин. после запуска в иглу, а максимум концентрации (и электропроводности) наблюдался через 4—6 мин. с момента запуска. Позже происходил постепенный плавный спад, но на 52-й минуте отмечен вторичный пик концентрации раствора.

Быстро наступивший пик концентрации соответствует времени прохождения воды по суффозионным каналам, и только второй пик вызван подходом раствора с фильтрационным потоком, движущимся по равномерно распределенным порам грунта.

В периферические части талика меченая вода поступала несколько позднее, но и здесь грунт пронизан отдельными каналами, по которым вода движется во много раз быстрее, чем в среднем. Так, по выходу воды через пьезометрическую трубку Ф-7 (в 1,8 м от иглы) повышение концентрации началось через 20 мин. после запуска раствора, максимум наступил через 50—70 мин., а последующий плавный спад длился 4 час. По пьезометру Ф-4 (в 2,4 м от иглы) отмечено начало повышения кон-

центрации через 7 мин., а два пика-максимума наблюдались на 13-й и 30-й минутах. Плавный спад продолжался более 4 час.

Этот опыт, как и предыдущий, показал, что в пределах всего талика вокруг иглы скорости восходящего движения воды распределены весьма неравномерно. Наряду с более или менее равномерно распределенной фильтрацией со скоростью 1—3 м/час, проявившейся в виде плавных кривых изменения электропроводности по мерзлотометрам, отмечено движение по суффозионным каналам, вследствие которого раствор достигал поверхностного слоя грунта за несколько минут со скоростью — десятки метров в час (рис. 5).

Аналогичные данные получены при других опытах в талике иглы И-1. В рассматриваемых случаях фильтрационные условия приводили к суффозии еще во время бурения и в первые часы действия иглы. Критические условия суффозии подробно исследованы В. С. Истоминой (1957).

На 56-е сутки периода действия иглы И-1 при помощи запуска солевого раствора вновь было определено, что истинные скорости фильтрации неравномерны.

На глубине около 2 м повышение концентрации раствора началось через 2 мин., а максимум отмечен по ближайшему к игле пьезометру Ф-2 на 5-й минуте. По более отдаленным пьезометрам Ф-4 и Ф-7 мак-

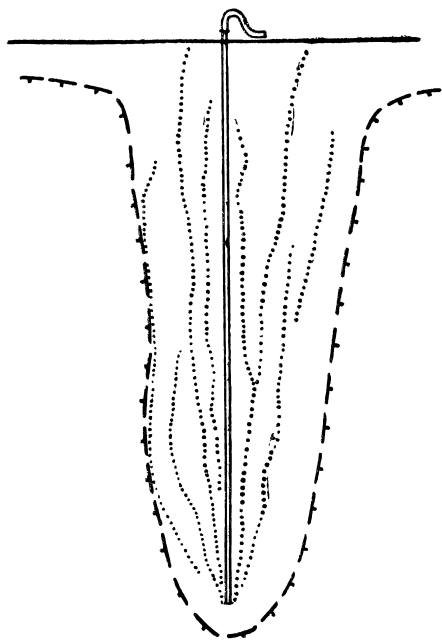


Рис. 5. Схема расположения суффозионных каналов в талике иглы.

симум наступил соответственно на 7-й и 15-й минутах. Путь движения воды по талому грунту до приемных отверстий пьезометрических трубок имел протяжение около 6—8 м; следовательно, вода двигалась по наиболее промытым суффозионным каналам со скоростью 20—70 м/час. Такого рода каналы образуются, судя по наблюдениям, преимущественно в осевой части талика, но, кроме того, распространяются по меньшей мере на 2,4 м в сторону от иглы. Наблюдавшиеся изменения электропроводности грунта вызывались прохождением индикаторного раствора около электродов мерзлотомера по той довольно равномерно распределенной сети макропор, площадь сечения которых, как упоминалось выше, составляла 3%. Струи воды с наибольшими скоростями располагались в талом грунте настолько далеко друг от друга, что не влияли на измеряемое сопротивление.

Количество воды, поступавшей к пьезометрическим трубкам из суффозионных каналов, позволяет оценить более точно роль этих образований.

Во время опыта 24 июля к пьезометру Ф-2 поступала вода суффозионных каналов, проходившая путь от наконечника иглы за несколько минут; расход ее составлял 0,3 м³/час, или 16% от полного расхода воды через иглу, равного в это время 1,9 м³/час.

Во время второго из рассмотренных опытов суммарный расход воды суффозионных струй, выведенных тремя пьезометрическими трубками, составил 0,6 м³/час, или 31% нагнетаемой воды. Нужно полагать, что суммарный расход всех непроезводительных струй через талик был больше, поскольку не все суффозионные струи подходили к пьезометрическим трубкам. Следовательно, весьма значительная часть общего расхода нагнетаемой воды исключается из участия в полезном теплообмене.

Температурные наблюдения проливают дополнительный свет на условия движения воды в развивающемся талике иглы.

За время с 12 июля по 8 сентября пьезометрическую трубку Ф-2 периодически использовали для измерения температуры воды, поступавшей в нее на глубине 2 м из суффозионных каналов (с расходом 0,3 м³/час); по этим измерениям, средняя относительная температура составила 0,98% по отношению к температуре нагнетаемой воды, принятой за единицу. Коэффициент использования теплоты воды соответственно составил очень малую величину — 0,02.

Через пьезометрическую скважину Ф-4, расположенную дальше (в 2,4 м) от иглы, во время пробных выпусков изливалась вода с расходом около 0,1 м³/час и более низкой температурой. Средняя относительная температура здесь составила 0,88%, а коэффициент использования теплоты воды — 0,12. Видимо, в краевой области талика образуется меньше суффозионных каналов.

Но следующие наблюдения показали, что и здесь, в периферической части талика, в связи с оттаиванием грунта возникают зоны облегченного движения воды. В отдельных случаях по термодатчикам скважин Т-1, Т-2 и Т-3 вслед за моментом оттаивания грунта отмечалось резкое повышение температуры; на протяжении 1—2 суток температура составляла 6—10°, но затем снижалась до относительно устойчивого уровня, сохранявшегося потом длительное время. Можно предполагать, что в этих случаях образовались трещиновидные полости между оседающим талым грунтом и вертикальной цилиндрической боковой границей мерзлого грунта. По этим полостям пробивались восходящие потоки воды с ничтожной теплоотдачей.

Однако в большинстве случаев после перехода границы оттаивания за очередной датчик последний показывает весьма медленное повышение

температуры. Обычно 3—5 суток температура, поднявшись выше нуля, остается в пределах от 0 до $+1^{\circ}$. Только после этого она медленно повышается по мере удаления границы талика от центра.

На протяжении всего опыта с иглой И-1 распределение температур талого грунта свидетельствовало о существовании довольно равномерно распределенного восходящего фильтрационного потока, в котором температуры плавно понижались вдоль вертикального ряда датчиков снизу вверх, а также по радиусу от оси талика к его боковой границе. Измеренные температуры приведены ниже (см. табл. 7 и 8).

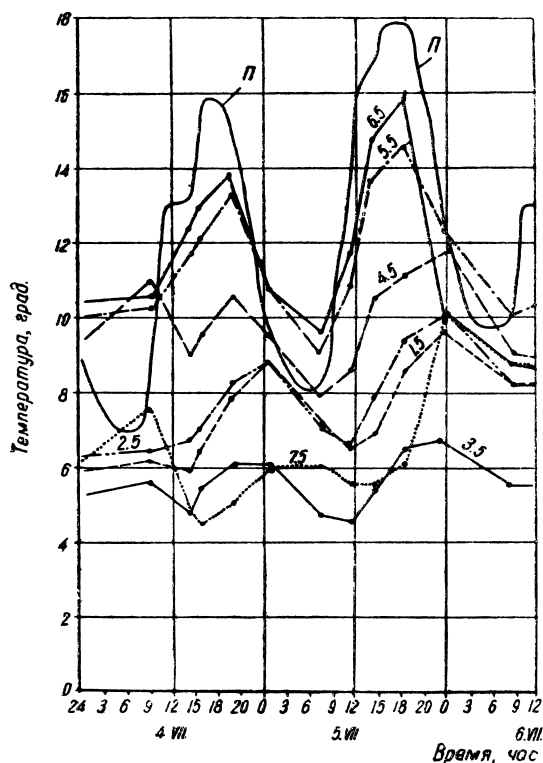


Рис. 6. Колебания температуры грунта в талике иглы И-1 по скв. Т-1. Глубина термодатчика обозначена у каждой кривой; П — кривая температуры поступающей воды.

только в 12 час. Расход нагнетаемой воды в это время был $1,2 \text{ м}^3/\text{час}$, а площадь поперечного сечения талика — около 10 м^2 . Во всех подобных случаях скорость распространения максимума и минимума температуры превышала скорость фильтрации.

Производительный перенос теплоты к боковым границам и основанию растущего талика осуществляется почти исключительно теми массами воды, которые движутся в виде более или менее равномерно распределенных струй, образующих фильтрационный поток во всем объеме талого грунта. В супесчано-дресвяных слабопроницаемых грунтах опытного участка этот фильтрационный поток использовал, как отмечено выше, только небольшую часть общей пористости (около 3%), а не все поры, как в песчаных грунтах. Несмотря на это, характер производи-

В дни со значительными колебаниями температуры нагнетаемой воды суточного периода эти колебания распространялись вверх по талику иглы, испытывая постепенное затухание и сдвиг фаз (рис. 6).

Характер распространения суточных колебаний температуры довольно равномерный во всем талом грунте, чем подтверждается существование равномерно распределенного фильтрационного потока, проникающего через весь объем талого грунта, несмотря на то что грунты слабопроницаемы и в них некоторая часть воды движется по суффозионным каналам. На приведенном рисунке можно видеть, что максимумы и минимумы температуры талого грунта отстают во времени от максимумов и минимумов температуры поступающей воды. Например, 6 июля минимум температуры наступил у нагнетаемой воды в 6 час., а на 5 м выше коронки иглы (на глубине 2,5 м) по термосвязке Т-1 —

тельного переноса теплоты в данном случае аналогичен переносу ее в песчаных грунтах с нормальной фильтрацией. Для оценки эффективности переноса теплоты к оттаивающим грунтам должна учитываться скорость движения только фильтрационного потока; расход же воды по концентрированным струям в суффозионных каналах, где скорости достигают десятков метров в час, следует считать непроизводительным.

Рассмотренные данные о характере фильтрации и теплообмена воды с мерзлым грунтом интересно сопоставить с наблюдениями о нарастании размеров талика. Рост талика вокруг иглы И-1 представлен на рис. 7. Для построений контура талика в горизонтальных и вертикальном сечениях использованы данные измерений по одиннадцати скважинам.

