

УДК 622.691

**А.Н. Карпухин, О.И. Савич, С.Д. Сурин**

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОТТАИВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПЕСКОВ ПРИ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧЕ НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ**

*Целью работы является создание эффективной методики расчета параметров для строительства подземных резервуаров в многолетнемерзлых песках.*

*Ключевые слова:* скважинная гидродобыча, массив мерзлого песка, технологические скважины.

**Семинар № 20**

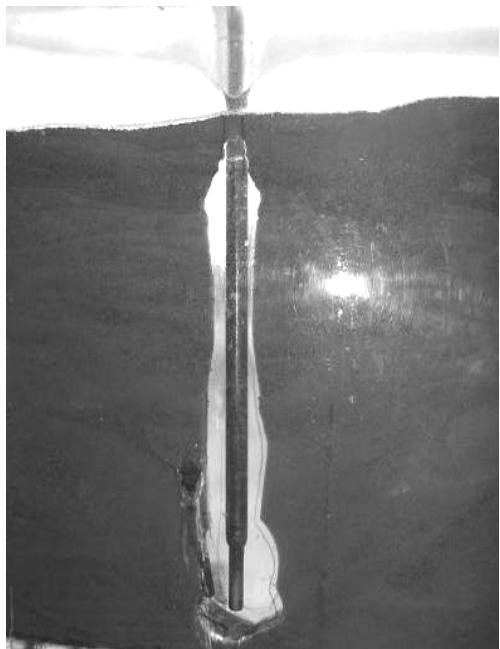
---

**Д**ля достижения поставленной цели решалась задача по определению параметров подземного резервуара на каждой ступени строительства для получения устойчивой подземной емкости заданного объема и конфигурации.

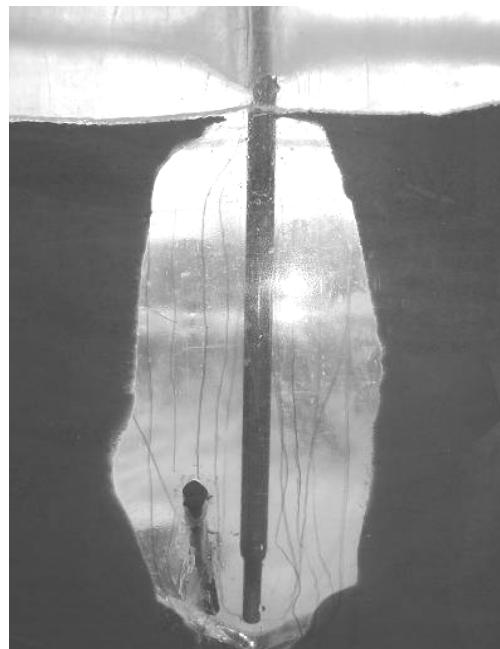
Механизм оттаивания многолетнемерзлых пород исследовался на плоских моделях методом физического моделирования с сохранением геометрического и термодинамического подобия. В массив мерзлого песка по вертикальному водоводу подавался теплоноситель (горячая вода) с фиксированным расходом. Процесс формирования камеры проводился в одну ступень, уровень нерастворителя поддерживался на постоянной высоте. В результате было установлено, что на скорость подвигания стенки забоя (оттаивание) влияют три параметра: температура вводимого теплоносителя (при условии, что расход теплоносителя постоянен во времени), величина диаметра ( $D$ ) и высоты ( $H$ ) камеры. Развитие камеры можно условно разделить на два этапа. В начале отработки, когда высота камеры во много раз превышает ее диаметр, температура у дна камеры выше температуры у кровли. Идет процесс ин-

тенсивного тепло- и массообмена, сопровождающийся высокими скоростями конвективных течений в объеме камеры. Оттаивание идет по всей высоте камеры практически равномерно (рис. 1, а). Второй этап наступает, когда температура у дна сравнивается с температурой у кровли – форма камеры стремится к цилиндуру, а дно камеры представляет собой конус с углом наклона равным углу естественного откоса песка в воде (рис. 1, б). Дальнейшая отработка приводит к тому, что меняется распределение температур по высоте камеры. Поток теплоносителя устремляется к кровле, оттаивая сводчатую часть, что приводит в конечном итоге к потере устойчивости камеры (рис. 1, в).