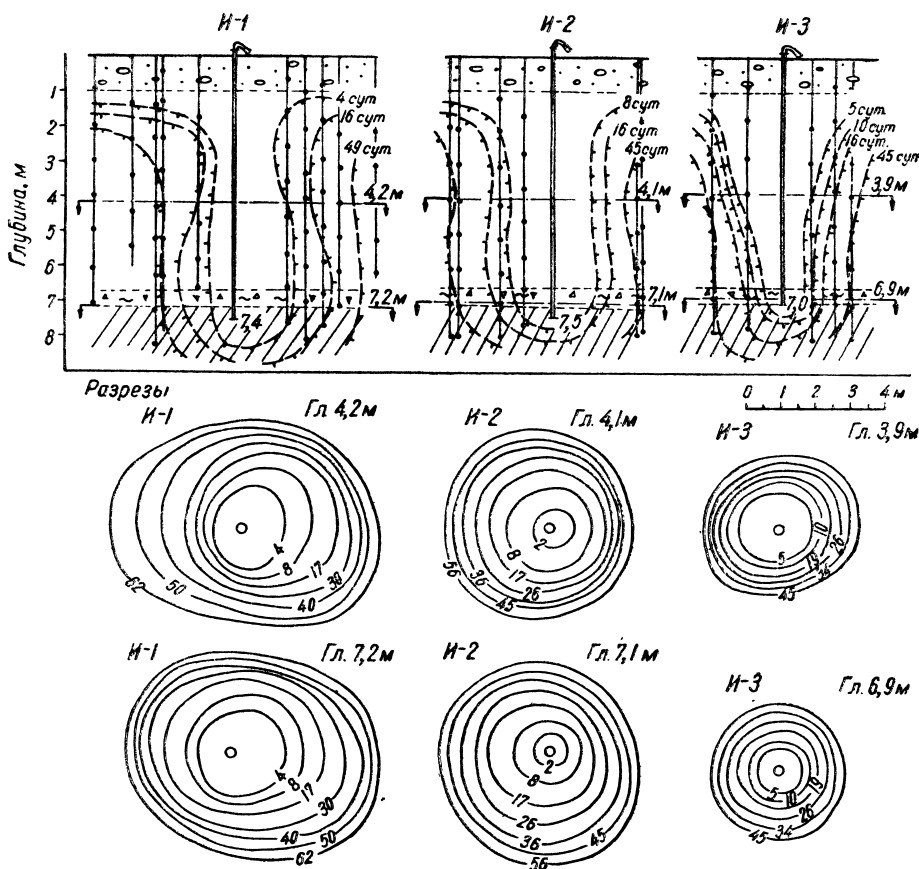


Рис. 7. Вертикальные и горизонтальные (внизу) разрезы таликов трех опытных игл. На вертикальных разрезах точками показано расположение датчиков; жирный пунктир — граница талика; на горизонтальных разрезах изображен контур талика, причем обозначено число суток действия иглы.

В первое время талик иглы И-1 имел почти круглое очертание в горизонтальной плоскости, однако ось его не совпадала с местоположением иглы, а оказалась смещенной в восточную сторону. С течением времени талик стал развиваться преимущественно в сторону уклона общего фильтрационного потока в приповерхностном талом слое и симмет-

рия его формы нарушилась. Несовпадение оси талика с осью иглы в первое время было, по-видимому, вызвано не только боковым отклонением струй нагнетаемой воды в трещине коренных пород, в которые наконечник иглы был погружен. Боковое отклонение восходящего фильтрационного потока могло быть обусловлено также местными неравномерностями в сложении валунистого грунта или ориентированным наклоном плоских галек.

За 40 суток талик своей восточной частью распространился более чем на 4 м от иглы, хотя в остальных направлениях радиус его достиг только 1,5—2 м. Верхняя, устьевая часть талика за время опыта постепенно понижалась, поскольку поверхностное сезонное протаивание грунта в пределах опытного участка усиливалось горизонтальным фильтрационным потоком от большой группы промышленных игл, действовавших, начиная с 1 августа, на площади, расположенной в 200—300 м выше по долине. В первые дни действия иглы И-1 поверхностный талый слой имел мощность 1,5 м, через месяц — 2,1 м, а через 60 суток — 2,5 м.

Зависимость производительности иглы, то есть суточного прироста объема талика, от радиуса этого талика на примере И-1 представлена в табл. 3. Весь период действия иглы (62 суток) разделен на восемь отрезков времени. Для каждого из них учтены, с одной стороны, прирост объема талика, с другой — затраты воды и теплоты в поданной воде. По этим данным рассчитывались показатели эффективности нагнетания воды, изменяющиеся по мере роста диаметра талика, а также в зависимости от расхода воды. Во всех случаях принимался в расчет только объем оттаявшего грунта в слое на глубине от 2,7 до 7,7 м; на этом объеме отражалось только увеличение диаметра талика и не сказывались перемещения границы сезонного оттаивания, а также нижней границы талика. В связи с этим действительная производительность иглы на 10—15% больше приведенных вычисленных значений.

В табл. 3 отчетливо вырисовывается тенденция производительности иглы к уменьшению по мере роста диаметра талика при прочих равных условиях. Суточная производительность за первый день составила 4,45 м³, через 30 дней — 3,1 м³, через 60 дней — 1,4 м³ и далее продолжала снижаться.

Но, ввиду того что расход и температура воды, поступавшей в иглу, изменялись, более точную характеристику процесса оттаивания дает отношение прироста объема талика к общему количеству затраченной воды и содержащейся в ней теплоты. Удельные затраты воды, приведенные в таблице, выражают частное от деления прироста объема талика за период к объему поданной за это же время воды.

Удельные затраты воды составили вначале 4,3 м³ воды на 1 м³ грунта; в конце периода действия иглы они повысились до 32 м³/м³. Поступления теплоты с нагнетаемой водой соответственно возрастали. Общее количество теплоты, внесенной нагнетаемой водой, составило 20,4 тыс. мккал.

Объем оттаянного грунта в слое мощностью 5 м достиг 166,3 м³. Диаметр талика возрастал постепенно до 6,5 м, а площадь горизонтального сечения талика — до 33 м². Общий объем оттаянного грунта достиг 190 м³. Затраты теплоты на прогрев и оттаивание в соответствии с теплофизическими показателями равнялись для 1 м³ — 22 мккал, а на весь объем (полная теплоотдача) — 4180 мккал. Относя эту сумму к количеству внесенной теплоты, находим среднюю относительную теплоотдачу 20,2%.

Следовательно, 162 тыс. мккал вынесено исходящей водой.

Таблица 3

Анализ производительности иглы И-1 (по периодам)

Показатели	21—23 июня	23—29 июня	29 июня— 7 июля	7—16 июля	16—20 июля	20—24 июля	24 июля— 7 августа	7—22 августа	Всего за время с 21 июня по 22 августа
Продолжительность периода (включая пере- рывы), сутки	2	6	8	9	4	4	14	15	62
Поступило воды, м ³	22	123	161	345	41	89	628	502	1917
Средний расход воды за время действия иглы, м ³ /час	0,46	0,87	1,0	1,63	0,48	0,98	1,8	1,34	1,35
Средняя температура воды, град.	8,6	11,0	10,4	12,6	11,6	9,6	9,6	11,1	10,6
Объем талика к концу периода по слоям (м ³) на глубине:									
2,7—3,7 м	1,4	5,7	9,8	20,0	25,8	28,0	35,4	36,0	36,0
3,7—4,7 »	1,7	7,2	11,7	16,0	18,0	20,0	29,1	36,0	36,0
4,7—5,7 »	1,9	7,1	11,1	14,6	15,8	17,8	26,2	30,7	30,7
5,7—6,7 »	1,9	7,5	12,5	18,6	20,9	18,4	26,2	30,4	30,4
6,7—7,7 »	2,0	7,3	14,5	19,0	20,3	22,0	28,1	33,2	33,2
Суммарный объем (м ³) в слое высотой 5 м (от 2,7 до 7,7 м)	8,9	34,8	59,6	88,2	100,8	106,2	145,4	166,3	166,3
Средний диаметр талика в этом слое (к концу периода), м	1,5	3,0	3,8	4,4	5,05	5,2	6,1	6,5	6,5
Прирост объема талика за сутки (в данный период), то есть про- изводительность иглы, м ³ /сутки	4,45	4,32	3,1	3,18	3,14	1,35	2,8	1,4	2,69
Удельные затраты воды, м ³ /м ³	2,5	4,75	6,5	12	3,2	16,5	16,0	24	11,5
Показатель теплоотдачи: объем грунта, оттаяв- шего за счет 100 м ³ воды с температурой 10° (содержащей 1000 мкал), м ³ /м ³	46,5	18,5	14,8	6,54	27	6,3	6,5	3,74	8,2

В качестве сравнительного показателя относительной теплоотдачи нагнетаемой воды приведены объемы грунта, оттаянного за счет подачи 100 м³ воды с условной температурой 10°, то есть в результате поступления 1000 мкал с нагнетаемой водой. Данные таблицы иллюстрируются

рис. 8, на котором кривая для иглы И-1 характеризует уменьшение относительной теплоотдачи воды по мере роста диаметра. На положении точек, по которым проведена средняя кривая, отражается, кроме диаметра, расход нагнетаемой воды: в периоды с большим расходом относительная теплоотдача была меньше средней.

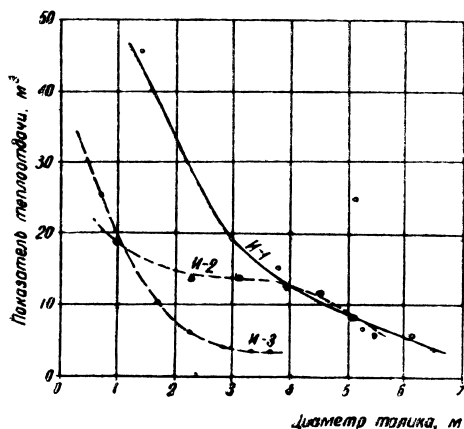


Рис. 8. Графики фактического изменения относительной теплоотдачи нагнетаемой воды по мере роста диаметра талика. По оси ординат отложены объемы грунта (в кубических метрах), оттаивающего за счет 100 м³ воды с температурой 10° (содержащей 1000 мкал).

Рассмотренные зависимости имеют большое значение для обоснования экономических решений относительно расстояния между иглами, когда речь идет о тысячах игл и миллионах кубических метров нагнетаемой воды.

Опытная игла И-2 позволила изучить особенности процесса оттаивания при малом расходе нагнетаемой воды. Режим подачи воды с малым расходом соблюдался на протяжении всего опыта.

Буровое погружение иглы на 7,7 м заняло 7 июля 3,5 час.; расход воды во время бурения составлял 1,2 м³/час, температура воды была 10,5°. После окончания бурения иглу подтянули на 0,2 м для облегчения выхода во-

ды в грунт. Таким образом, коронка иглы с выходом воды была помещена на глубину 7,5 м, где и оставалась 56 суток — до конца опыта.

Расход воды имел среднее значение 0,73 м³/час и отклонялся от этого значения не более чем на 26% в большую сторону.

Через иглу в грунт поступило всего 986 м³ воды со средней температурой 11,3°. Грунты на месте этой иглы соответствовали описанию, приведенному выше для опытного участка. В распределении исходных температур мерзлого грунта с начала действия иглы И-1 больших изменений не произошло. Поэтому различия в процессе оттаивания объясняются только режимом расхода воды.

Потери напора на восходящую фильтрацию воды через талый грунт от коронки иглы составляли обычно 0,3—0,5 м вод. ст. Пьезометрические наблюдения показали, что в том числе на верхний слой грунта мощностью 2,5 м расходуется только 0,02—0,05 м вод. ст.

Истинную скорость фильтрации воды вверх по талику определяли дважды. В первом случае, когда расход воды через иглу составлял 0,85 м³/час, сечение талика — 9,5 м², а скорость фильтрации — 0,09 м/час, максимум концентрации запущенного солевого раствора распространился вверх на 5,4 м за 0,6 час. со скоростью 9 м/час; эти данные получены по мерзлотомеру М-7 и пьезометру Ф-5, расположенным в 0,5—0,7 м от иглы. В то же время, по наблюдениям с помощью мерзлотомера М-8, расположенного в периферийной части талика, на расстоянии 1,5 м от иглы, определилось время продвижения максимума концентрации на пути около 6 м — 4,3 час. со скоростью 1,4 м/час.

Данные второго опыта, проведенного в талике иглы И-2 15 августа, представлены в табл. 4. Путь движения воды составлял также около 6 м,

но площадь поперечного сечения талика достигла 18 м^2 , расход был временно повышен до $1,3 \text{ м}^3/\text{час}$; соответственно — скорость фильтрации, отнесенная ко всему сечению, составляла $0,072 \text{ м}/\text{час}$.

Таблица 4

Время продвижения индикатора с восходящим фильтрационным потоком (в часах)

Глубина датчика, м	Номер скважины и горизонтальное расстояние от иглы				
	М-8 1,5 м	М-7 0,7 м	Ф-12 1,6 м	Ф-5 0,6 м	Ф-11 1,7 м
2,1	0,35; 1,1	0,5	0,27; 1,1	0,68	—
3,1	0,08; 1,1	0,23	—	—	—
4,1	0,35	0,17	—	—	—
5,1	0,35	0,1	—	—	—
6,1	0,23	0,16	—	—	—
7,1	1,0	0,41	—	—	—

В обоих случаях по прохождению максимума концентрации раствора обнаружались неоднородные скорости движения воды. После прохождения максимума обычно еще в течение 3—4 час. отмечалась довольно высокая концентрация, хотя и ниже максимальной; лишь в последующие 8—16 час. происходил постепенный спад избыточной концентрации до нуля. Судя по этому, преобладающая масса воды в талике иглы И-2 двигалась со скоростями, значительно меньшими, чем максимальные. Это подтверждается и тем, что в отдельных точках проходила два максимума концентрации запущенного солевого раствора; повторные максимумы отмечены электрометрическими наблюдениями в грунте и в самоизливающейся воде трубки Ф-11. К нижним электродам, расположенным на уровне коронки или ниже, меченая вода подошла через 0,4—3,5 час. — значительно позднее, чем к верхним электродам, расположенным на линии кратчайших фильтрационных токов.

Для выяснения характера распределения движущейся воды по талому грунту можно, как и в случае талика иглы И-1, сопоставить истинные скорости фильтрации со скоростью фильтрации, отнесенной ко всему поперечному сечению талика. Первое определение дало истинную скорость фильтрации $9 \text{ м}/\text{час}$, а скорость фильтрации по расходу и поперечному сечению талика определяется в $0,09 \text{ м}/\text{час}$. Из соотношения скоростей следует, что водопроницающая пористость, обуславливающая движение преобладающей массы воды, равна $0,01$. По данным второго определения соответственно получена для фильтрационных струй истинная скорость (в среднем по первым максимумам) $0,45 \text{ м}/\text{час}$, что относительно скорости фильтрации $0,072 \text{ м}/\text{час}$ дает такую же водопроницающую пористость — $0,016$, — как и в остальных опытах.

Если взять наиболее поздние отмеченные максимумы прохождения раствора в рассматриваемых двух опытах, то водопроницающая пористость оказывается в условиях первого опыта $0,056$, а второго опыта — $0,045$.

В талике иглы И-2 не наблюдалось движения воды со скоростями в десятки метров в час, как это имело место в случае с иглой И-1. Следовательно, принятый режим нагнетания воды с небольшим расходом (приблизительно $0,7 \text{ м}^3/\text{час}$) предотвращал образование суффозионных каналов. Имела место фильтрация, несмотря на то что водопроница-

ми оказались только наиболее крупные поры грунта, занимающие менее одной десятой общего объема пор.

Развивающийся талик вокруг иглы И-2 имел поперечное сечение, близкое к круговому, со смещением центра относительно иглы менее чем на 0,5 м (см. рис. 7). Объемы оттаянного грунта сопоставляются в табл. 5 с количествами затраченной воды и теплоты в воде при последовательном увеличении диаметра талика.

Таблица 5

Анализ производительности иглы И-2 (по периодам)

Показатели	7—9 июля	9—15 июля	15—23 июля	23 июля— 2 августа	2—12 августа	12—21 августа	21 августа— 1 сентября	За все время с 7 июля по 1 сентября
Производительность периода (включая перерывы), сутки	2	6	8	10	10	9	11	56
Поступило воды, м ³	35	106	101	182	169	184	209	986
Средний расход воды за время действия иглы, м ³ /час	0,73	0,74	0,58	0,76	0,71	0,85	0,79	0,66
Средняя температура воды, град.	11,2	13,6	11,3	9,2	10,6	11,4	12,1	11,3
Объем талика к концу периода по слоям (м ³) на глубине:								
2,6—3,6 м	1,4	5,0	8,9	15,1	20,3	21,9	24,5	24,5
3,6—4,6 »	1,4	6,2	9,3	14,4	17,0	19,4	22,4	22,4
4,6—5,6 »	1,5	6,2	9,9	13,2	16,3	20,0	24,2	24,2
5,6—6,6 »	1,6	7,4	8,7	11,8	16,8	20,4	24,5	24,5
6,6—7,6 »	1,1	2,2	6,7	11,1	17,2	24,5	24,5	24,5
Суммарный объем (м ³) в слое высотой 5 м (от 2,6 до 7,6 м)	7,0	27	43,5	65,6	87,6	106,2	120,1	120,1
Средний диаметр талика в этом слое (к концу периода), м	1,3	2,62	3,33	4,1	4,71	5,2	5,53	5,53
Прирост объема талика за сутки (в данный период), то есть производительность иглы, м ³ /сутки	3,5	3,3	2,1	2,18	2,2	2,06	1,26	2,15
Удельные затраты воды, м ³ /м ³	5,0	5,3	6,15	8,35	7,7	9,94	15,4	8,3
Показатель теплоотдачи: объем грунта, оттаявшего за счет 100 м ³ воды с температурой 10° (содержащей 1000 мккал), м ³ /м ³	18	13,9	14,3	13	12	8,8	2,94	10,9

Прирост объема талика за сутки, характеризующий производительность иглы, уменьшался постепенно от начальной величины 3,5 до 1,26 м³/сутки. Среднее значение суточного прироста (2,15 м³/сутки) мало отличается от среднего по игле И-1 (2,4 м³/сутки), хотя расход воды через иглу И-2 был вдвое меньше расхода через иглу И-1.

Удельные затраты воды через иглу И-2 составили в среднем $8,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$, что на 30—40% меньше, чем по игле И-1. Относительная теплоотдача воды уменьшалась по мере нарастания диаметра талика; по рис. 8 можно видеть, что относительная теплоотдача нагнетаемой воды значительно понизилась после того, как диаметр талика превысил 4 м.

Опытная игла И-3 вступила в действие 10 июля; бурение этой иглой происходило в тех же условиях, как у предыдущих двух опытных игл. Действие иглы прослежено в течение 45 суток — до 24 августа. Позже талик начал распространяться за крайние наблюдательные скважины и соединился с таликами смежных вспомогательных игл.

Иглу погрузили на глубину 7,1 м в толщу грунтов, описанную выше. Температура воды за период нагнетания в иглу И-3 была в среднем $10,6^\circ$. Таким образом, грунтовые и температурные условия мало отличались от соответствующих условий для игл И-1 и И-2.

Расход воды через иглу И-3 в течение первых девяти суток был сравнительно мал ($0,83 \text{ м}^3/\text{сек}$). Но остальные 36 суток нагнетание воды производилось с большим расходом — в среднем $1,81 \text{ м}^3/\text{час}$ ($0,72 \text{ л}/\text{сек}$); притом в отдельные дни расход повышался до $3,5 \text{ м}^3/\text{час}$ ($0,95 \text{ л}/\text{сек}$). Относительно повышенный расход воды и явился почти единственной особенностью режима действия иглы И-3. В талом грунте появились суффозионные каналы, отдельные из них даже выводили воду на поверхность. Пьезометрические наблюдения и опыты с запуском солевого раствора показали, что в талике, кроме фильтрационного движения воды, происходило движение воды по разветвленному суффозионному каналу, причем последние выводили преобладающую часть воды.

Пьезометрический уровень воды восходящего потока на глубине около 2 м превышал уровень грунтовых вод поверхностного слоя не более чем на 0,15 м. Уровни в пьезометрах мгновенно изменялись вслед за изменениями расхода воды через иглу. Так, 5 августа, когда площадь поперечного сечения талика составляла 8 м^2 , наблюдалась следующая зависимость повышения уровня в пьезометрах, выведенных с глубины 2 м, от расхода воды:

Расход через И-3, $\text{м}^3/\text{час}$	0	0,5	1	1,5	2	2,5
Повышение уровня в Ф-6, см	0	2	5	7	11	15
» » » Ф-10 »	0	1	2	3	4	6

В последние дни периода действия иглы пьезометрические трубки были наращены и посажены на глубину 4,5 м. На этой глубине пьезометрический уровень воды при расходе $2,4 \text{ м}^3/\text{час}$ превышал поверхностный уровень лишь на 21 см по пьезометру Ф-6, расположенному близко от иглы, и на 6 см — по пьезометру Ф-10.

Последующая посадка пьезометрических трубок на большую глубину (6,5 м) вызвала повышение уровня в них. Превышение теперь составляло в пьезометре Ф-9 35 см, в пьезометре Ф-10 — 26 см: столь малы потери напора на восходящее движение воды по талику даже при относительно большом расходе — $2,2 \text{ м}^3/\text{час}$! Это обусловлено тем, что в талом пылеватосупесчаном гравелистом грунте участка у иглы И-3 образовались промытые суффозионные каналы, из которых мелкозем был вынесен.

Рассматривая рис. 7, на котором изображены поперечные сечения талика иглы И-3 последовательно по отдельным датам, можно заметить, что талик этот имеет форму усеченного конуса, расширяющегося кверху. Этим он отличается от таликов игл И-1 и И-2, введенных в действие на одну-две недели раньше. Талики первых двух игл получили кувшино-

образную форму с наиболее широкой частью внизу, на уровне выхода воды из коронки. Это различие могло быть обусловлено тем, что в первые дни действия иглы И-1 многолетнемерзлые грунты имели более низкую температуру, чем позже, когда начала действовать игла И-3. Но в данном случае различие в распределении начальных температур многолетнемерзлого грунта было недостаточно для такого значительного влияния на форму талика; ко времени начала работы иглы И-3 (10 июля) температуры мерзлых грунтов на глубине 3—8 м лишь на 1,5—2° повысились против значений, которые они имели 20 июня перед пуском иглы И-1 (см. табл. 2).

Диаметр нижнего конца талика иглы И-3 оставался весь период меньше диаметра верхней—устьевой—части этого талика. Расширение талика кверху—следствие того, что большой расход нагнетаемой воды поддерживал суффозионные каналы в промытом состоянии; по ним проходила преобладающая часть воды, а равномерно распределенный фильтрационный поток, собственно вызывающий оттаивание грунта у боковых границ талика, имел уменьшенные градиенты и малую скорость. Особенно ослабляется действие фильтрационного переноса теплоты в нижней части талика, где суффозионные каналы, начиная от наконечника иглы, наиболее сильно промыты и еще мало разветвляются.

В случае же нагнетания воды с малым расходом талик в своей нижней части содержит более интенсивный фильтрационный поток, поскольку дренирующих каналов еще не образуется. Оттаивание грунтов идет в нижней части быстрее в соответствии с закономерностью теплоотдачи восходящего фильтрационного потока, расходующего начальный запас теплоты по мере подъема.

Распределение температур в талике иглы И-3 рассматривается ниже совместно с соответствующими данными по игле И-1. Отметим лишь, что на температурах отразилось ослабление равномерно распределенного фильтрационного потока за счет отвода воды по суффозионным каналам.

Производительность иглы И-3 уменьшалась со временем (табл. 6).

Для вычисления показателей производительности иглы, как и в предыдущих двух случаях, учтены объемы грунта в пятиметровом слое, в пределах которого цилиндрический талик нарастал в стороны. На создание талика через иглу И-3 израсходовано в среднем по 20,8 м³ воды на 1 м³ грунта; с нагнетаемой водой поступало в фильтрационный поток по 220 мккал теплоты на 1 м³ грунта, из которых полезно расходовалось на оттаивание и прогрев только 12—14%.

Уменьшение относительной теплоотдачи по мере нарастания диаметра талика было очень резким (см. рис. 8).

Интересно сравнить производительность иглы за два отрезка времени: первый, когда расход воды был мал, и второй, в течение которого расход воды через иглу был в два с половиной раза выше. По данным табл. 6 можно убедиться в том, что повышение расхода воды не вызвало увеличения суточного прироста объема талика, хотя такой прирост должен был появиться независимо от общего плавного понижения производительности с нарастанием диаметра талика. До 20 июля суточный прирост объема талика составил 1,64 м³, а 20—29 июля — 1,27. После увеличения расхода резко снизилась относительная теплоотдача нагнетаемой воды.