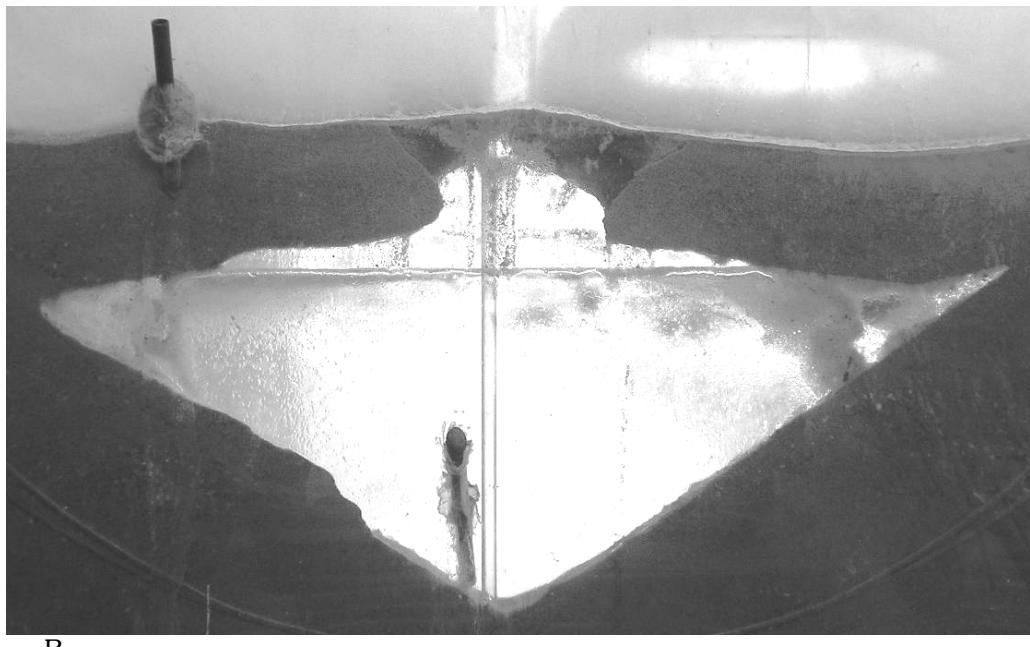
Для недопущения чрезмерного оттаивания сводчатой части камеры необходимо отрабатывать подземный резервуар по многоступенчатой технологии и заблаговременно переходить от одной ступени отработки к другой, проводя постоянный мониторинг технологических параметров отработки подземной камеры. Проведение данных мероприятий позволит создавать подземные камеры заданного объема и конфигурации.



а



б



в

**Рис. 1. Развитие камеры при отработке через вертикальную скважину**

Основными параметрами отработки на каждой ступени строительства являются расход теплоносителя, производительность по песку, температура воды в камере, время отработки, высота ступени и объем камеры на каждой ступени.

Все эти параметры закладываются в технологический регламент строительства подземной камеры. Основой регламента служат выбор технологической схемы отработки и методика расчета параметров подземной камеры на каждой ступени размыва.

При выборе технологической схемы отработки подземной камеры учитывается положение технологической скважины (вертикальная, наклонная или направленная наклонно-горизонтальная скважина), различные режимы подачи теплоносителя (непрерывный или циклический), а также высота и количество ступеней размыва [3].

Размыв камеры целесообразно проводить снизу вверх, повышая уровень воды в камере при отработке каждой последующей ступени. Это позволит минимизировать свободный газовый объем в подземном резервуаре и, в случае газопроявлений, повысить взрывобезопасность производства.

Высота ступени выбирается исходя из необходимого объема камеры на каждой ступени. Объем камеры на ступени определяется по производительности оттаивания, рассчитанной на основе теплового баланса, времени отработки и с учетом вертикальных и горизонтальных скоростей оттаивания.

Методика расчета параметров основана на расчете теплового баланса отработки подземной камеры и включает в себя:

1. Определение производительности оттаивания по уравнению баланса тепла.

2. Определение параметров эрлифтного подъема песка.

3. Определение параметров отработки камеры по этапам.