Нижние датчики термометрических и мерзлотомерных связей, заложённых в грунт вокруг иглы И-3, дали возможность проследить за продолжительностью оттаивания горных пород, залегающих на уровне ко-

Т а б л и ц а 6

Анализ производительности иглы И-3 (по периодам)

Показатели	10—11 июля	11—15 июля	15—20 июля	20—29 июля	29 июля— 5 августа	5—13 августа	13—24 августа	За все время с 10 июля по 24 августа
Производительность периода (включая перерывы), сутки	1	4	5	9	7	8	11	45
Поступило воды, м ³	16,1	65,9	106	369	287	287	496	1622
Средний расход воды за время действия иглы, м ³ /час	0,67	0,72	0,9	1,71	1,71	1,52	2,05	1,6
Средняя температура воды, град.	12,6	14,1	11,5	10,5	9,4	10,7	12,8	11,3
Объем талика к концу периода по слоям (м ³) на глубине:								
2,4—3,4 м	2,3	5,5	7,6	10,7	11,8	13,5	13,8	13,8
3,4—4,4 »	1,0	3,7	5,2	8,1	8,7	12,0	13,8	13,8
4,4—5,4 »	0,5	2,1	3,7	6,5	9,2	10,6	13,6	13,6
5,4—6,4 »	0,7	2,1	2,8	5,9	7,8	8,6	13,0	13,0
6,4—7,4 »	0,5	1,4	2,1	4,2	7,0	9,8	12,6	12,6
Суммарный объем (м ³) в слое высотой 5 м (от 2,4 до 7,4 м)	5,0	14,8	21,4	35,4	44,5	54,5	66,8	66,8
Средний диаметр талика в этом слое (к концу периода), м	1,0	1,9	2,3	3,0	3,4	3,7	4,1	
Прирост объема талика за сутки (в данный период), то есть производительность иглы, м ³ /сутки	5,0	2,45	1,32	1,55	1,3	1,25	1,12	1,47
Удельные затраты воды, м ³ /м ³	3,2	6,7	16,1	26,3	31,6	28,7	40,3	24,4
Показатель теплоотдачи: объем грунта, оттаявшего за счет 100 м ³ воды с температурой 10° (содержащей 1000 мкал), м ³ /м ³	25	10,5	5,7	3,6	3,4	3,3	1,93	3,65

ронки иглы и ниже ее. Наиболее глубокие датчики трех термометрических связей находились в трещиноватых песчаниках и роговиках, отчасти выветрелых до щебенистой пылеватой супеси. Коронка иглы была расположена в верхней части того же слоя, на 0,7—0,9 м выше, на разных расстояниях по горизонтали (см. рис. 1 и 7). Момент оттаивания четко фиксировался по переходу температуры через 0°. Приводим данные этих наблюдений:

	Номера связок		
	T-7	T-8	T-9
Расстояние от коронки иглы до датчика по горизонтали (радиус), м	0,6	1	1,6
То же по вертикали (вниз), м	0	0,7	0,8
Продолжительность действия иглы до момента окончания оттаивания пород в данной точке, суток	26	17	24
Средний радиус талика выше коронки к этому времени, м	1,7	1,4	1,6

Скорость развития талика в грунтах ниже горизонта выходного отверстия иглы оказалась меньше средней скорости расширения талика в сторону, в цилиндрической его части, выше уровня коронки. Приведенные цифры позволяют вычислить средний наклонный радиус нижней ограничивающей поверхности талика иглы, составляющий 0,77 от радиуса вышележащей части талика.

Таким образом, подтверждается необходимость погружения игл на глубину не менее заданной глубины оттаивания, чтобы в точках, наиболее удаленных от коронок игл, нижняя граница созданного общего талика опустилась на заданную глубину.

Вместе с тем полученные данные о распространении талика иглы книзу лишний раз показывают, что рекомендации А. И. Калабина (1956) о возможности экономии средств за счет погружения водяных игл «на неполную глубину, составляющую не более $\frac{1}{2}$ — $\frac{1}{3}$ оттаивающего слоя рыхлых отложений» (стр. 113), совершенно неприемлема, во всяком случае — как общее правило.

Из наблюдений видно, что непосредственно под коронками игл оттаивание проникает на глубину, меньшую, чем радиус бокового развития талика; однако в середине каждого треугольника между иглами остается выступ мерзлого грунта, достигающий уровня расположения коронок игл, который сохраняется и после того, как талики смежных игл сливаются. Если мы не доведем иглы до подошвы слоя, подлежащего оттаиванию, то оставим эти выступы мерзлого грунта, то есть не обеспечим исполнение главного условия подготовки теплоносного пласта к разработке.

Лишь в некоторых частных случаях применения игловой гидрооттайки, когда после действия игл в талых, достаточно водопроницаемых грунтах поддерживается горизонтальный фильтрационный поток, способный углубить оттаивание за счет своей теплоотдачи, весь слой, подлежащий оттаиванию, разделяется на две части: верхняя оттаивается иглами, а нижняя — последующим действием фильтрационного потока. Но даже в этом случае иглы необходимо погружать до заданной глубины оттаивания верхней части слоя.

Распределение температур в таликах

Распределение температур в фильтрующих таликах трех опытных игл отражает те особенности движения воды через слабопроницаемые пылеватосупесчаные грунты участка, которые описаны в предыдущем разделе. Для оценки условий теплообмена воспользуемся возможностью сравнения фактического распределения температур с температурным полем фильтрующего талика, представленного достаточно водопроницаемым однородным (например, песчаным или гравийным) грунтом.

Распределение температур в плоскости вертикального разреза фильтрующего талика иглы можно, как известно, без больших погрешностей принимать аналогичным распределению температур в геометрически правильном цилиндре, по которому установился равномерно распределенный восходящий фильтрационный поток. В тепловом отношении такой фильтрационный поток подобен при известных допущениях бесконечному цилиндрическому телу, которое в начальный момент имеет равномерно распределенную положительную температуру t , но начинает охлаждаться в граничных условиях первого рода из-за мгновенного понижения температуры боковой поверхности до нового, постоянного во времени значения, у нас равного 0° (температура таяния льда в грунте). Такая аналогия позволяет определить теплоотдачу рабочего фильтрационного потока, питаемого иглой; установлено, что в случае фильтрации через песчаные и более крупнозернистые грунты увеличение расхода и скорости фильтрационного потока связано с уменьшением относительной теплоотдачи, хотя производительность иглы в единицу времени и возрастает.

Относительная температура Θ_r любой точки внутри цилиндрического тела (бесконечной длины) радиусом R , охлаждаемого в вышеупомянутых условиях, может быть вычислена, как функция двух величин — относительного удаления точки от оси цилиндра $\frac{r}{R}$ и критерия теплового подобия Фурье Fo , который выражает безразмерно продолжительность охлаждения тела (Лыков, 1952), —

$$\Theta_r = f\left(\frac{r}{R}, Fo\right).$$

Готовые численные решения этой функции для частных случаев упрощают ее практическое применение; переход от относительных величин к абсолютным значениям не представляет труда. Средняя относительная температура восходящего фильтрационного потока в цилиндрическом талике для поперечного сечения, находящегося на определенной высоте над выходным отверстием иглы, также определяется в зависимости от критерия Фурье. Поэтому расчет начинают с вычисления критерия Фурье для восходящего фильтрационного потока, проходящего свой путь до горизонтального поперечного сечения на высоте Z м над коронкой иглы. Как известно (Гольдтман, 1958), для цилиндрического талика, радиус которого значительно меньше высоты, может применяться следующая формула для вычисления критерия Фурье, основанная на схематизированных представлениях о фильтрации:

$$Fo = \frac{\pi}{q c_v \gamma_v} \left(Z + 0.71R \right) \left(\lambda + \frac{qD}{\pi R^2} \right), \quad (1)$$

- где q — расход фильтрационного потока, $\text{м}^3/\text{час}$;
 $c_v \gamma_v$ — удельная теплоемкость и удельный вес воды; их произведение равно $1000 \text{ ккал}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$;
 Z — высота взятого сечения над коронкой иглы, м;
 R — радиус талика, м;
 λ — коэффициент теплопроводности талого водонасыщенного грунта, $\text{ккал}/\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$; примерные значения его: для песка — 1,4, для гравелисто-галечного грунта — 2, для супеси — 1,2;

D — коэффициент теплового рассеяния фильтрационного потока, имеющий в нашем случае размерность ккал/м² · град.

Коэффициент теплового рассеяния отражает роль поперечного конвективного переноса теплоты фильтрующейся водой, обусловленного обтеканием зерен грунта. Значения его в песчаных грунтах находятся в пределах 0—2, в галечных достигают 5—7. Для рассматриваемых слабопроницаемых грунтов значения D не превышают 1 и последний член формулы мало отражается на результатах.

В практике игловой гидрооттайки критерии Фурье восходящих фильтрационных потоков в цилиндрических таликах могут иметь самые разнообразные значения. Когда расход и скорость фильтрационного потока велики, критерий Фурье мал, значения его имеют порядок 0,005—0,05. В случаях медленной фильтрации, когда продолжительность теплообмена потока с окружающим мерзлым грунтом велика, значения критерия Фурье для верхнего сечения талика находятся обычно в пределах 0,05—0,2.

При малых значениях критерия Фурье (менее 0,05) достаточно точно относительная температура может быть вычислена по формуле (Лыков, 1952), выражающей первые четыре члена ряда:

$$\Theta_r = \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n I_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (2)$$

где Θ_r — относительная температура в точке с радиусом r м, на высоте Z м, при радиусе талика R м;

n — порядковый номер члена ряда;

$I_0(x)$ — бесселева функция первого рода нулевого порядка; значение ее находим в таблицах по аргументу $x = \mu_n \frac{r}{R}$;

e — основание натуральных логарифмов.

Значения A_n , μ_n и μ_n^2 приведены ниже:

n	A_n	μ_n	μ_n^2
1	1,60	2,40	5,8
2	—1,068	5,52	30
3	0,855	8,65	75
4	—0,730	11,8	139

При значениях критерия Фурье выше 0,05 можно ограничиться первым членом ряда (2). Расчетная формула в этом случае имеет более простой вид:

$$\Theta_r = 1,6 I_0 \left(2,4 \frac{r}{R} \right) e^{-5,8 Fo}. \quad (3)$$

Относительная температура пересчитывается в абсолютное значение (t_r °C) по известной начальной температуре воды фильтрационного потока t :

$$t_r = \Theta_r t.$$

Пусть, например, требуется рассчитать температуру на высоте $Z = 6$ м над коронкой иглы, в 1,2 м от оси талика, радиус которого

$R = 1,5$ м; тогда $\frac{r}{R} = 0,75$. Известны температура поступающей воды $t = 10^\circ$, расход $q = 3$ м³/час, теплофизические характеристики грунта: $\lambda = 2$ ккал/м · ч · град, $D = 1$ ккал/м² · град.

Сначала по формуле (1) рассчитываем критерий Фурье:

$$Fo = \frac{3,14}{3 \cdot 1000} \left(6 + 0,71 \cdot 1,5 \right) \left(2 + \frac{3 \cdot 1,5}{3,14 \cdot 2,56} \right) = 0,017.$$

Получено малое значение критерия; следовательно, дальнейший расчет ведется по формуле (2), для $n = 1, 2, 3$ и 4. Из таблиц бесселевых функций в математических справочниках, например Янке и Эмде (1949) или Бронштейн, Семендяев (1956), находим для $n = 1$, например, $I_0(2,2 \cdot 0,75) = I_0(1,8) = +0,34$; далее вычисляем показатель степени $-\mu_1^2 Fo = -5,8 \cdot 0,017 = -0,099$ и из таблиц находим соответствующее значение степени e , а именно 0,906. В таком же порядке ведется расчет для остальных значений n :

n	$\mu_n \frac{r}{R}$	$I_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right)$	$\mu_n^2 Fo$	$e^{-\mu_n^2 Fo}$	A_n	n -й член ряда (2)
1	1,8	0,34	0,0985	0,907	1,60	0,4925
2	4,14	-0,384	0,51	0,6005	-1,068	0,2465
3	6,49	0,255	1,27	0,281	0,855	0,062
4	8,35	0,083	2,36	0,0944	-0,730	-0,0057
$\Theta_r = \sum_{n=1}^{\infty} = 0,794$						

Из данной таблицы видно, что четвертый член ряда уже мало отражается на сумме.

Искомая температура равна $0,794 \cdot 10 = 7,94^\circ$.

Расчет по формуле (3) значительно проще и не требует пояснений примерами.

Для оценки средней относительной теплоотдачи всего восходящего фильтрационного потока $1 - \bar{\Theta}$ находят среднюю температуру $\bar{\Theta}$ для самого верхнего поперечного сечения талика, определяя сначала критерий Фурье по формуле (1). Тогда, согласно решению, заимствованному у А. В. Лыкова (1952),

$$\bar{\Theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (4)$$

где обозначения прежние. Эта зависимость представлена графически на рис. 9. Пользуясь кривой, можно по критерию Фурье, вычисленному по формуле (1), найти среднюю теплоотдачу фильтрационного потока в цилиндрическом талике заданной высоты. Теплоотдача выражена на графике в долях единицы.

В случаях, когда $Fo > 0,05$, достаточно вычислить первый член ряда (4); соответственно $\bar{\Theta} = 0,69 \cdot e^{-5,8 Fo}$.

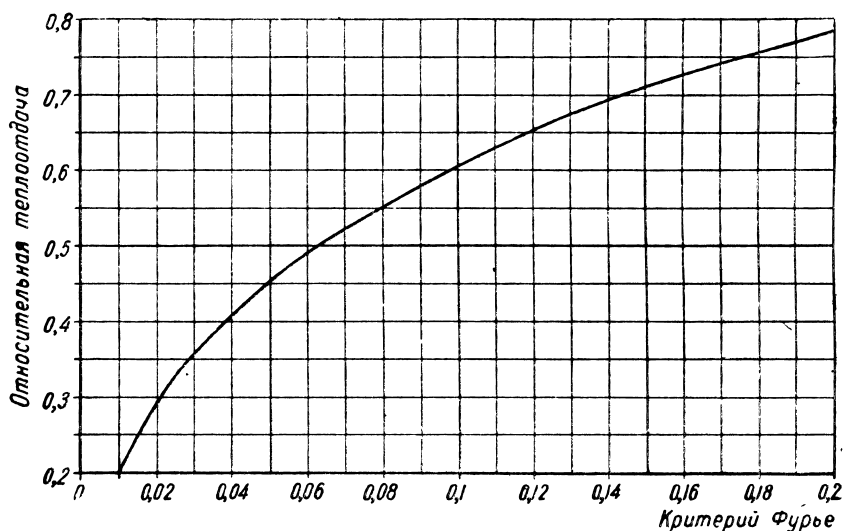


Рис. 9. Относительная теплоотдача (в долях единицы) фильтрационного потока в цилиндрическом талике в зависимости от критерия Фурье.

По рассмотренным формулам рассчитаны температуры, выяснено отклонение фактических температур от рассчитанных, что позволило заключить об отклонении действительных фильтрационных условий в рассматриваемых грунтах от идеальных.

На рис. 10 представлено рассчитанное расположение изотерм в плоскости вертикального разреза цилиндрического талика, состоящего, например, из равномерно водопроницаемого песка или гравия. Приняты значения $\lambda = 2$ ккал/м · ч · град; $D = 1$ ккал/м² · град. Распределение температур вычислено по критерию Фурье ряда горизонтальных сечений. Относительные температуры выражены в процентах от начальной температуры нагнетаемой воды. Разность плотностей и вязкости воды при рассматриваемых температурах примерно от 0 до +20° мало отражается на условиях фильтрации и не учтена. Средние относительные температуры для верхнего поперечного сечения талика обозначены на рис. 10 через $\bar{\Theta}$.

Из сравнения трех частей рис. 10 прежде всего видно, как значительно отражается на полноте теплоотдачи фильтрационного потока его расход. Так, рассматривая температуры по оси талика, можно заметить, что при расходе 0,2 м³/час на высоте 5 м температура здесь равна только 50% начальной, на высоте 10 м — только 16%. В этом случае (рис. 10, а) средняя относительная температура составляет на уровне 5 м только 22%, а на уровне 10 м — лишь 7%. Соответственно общая теплоотдача фильтрационного потока составляет 78 и 93%.

При расходе 0,7 м³/час (рис. 10, б) теплоотдача значительно меньше: проходя на высоту 5 м, центральные струи остывают лишь на 2%, а на высоте 10 м их температура только на 20% ниже начальной. Ядро потока со 100%-ной начальной температурой поднимается на высоту 3,5 м. Средняя относительная температура на высоте 5 м составляет 54%, а на высоте 10 м — 35%. Теплоотдача, следовательно, на этих высотах равна соответственно 46 и 65%.

Еще более вытянутую форму имеют изотермы на рис. 10, в. Фильтрационный поток с расходом 2,5 м³/час сохраняет ядро, совершенно не-

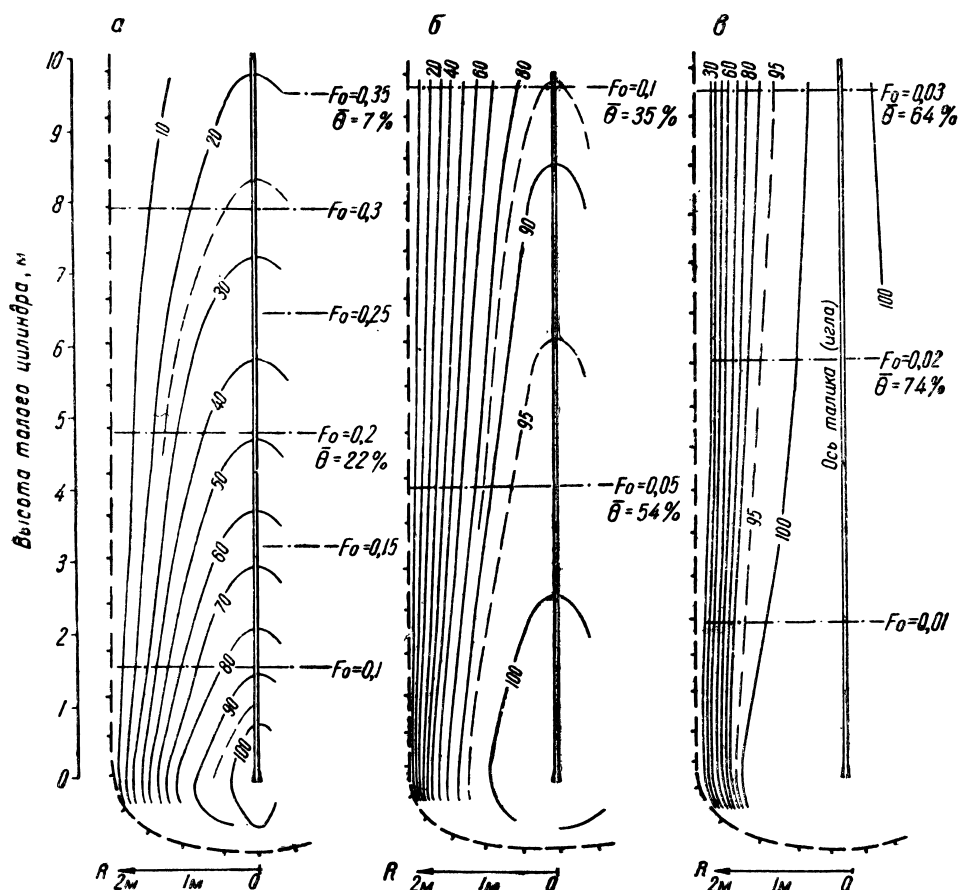


Рис. 10. Расчетное распределение относительных температур (в процентах) восходящего фильтрационного потока в цилиндрическом талике при трех расходах.
а — 0,2 м³/час; б — 0,7 м³/час; в — 2,5 м³/час.

успевающее охладиться, на протяжении более 10 м. Это значит, что даже в нормально фильтрующих грунтах подача столь большого количества воды через иглу связана с непроизводительной потерей части ее в ядре потока, не отдающем теплоты. Общая теплоотдача всего фильтрационного потока при таком расходе составляет до высоты 5 м 26%, а до высоты 10 м — 36%.

Изображение распределения температур здесь имеет целью дать эталон, с которым можно далее сопоставить фактическое положение изотерм, полученное на опытном участке.

Нужно отметить, что в сравнительно узких цилиндрических таликах, диаметр которых в несколько раз меньше высоты, если коэффициент теплового рассеяния грунтов мал, то распределение изотерм в плоскости вертикального разреза мало изменяется с ростом диаметра талика. Уменьшаются только температурные градиенты по радиусу. В связи с этим изображения на рис. 10 с известной степенью приближения характеризуют распределение температур для указанного определенного расхода воды, сохраняющиеся без больших изменений для любого диаметра в пределах от 2 до 6 м; масштаб радиуса талика показан условно.

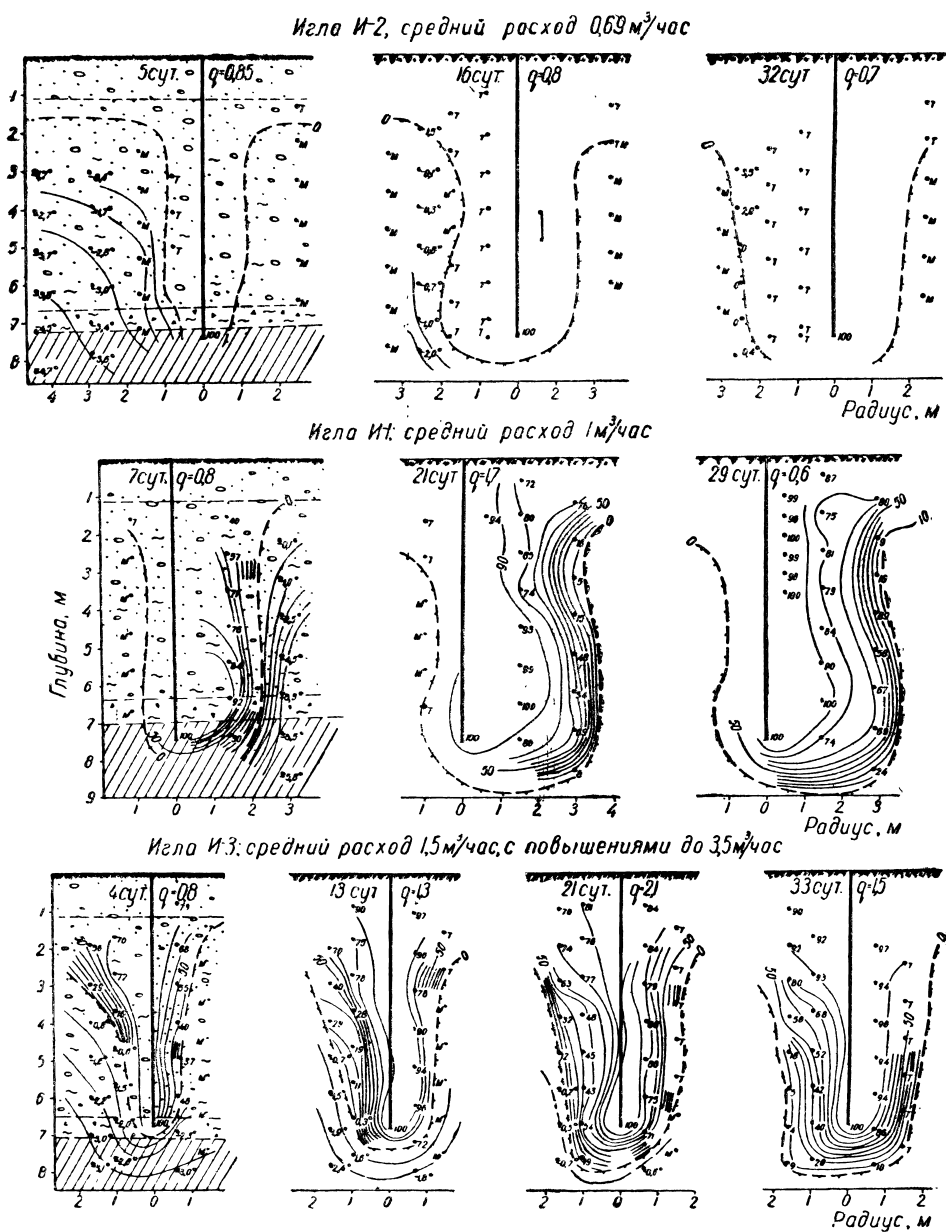


Рис. 11. Фактическое распределение относительных температур (в процентах) в таликах трех опытных игл (изотермы через 10%). В мерзлой зоне показаны температуры и изотермы через 1°. М и Т — мерзлое и талое состояние грунта по датчику. Надписаны продолжительность действия иглы (в сутках) и расход воды q (в кубических метрах в час) в день измерений.

На рис. 11 изображены фактические изотермы в вертикальной осевой плоскости; как видно, степень понижения температур по вертикали гораздо больше, чем следовало ожидать при данном расходе; градиенты же температур по радиусу намного меньшие. Например, центральная область со стопроцентной температурой ни в одном случае не рас-

пространяется на высоту 5—6 м (считая от уровня выходного отверстия иглы), хотя из сопоставления с рис. 10 следует, что при расходах около 1—1,5 м³/час центральные части фильтрационного потока совершенно не успевают охладиться на этом отрезке своего пути.

Распределение изотерм в талике иглы И-1 на 27 июня, то есть на седьмые сутки периода ее действия, когда расход был 0,8 м³/час, должно было быть аналогично случаю с расходом 0,7 м³/час по рис. 10. Однако фактически изотермы оказались вдвое более разреженными. Распределение изотерм в том же талике на 11 июля (двадцать первые сутки) при расходе 1,7 м³/час должно было приблизительно соответствовать случаю, изображенному на рис. 10, б; но область 100%-ной относительной температуры фактически не распространяется на высоту 5 м и более над коронкой; изотерма 50% расположена в два раза дальше от границы талика, чем в расчетном случае. На двадцать девятые сутки при расходе 0,6 м³/час фактические изотермы более разрежены, чем в соответствующей схеме рис. 10, а.

Фактическое распределение изотерм в талике иглы И-3 (рис. 11) также отличается от картины их распределения, изображенной на рис. 10, б—в. Так, фактическое распределение температур на тринадцатые, двадцать первые и тридцать третьи сутки действия, когда расход был 1,3; 2,1 и 1,5 м³/час, градиенты температур по направлению радиуса талика в два-три раза меньше, чем на изображениях рис. 10, б—в; цент-

Таблица 7

Анализ распределения температур в талике иглы И-1

Высота над коронкой, м	Критерий Фурье по общему расходу	На радиусе 0,4 м				На радиусе 1,9 м			
		наблюдалось		вычислено по относительной температуре		наблюдалось		вычислено по относительной температуре	
		температура, град.	относительная температура, %	критерий Фурье	коэффициент использования воды (%)	температура, град.	относительная температура, %	критерий Фурье	коэффициент использования воды (%)
1) За период 7—15 июля ($R=2,13$ м; $q=1,7$ м ³ /час; $t=13^{\circ}$)*									
5	0,0254	10,4	80	0,1	0,25	2,1	18	0,072	0,35
4	0,0216	11,1	85	0,09	0,24	0,7	5,4	0,25	0,09
3	0,0171	9,6	74	0,12	0,14	2,0	15	0,07	0,25
2	0,0137	12	92	0,07	0,20	6,2	47	0,015	0,91
1	0,0098	12,9	99	0,04	0,26	7,0	54	0,01	0,98
Среднее 0,22					Среднее 0,52				
2) За период 16—23 июля ($R=2,48$ м; $q=0,6$ м ³ /час; $t=11^{\circ}$)									
5	0,71	8,3	76	0,12	0,59	2,14	19,5	0,15	0,47
4	0,061	8,9	81	0,10	0,61	1,8	16	0,19	0,32
3	0,05	8,7	79	0,11	0,45	2,14	19,5	0,15	0,33
2	0,04	9,3	85	0,09	0,44	6,4	58	0,03	1,3
1	0,029	9,9	90	0,075	0,39	7,3	66	0,022	1,3
Среднее 0,49					Среднее 0,75				

* R — средний радиус талика; q — расход нагнетаемой воды; t — температура нагнетаемой воды.

3) За период 27 июля — 5 августа ($R=1,61$ м; $q=2,05$ м³/час; $t=10,5^\circ$)

4	0,017	8,3	79	0,08	0,21	8,1	77	0,04	0,43
3	0,014	9,0	86	0,068	0,21	5,1	48	0,10	0,14
2	0,011	9,2	88	0,062	0,18	4,7	45	0,11	0,10
1	0,007	7,9	75	0,09	0,08	4,5	43	0,12	0,06
Среднее 0,17									Среднее 0,18

4) За период 6—17 августа ($R=1,85$ м; $q=1,45$ м³/час; $t=11,5^\circ$)

4	0,025	10,8	94	0,05	0,50	10,7	93	0,035	0,72	9,2	80	0,005	1
3	0,02	11,0	96	0,04	0,5	7,8	68	0,085	0,24	6,4	56	0,012	1
2	0,015	10,8	94	0,05	0,3	6,0	52	0,12	0,13	2,1	18	0,1	0,15
1	0,011	10,8	94	0,05	0,22	6,7	58	0,1	0,11	0,6	5	0,3	0,04
Среднее 0,38									Среднее 0,30				

5) За период 18—24 августа ($R=3,6$ м; $q=2,55$ м³/час; $t=13^\circ$)

4	0,0146	10,5	81	0,08	0,18	10,5	81	0,047	0,31	9,9	76	0,006	1
3	0,0119	10,4	83	0,079	0,15	7,8	60	0,095	0,13	6,6	51	0,016	0,7
2	0,0091	10,5	81	0,08	0,11	6,7	52	0,12	0,08	3,1	24	0,09	0,1
1	0,0065	10,6	85	0,07	0,09	6,1	47	0,13	0,05	1,9	14	0,15	0,04
Среднее 0,13									Среднее 0,142				

ральная область с относительными температурами 95—100%, не распространяется фактически на высоту 5 м (от горизонта выходного отверстия иглы), как следовало бы ожидать, судя по расчетному распределению изотерм при расходах воды того же порядка.

Более точное, количественное сопоставление фактических температур с рассчитанными, исходя из предположения о фильтрации всей нагнетаемой воды, дано в табл. 7 и 8 по таликам опытных игл И-1 и И-3.

В первом столбце таблиц указана высота расположения точек наблюдения, отсчитанная от горизонта выходного отверстия коронки иглы. Во втором столбце приведены критерии Фурье, вычисленные по формуле (1), исходя из полного расхода нагнетаемой воды и радиуса талика на данный момент. При этих вычислениях, так же как и в случае рис. 10, приняты значения $\lambda = 2$ ккал/м · ч · град и $D = 1$ ккал/м² · град, свойственные водонасыщенному грунту опытного участка. Таким образом, критерии Фурье, вычисленные по расходу воды через иглу, характеризуют продолжительность охлаждения такого мнимого фильтрационного потока, расход которого равен расходу нагнетаемой воды. Но, как уже установлено из анализа данных о действительной скорости движения воды вверх по талику, далеко не весь расход нагнетаемой воды поднимается по талику в виде фильтрационного потока. Значительная часть воды проводится по суффозионным каналам. Вследствие этого действительный равномерно распределенный фильтрационный поток по талику должен иметь меньший расход, а время его подъема, характеризующее критерием Фурье, должно быть больше указанного во втором столбце таблицы.

Фактические температуры по горизонтам для каждой скважины t_f пересчитаны в относительные температуры

$$\Theta_f = \frac{t_f}{t},$$

выраженные в процентах. Далее использовались формулы (1) и (2); в данном случае известными были фактические значения Θ_r и отношение $\frac{r}{R}$ (здесь r — расстояние скважины с датчиками от оси цилиндрического талика; R — радиус этого талика на дату расчета). По этим данным определялись соответствующие критерии Фурье. Полученные критерии Фурье отражают условия охлаждения действительного фильтрационного потока за время его продвижения по талому грунту до датчика, того потока, который расходует часть начального запаса теплоты на оттаивание учтенных объемов грунта по периферии талика.

Поскольку при прочих равных условиях расход фильтрационного потока обратно пропорционален времени его продвижения, отношение расхода действительного фильтрационного потока q_d к общему расходу нагнетаемой воды q приблизительно определяется из соотношения критериев Фурье:

$$\varphi = \frac{q_r}{q} = \frac{Fo_d}{Fo_{\text{факт}}}.$$

Это соотношение можно назвать коэффициентом использования воды.

Значения $Fo_{\text{ф.к.т.}}$, полученные по данным наблюдений на опытном участке, приведены в последних колонках табл. 7 и 8 по каждой из связей термодатчиков (Т-1, Т-2 и т. д.). Значительный разброс значений

критерия Фурье по вертикали объясняется влиянием неоднородностей грунта и неравномерностью распределения в нем фильтрующих зон. Кроме того, на вычисленных значениях этого критерия отразилось некоторое несоответствие между действительным направлением фильтрационных токов в нижней части талика и принятой схемой параллельных восходящих токов. Средние значения коэффициента φ по каждой связке термодатчиков, учтенных в таблице, скрадывают влияние неравномерностей распределения фильтрующих зон в талике и позволяют установить определенную зависимость относительной величины действительной фильтрации от общего расхода воды, нагнетаемой через иглу. Графически эта зависимость представлена на рис. 12.

Значения коэффициента использования воды уменьшаются по мере роста расхода воды на иглу: при расходе $0,6 \text{ м}^3/\text{час}$ получено $\varphi = 0,65$, при $1,5 \text{ м}^3/\text{час}$ — $\varphi = 0,3$, а при расходе $2,5 \text{ м}^3/\text{час}$ — $\varphi = 0,13$. Нужно иметь в виду, что эти данные представляют собою частный случай, относящийся к пылевато-дресвяному грунту Чай-Урынской долины, описанному в начале статьи. Более водопроницаемые грунты, по видимому, характеризуются более высокими значениями коэффициента использования воды, а для песчаных и гравелисто-песчаных грунтов его значение при рассматриваемых расходах близко к единице. Наоборот, в толщах связных грунтов — тяжелых супесей или суглинков — действительная фильтрация должна, очевидно, составлять еще меньшую долю.

В результате сопоставления температур фильтрационного потока подтвердились и уточнились выводы о соотношении расходов действительного фильтрационного потока и суффозионных струй, полученные путем измерения истинной скорости фильтрации.

По фактическому распределению температур в верхнем горизонтальном сечении таликовых цилиндров (см. рис. 11) на уровне 5 м над коронкой ориентировочно подсчитаны средневзвешенные температуры; по ним определены значения относительной теплоотдачи всего фильтрационного потока до этого сечения и критерии Фурье, соответствующие такой теплоотдаче. Найденные фактические данные сопоставляются в табл. 9 с значениями критерия Фурье и относительной теплоотдачи, вычисленными по формулам (1) и (2) на основании полного расхода нагнетаемой воды.

Во всех случаях, приведенных в табл. 9, фактическая относительная теплоотдача и критерий Фурье оказались больше соответствующих значений, вычисленных по полному расходу нагнетаемой воды. Обращая внимание на величину расхода по каждому случаю, можно заметить, что отношение фактических значений критерия Фурье и теплоотдачи к рассчитанным тем больше, чем больше расход нагнетаемой воды. Вновь, таким образом, подтверждается, что расход действительного фильтрационного потока, эффективного для теплоотдачи, меньше полного расхода нагнетаемой воды, что часть струй обособляется в суффозионных каналах, причем при больших расходах эта часть больше.

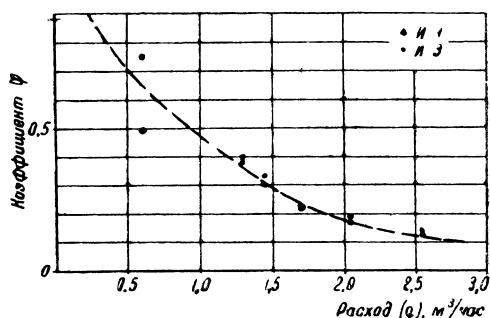


Рис. 12. Зависимость коэффициента использования воды φ от расхода q (по опытным данным).

Таблица 9

Сопоставление условий теплоотдачи

№ иглы	Дата	Радиус талика, м	Рас- ход, м ³ /час	По фактическому распределению температур		По расчету для данного расхода воды		Отно- шение $\frac{Fo_q}{Fo_{факт}}$
				$1-\Theta$	$Fo_{факт}$	$1-\Theta$	Fo_q	
И-1	28 июня	1,5	0,8	66,6	0,125	45,5	0,0508	0,406
»	11 июля	1,9	1,7	62,8	0,109	34,4	0,0256	0,23
»	19 »	2,0	0,6	61,2	0,102	53,5	0,067	0,65
И-3	15 »	1,4	0,8	46	0,053	48,0	0,048	0,9
»	23 »	1,55	1,3	50	0,063	37,1	0,032	0,51
»	31 »	1,75	2,1	52,9	0,072	30,2	0,0202	0,27

Из обобщения найденных величин теплоотдачи по иглам опытного участка определена зависимость степени использования теплоты воды от расхода нагнетания и от радиуса талика, представленная в табл. 10. Снижение относительной теплоотдачи в слабопроницаемых грунтах по мере увеличения расхода более значительно, чем в нормально фильтрующих грунтах.

Таблица 10

Относительная теплоотдача нагнетаемой воды (в процентах)

Расход, м ³ /час	Диаметр талика, м							
	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6
0,5	50	46	42	40	36	35	33	29
0,8	37	34	32	30	28	26	25	22
1,0	22	21	19	18	17,4	16,6	16	14
1,5	12	11,5	11	10,4	10	9,7	9	8

С увеличением расхода соответственно понижается производительность иглы при прочих равных условиях (табл. 11).

Таблица 11

Зависимость производительности иглы (в кубических метрах в сутки) от расхода воды и диаметра талика, по данным опытного участка (температура воды — 10°, льдистость грунта — 250 кг/м³)

Расход, м ³ /час	Диаметр талика, м							
	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6
0,5	2,4	2,2	2,0	1,92	1,72	1,67	1,58	1,39
0,8	2,84	2,61	2,46	2,3	2,15	2,0	1,92	1,69
1	2,1	2,0	1,82	1,73	1,67	1,59	1,53	1,34
1,5	1,73	1,63	1,59	1,5	1,44	1,4	1,3	1,15

Для сравнения приведем некоторые данные о производительности иглы в удовлетворительно фильтрующих песчано-гравелистых грунтах (табл. 12) при прочих равных условиях, когда температура воды — 10° , содержание льда — 250 кг/м^3 , глубина погружения — 8 м.

Таблица 12

Производительность иглы (в кубических метрах в сутки) в песчано-гравелистых грунтах с коэффициентом фильтрации 30 м/сутки

Расход, м ³ /час	Диаметр талика, м			
	2	3	4	5
0,5	2,7	2,6	2,54	2,48
1,0	4,4	4,3	4,2	4,1
1,8	7,8	6,9	6,7	6,5

Таким образом, в глинистых грунтах опытного участка нагнетание воды с увеличенным расходом не только не повышало производительности, но приводило даже к понижению суточной производительности иглы, поскольку все большая часть воды исключалась из фильтрации и полезного теплообмена. В этом заключается главное качественное различие условий теплообмена при игловой оттайке слабопроницаемых грунтов от условий оттаивания песчано-гравелистых грунтов, которое должно найти отражение в практически применяемых режимах производства массовой игловой гидрооттайки дражных полигонов. На участках, сложенных глинистыми грунтами, оптимальными оказываются режимы нагнетания воды с малым расходом в течение продолжительного времени. К этому следует приспособлять оборудование, нагнетательные трубы.

Наибольшая производительность иглы достигнута, судя по данным табл. 11, при значениях расхода нагнетаемой воды около $0,8\text{--}1,2 \text{ м}^3/\text{час}$. Производительность кубического метра нагнетаемой воды возрастает с уменьшением расхода.

На полигонах игловой гидрооттайки иногда, желая ускорить процесс, нагнетают через иглы в слабопроницаемые пылеватосупесчаные грунты воду с расходом $2\text{--}3 \text{ м}^3/\text{час}$. Теперь ясна нецелесообразность столь интенсивного нагнетания, обуславливающего непроизводительные затраты электроэнергии на насосных установках.

Эмпирические данные проведенного опыта могут быть сопоставлены с теми значениями срока действия иглы, которые рассчитаны по формулам (39) и (54) из работы автора (1958) и приведены в таблицах, приложенных к Временной инструкции по игловой гидрооттайке (ВНИИ-1, 1959 г.). Удовлетворительная сходимость результатов оказалась по данным для игл И-1 и И-2; фактическое время действия иглы в большинстве случаев близко совпадало с временем, указанным в инструктивных таблицах для данных условий. Но, как видно из табл. 13, по талику иглы И-3 фактическое время оттаивания до определенного диаметра значительно превысило время, соответствующее данным условиям согласно инструктивным таблицам, в чем отразилось влияние непроизводительного течения воды по суффозионным каналам. Следовательно, необходимо в инструктивных материалах указывать предельно допусти-

мые значения расхода воды через иглу, превышение которых не дает прироста производительности игл. Превышение этих пределов, кроме того, требует внесения поправки в табличные данные о сроках действия иглы.

Таблица 13

Сравнение фактического времени оттаивания пылеватосупесчаных грунтов опытного участка с расчетными значениями времени (для водопроницаемых грунтов) при глубине погружения 6 м и прочих равных условиях

№ иглы	Диаметр табика (шаг иглы), м	Расход, м ³ /час	Темпера- тура воды, град.	Фактическое время оттаивания, сутки	Расчетное время от- таивания для данных условий, сутки
И-1	3,0	0,75	11	8,3	13,5
»	4,0	0,9	11	18	16,5
»	5,0	1,05	12	29	29
И-2	3,0	0,63	12	12	15
»	4,1	0,65	11	26	23
»	5,0	0,7	11	41	41
И-3	3,0	1,22	12	21	8
»	4,0	1,47	10,6	34	26

В литературных источниках встречаются неточные суждения о наиболее выгодных режимах нагнетания воды при иговой гидрооттайке. В одной из своих статей А. И. Калабин (1956) указывал, что оптимальный расход при коэффициенте фильтрации грунта 16 м/сутки равен 1 л/сек (3,6 м³/час); здесь взято явно преувеличенное в два-три раза значение. В другой работе (1957) тот же автор утверждает, что повышение расстояния между иглами «увеличит коэффициент теплоотдачи нагнетаемой воды». Это противоречит наблюдениям и расчетным данным.

Практические средства увеличения продолжительности действия игл

В климатических условиях Магаданской области нагнетание естественно нагретой воды через водяные иглы, как известно, можно производить в течение около 120 суток, начиная со второй декады мая и кончая во второй декаде сентября. Но в начале и конце этого периода затрачивается довольно продолжительное время на развертывание и сворачивание работ, то есть на погружение всего имеющегося количества игл (обычно на дражных полигонах это 1,5—2 тыс.) и на извлечение игл, отработавших положенный срок. На буровые работы по погружению игл первый раз за сезон требуется обычно от 20 до 30 суток. За 20—30 суток до окончания периода нагнетания воды буровые работы прекращают, после чего количество действующих игл постепенно сокращается. Вследствие этого средняя продолжительность действия имеющегося парка игл составляет лишь около 90 суток; но она может быть увеличена на 30%, если обеспечивается возможность оставления в грунте погруженных игл на зимний период (в начале следующего сезона погруженные частично замороженные иглы могут быть быстро введены в действие). Тогда время на развертывание и сворачивание работ отпадает,

буровые работы могут продолжаться осенью и обеспечивать постоянное максимальное число игл в грунте.

Вторым технологическим путем увеличения продолжительности действия игл может быть замена буровых труб с победитовыми коронками менее дефицитными сварными нагнетательными трубами несколько меньшего диаметра. Тогда количество одновременно действующих погруженных игл не ограничивается необходимостью оборотного использования коронок и игловых труб на новых точках погружения. Буровые работы в этом случае могут производиться и зимой.

Но любая игла или нагнетательная труба, погруженная в грунт зимой, промерзает: в ней образуется ледяная пробка; окружающий ее грунт, если он предыдущей осенью оттаивался, зимой в верхнем слое промерзает. Прежде чем начать с наступлением теплого сезона нагнетание воды, необходимо иглу прогреть, оттаять ледяную пробку внутри, а также грунт, прилегающий снаружи к стенкам трубы и к выходным отверстиям в нижнем конце трубы. Задача перенесения окончания срока действия иглы с одного сезона в следующий и применения зимнего бурения (с целью общего удлинения периода нагнетания воды для игловой гидрооттайки глинистых грунтов) повлекла за собой необходимость разработки технических средств быстрого массового восстановления действия замороженных игл. Практически проверены два приема восстановления игл в действии: 1) электронагрев заложенными в трубу проводами и 2) прогрев струей теплой воды.

Для электронагрева замороженных игл применяется медный провод с эмалевой и хлопчатобумажной изоляцией, марок ПБД, ПЭЛ или ПЭЛБО, диаметром от 0,7 до 1,1 мм. Полихлорвиниловая изоляция при нагревании провода расплавляется и в данном случае не пригодна. Длина отрезка провода в два раза превышает длину иглы. Провод перед заложением в иглу складывают вдвое и покрывают солидолом, что исключает возможность разрыва провода из-за его смерзания с ледяной пробкой, которая в процессе промерзания иногда движется вдоль трубы. Закладка провода облегчается разборным шомполом. Провод следует закладывать осенью, после прекращения питания игл водой. Небольшие концы провода оставляют над устьем игловой трубы.

В начале следующего теплого сезона провод обеспечивает возможность быстрого (в течение 15—20 мин.) разогрева иглы по всей ее глубине током низкого напряжения (20—40 в). Мощность тока должна быть 2—3 квт. Понижающий трансформатор мощностью 25 квт позволяет параллельно отогревать до 10 игл. Продолжительность подачи тока через иглу можно определить, исходя из нормы 0,15 квт·ч на 1 пог. м иглы. Провод из разогретой иглы извлекают и сохраняют для повторного использования в следующем зимнем сезоне. Обычно во время электроразогрева игла начинает принимать воду, то есть налитая вода начинает фильтроваться по затрубному грунту вверх. В исключительных случаях дополнительный разогрев производят при помощи водоструйной трубки. Устройство проволочного электронагревателя поясняется рис. 13. На время разогревания верхние концы тонкого провода наращивают более толстым проводом и помещают в воду во избежание перегорания в воздухе.

Водоструйный нагреватель состоит из резиновой трубки диаметром 8 мм, соединенной в нижнем конце с тяжелым наконечником, изготовленным из толстостенной медной трубки. Трубку опускают в иглу, пропуская воду с температурой 40—50°. Наконечник, опираясь на лед, тянет за собой резиновую трубку по мере оттаивания льда; происходит это со

скоростью около 0,6 м в минуту. После того как нижние отверстия иглы и прилегающий грунт оттаивают, вода перестает изливаться через край игловой трубы и уходит в восстанавливающийся фильтрационный поток. На этом процесс разогрева заканчивается.

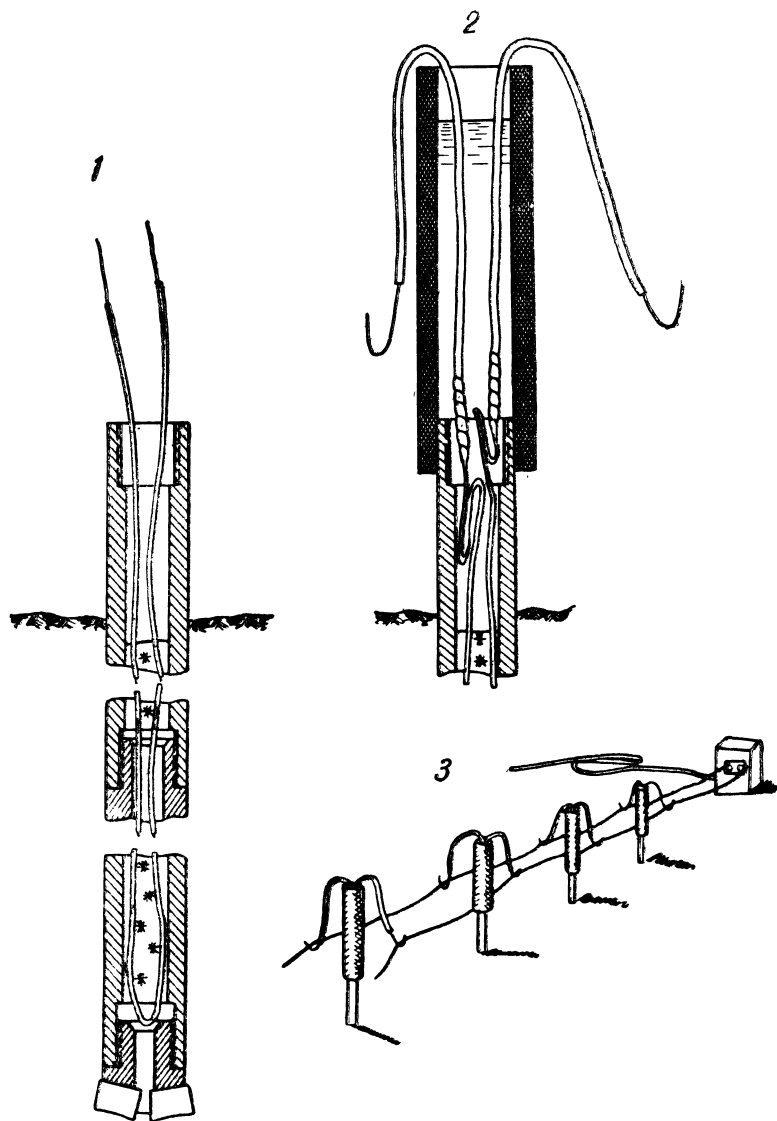


Рис. 13. Проволочные нагреватели для восстановления действия игл после зимы (закладываются заблаговременно).

1 — провод в игле зимой; 2 — выводные концы в момент разогрева; 3 — общий вид соединения с понижающим трансформатором.

Непрерывная подача резиновой трубки в иглу при одновременном разогреве нескольких игл облегчается применением конических воронок — резервуаров трубки, — в которых она уложена спиралями.

Вода из общей сети водоснабжения гидрооттайки нагревается в спирально загнутой стальной трубе длиной 5 м, помещенной в переносную печь. Применялись также небольшие водогрейные котлы, нагреваемые электроспиралью.

ВЫВОДЫ

Исследование фильтрации и теплообмена на опытном участке, находившемся в типичных условиях производства игловой гидрооттайки дражных полигонов, позволило выяснить особенности оттаивания слабопроницаемых связных грунтов, представленных тяжелой пылеватой супесью с дрсвой, галькой и небольшими валунами (коэффициент фильтрации — от 0,3 до 15 м/сутки).

Форма талика, развивающегося за счет теплоотдачи восходящего фильтрационного потока, близка к цилиндрической, но у игл с малым расходом воды талик несколько расширен в нижней части, а у иглы, через которую воду нагнетали с большим расходом, вызывающим образование суффозионных каналов, талик приобрел сужающееся к низу поперечное сечение.

Установлены два вида движения нагнетаемой воды от концевого отверстия иглы вверх по оттаявшему слабопроницаемому грунту, а именно:

фильтрация, использующая макропоры грунта и распределяющаяся по всему объему талика, и

течение по отдельным суффозионным каналам с выпором и выносом мелкозема.

Водопроводящая пористость, обеспечивающая действительную фильтрацию, составляла лишь около одной десятой общей пористости грунта. Но пути движения воды по этим макропорам обеспечивали равномерно распределенный перенос теплоты, наподобие фильтрационного потока в песке.

По суффозионным каналам вода поднималась через талик с большой скоростью, исключаяющей возможность полезной теплоотдачи.

При нагнетании воды с расходом около 0,7 м³/час суффозионные каналы не играли заметной роли, и теплоотдача фильтрационного потока с таким расходом была равна по величине теплоотдаче идеально фильтрующего грунта. Нагнетание с более значительным расходом (до 1,3 м³/час) сопровождалось уменьшением относительной теплоотдачи из-за потери части воды в суффозионных каналах, но давало прирост суточной производительности иглы с увеличением расхода.

Превышение этого предела, в особенности при доведении расхода до 2,5—3,5 м³/час, сопровождалось потерей большей части воды в суффозионных каналах и снижением не только относительной теплоотдачи нагнетаемой воды, но и абсолютной теплоотдачи ее, то есть суточной производительности иглы.

Следовательно, на полигонах, сложенных глинистыми грунтами, наибольший производственно-экономический эффект игловой гидрооттайки может быть достигнут при нагнетании воды с малым расходом на иглу в течение продолжительного времени. Увеличение продолжительности действия иглы обеспечивает минимум затрат воды и электроэнергии на ее нагнетание, улучшая в то же время качество работ, полноту и равномерность оттаивания глинистого грунта. В связи с этим в технологию игловой гидрооттайки следует вносить изменения, позволяющие увеличить продолжительность нагнетания воды через установленную иглу, на-

пример перенос периода действия иглы с одного сезона в следующий с применением средств быстрого восстановления циркуляции воды весной, зимнее бурение и продление времени бурения осенью, замену буровых труб менее дефицитными — газовыми — и др.

Поскольку суффозионные процессы наиболее интенсивны в течение первых дней периода действия иглы, когда поперечное сечение еще мало ($2-3 \text{ м}^2$), целесообразно применять ограничение расхода воды в это время примерно до $0,5 \text{ м}^3/\text{час}$. Такое ограничение еще не вызывает опасности промерзания талика в местах пересечения наиболее плотных и связных слоев грунта, но предотвратит образование сильнопромытых суффозионных каналов в осевой части талика; в последующие дни фильтрация с увеличенным расходом более равномерно распределится по развивающемуся талику. Для ограничения расхода рекомендуется применение шайб-диафрагм с отверстием диаметром $4-5 \text{ мм}$, помещаемых в нарезанную часть верхней игловой трубы так, чтобы, отвернув переходник с резиновым рукавом, шайбу можно было снять.

Во время бурения и в первые 3 час. действия иглы ограничивать расход не следует, поскольку это привело бы к случаям замерзания игл в действии.

Опытом подтвердилась возможность достаточно точного определения продолжительности действия иглы по формуле, основанной на тепловом подобии талика иглы с охлаждаемым цилиндром, которая использована для составления таблиц Временной инструкции по игловой гидрооттайке. Но соответствие фактических данных с расчетными нарушается в том случае, когда в талике образуются суффозионные каналы, выводящие часть воды, то есть при чрезмерно больших расходах. Доля общего расхода воды, падающая на суффозионные каналы и не участвующая в теплоотдаче, практически в изученных грунтах может достигать 80% , если расход воды не ограничен. В этом случае для теплоотдачи используется только 20% нагнетаемой воды.

Опытами установлено для слабопроницаемых грунтов закономерное снижение теплоотдачи фильтрационного потока в талике иглы по мере нарастания диаметра этого талика, как в грунтах хорошо проницаемых; соответственно к слабопроницаемым грунтам применимы те же указания о назначении предельно допустимого шага расстановки игл на полигонах.

Таким образом, необходимо предусматривать для слабопроницаемых грунтов расстановку игл на таких же расстояниях, как и при хорошо проницаемых, но увеличивать продолжительность действия установленной иглы, ограничивая расход. Глубина погружения нагнетательных игл или труб в грунт должна быть равна заданной глубине протаивания.

Восходящий фильтрационный поток в таликах опытных игл с достаточно большим расходом поддерживался за счет градиента напоров примерно $0,2-0,25$. Следовательно, потери напора на фильтрацию по грунту значительно меньше той нормы минимума напора воды, подводимой к игле, которая установлена, исходя из необходимости преодоления противодействия всего столба грунтовой воды в случаях, когда в игле и подводящем шланге случайно появляется воздушная пробка. Эта норма остается в силе; напор у отвода от распределительной трубы к шлангу, питающему иглу, должен быть численно равен глубине погружения иглы в грунт.

Практическая возможность изменения режима нагнетания воды в сторону уменьшения расхода и удлинения срока действия иглы обеспечивается средствами разогрева замороженных игл, оставленных в грунте на зиму или погруженных в течение зимы. Соответствующие технические средства разработаны и опробованы в промышленных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

БРОНШТЕЙН И. Н., СЕМЕНДЯЕВ К. А. Справочник по математике. Гостехиздат, М., 1956.

ГОЛЬДТМАН В. Г. Теплообмен в фильтрующих крупнозернистых грунтах при дренажной и игловой гидрооттайке. Тр. ВНИИ-1, Мерзлотоведение, вып. 11, Магадан, 1958.

Инструктивные положения по разработке вечномёрзлых россыпей, ч. 1. ВНИИ-1, Магадан, 1959.

ИСТОМИНА В. С. Фильтрационная устойчивость грунтов. Госстройиздат, М., 1957.

КАЛАБИН А. И. Проблемы мерзлотоведения в связи с освоением Северо-Востока. Сб. «Дальстрой» (к 25-летию). Магаданск. кн. изд., 1956.

КАЛАБИН А. И. Некоторые итоги исследований в области мерзлотоведения. «Колыма», № 10, 1957.

ЛЫКОВ А. В. Теория теплопроводности. Гостехиздат, М., 1952.

ЯНКЕ Е. и ЭМДЕ Ф. Таблицы функций с формулами и кривыми. Гостехиздат, М.—Л., 1949.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	1
Опытный участок	1
Характер движения воды по талику и производительность иглы	8
Распределение температур в таликах	24
Практические средства увеличения продолжительности действия игл	38
Выводы	41
Литература	43

ТРУДЫ ВНИИ-1

Всесоюзный Магаданский научно-исследовательский институт издает и рассылает наложенным платежом свои работы отдельными выпусками по разделам:

МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ

ГЕОЛОГИЯ

ГОРНОЕ ДЕЛО

ОБОГАЩЕНИЕ РУД И РОССЫПЕЙ, ХИМИЯ И
МЕТАЛЛУРГИЯ

МЕСТНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И
КОНСТРУКЦИИ

МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗ-
ВОДСТВА

По мере издания отдельных выпусков часть тиража брошюруется в соответствующие тома трудов. В 1960 году намечено издание следующих томов:

Том XVI — Горное дело

» XVII — Геология

» XVIII — Мерзлотоведение

» XIX — Обогащение и металлургия

» XX — Местные строительные материалы и
конструкции

НАШ АДРЕС:

Магадан, улица Сталина, 11, Редакционно-издательский
отдел

Сканирование - Беспалов, Николаева
DjVu-кодирование - Беспалов



600
2

30
MAT.
40

2 р. 55 к.

(С 1 января 1981 г. — 26 коп.)

РСФСР
МАГАДАНСКИЙ СОВЕТ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЗОЛОТА И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

ВНИИ-1

В. Г. ГОЛЬДТМАН

**Особенности оттаивания слабопроницаемых
грунтов водяными иглами**



МАГАДАН

1960