Определение производительности оттаивания производится по уравнению теплового баланса – суммарное тепло, вносимое в подземный резервуар, должно быть равно суммарным тепловым затратам:  $\sum Q_{\text{вносим}} = \sum Q_{\text{затрат}}$ . Теплоносителем выступает пар или горячая вода, подающийся на фиксированной высоте от дна камеры без изменения его положения в течение всего срока размыва камеры.

Вносимое в подземный резервуар тепло складывается из: тепла, выделяющегося при конденсации пара ( $Q_{\text{пара}}$ ), тепла, выделяющегося при охлаждении сконденсированной воды в подземном резервуаре ( $Q_{\text{воды}}$ ) и тепла, поступающего в подземный резервуар с водой из внешнего источника ( $Q_{2\text{воды}}$ ):

$$\sum Q_{\text{вн}} = Q_{\text{пара}} + Q_{\text{воды}} + Q_{2\text{воды}}, \text{ МДж/ч},$$

Затраты тепла по составляющим распределяются на:

$$\sum Q_{\text{затраты}} = Q_{\text{плавл. льда}} + Q_{\text{нагрев воды}} + Q_{\text{нагрев породы}} + Q_{\text{потери}} + Q_{\text{эрлифт}}$$

- 1) Затраты тепла на плавление льда, содержащегося в мерзлой породе;

- 2) Затраты тепла на нагрев оттаявшей воды;

- 3) Затраты тепла на нагрев породы;

- 4) Потери тепла в массив мерзлых пород через поверхность резервуара;

- 5) Потери тепла с эрлифтируемой на поверхность гидросмесью.

Из уравнения баланса определяется производительность по песку. Если в качестве исходных данных задается производительность по песку, то по уравнению баланса определяется необходимый расход теплоносителя, подаваемого в скважину.

Для обеспечения нормального ведения процесса оттаявший песок

должен удаляться на поверхность с производительностью, превышающей среднюю производительность оттаивания на каждом этапе отработки. Для выполнения этого условия производится расчет параметров эрлифтного подъема по методике, основанной на уравнении баланса энергии вне эрлифта и внутри пульпоподъемной трубы [1].

При расчете эрлифта определяется его производительность по гидросмеси и по твердому. Для этого задаются расходом воздуха  $Q_B$ , возможной глубиной погружения  $H_B$ , высотой подъема  $H_3$ , диаметром пульпоподъемной трубы  $D_3$  и плотностью поднимаемой пульпы  $\rho_r$ .

С помощью уравнения баланса энергии определяют максимальное значение производительности эрлифта по гидросмеси  $Q_{ГС}$  и соответствующее ему значение расхода воздуха  $Q_{возд}$ . А затем вычисляют производительность эрлифта по твердому  $Q_t$ .

Если производительность эрлифта не обеспечивает удаления оттаявшего песка (что может быть при большой глубине залегания и малой мощности песчаных отложений), то повышают коэффициент затопления эрлифта при сохранении заданного уровня вода-воздух. Добиться этого можно либо увеличением глубины скважины ниже подошвы песчаного пласта, либо герметизацией устья скважины для создания избыточного давления. Величина избыточного давления не должна превышать давления гидоразрыва пород.

При определении формы и размеров подземной камеры на каждой ступени отработки, определяют скорость перемещения поверхности в результате оттаивания за каждый час и положение стенки подземного резервуара в конце каждой ступени, исходя из задаваемой продолжительности

размыва на данной ступени и производительности подачи теплоносителя.

В итоге проведенных лабораторных исследований по определению скорости оттаивания мерзлых песчаных образцов, а также в результате анализа данных по изучению формообразования камер на плоских моделях методом физического моделирования было установлено:

1. Величина температуры качественно не влияет на процесс формообразования камер, а лишь изменяет интенсивность размыва;

2. Горизонтальная составляющая скорости оттаивания в 6 раз превышает вертикальную и таким образом является основополагающей при определении скорости перемещения поверхности в результате оттаивания;

3. Установлено, что скорости оттаивания стенок камеры вне зоны влияния оседающего ко дну песка равномерны и обратно пропорциональны квадрату радиуса отрабатываемой ступени.

Процессы, протекающие в подземной камере, сводятся к следующим. При подаче теплоносителя в камеру формируется затопленная струя, которая вступает в теплообмен с окружающей водой. Данная струя характеризуется своими параметрами (скоростью, диаметром, расстоянием распространения). В начале основополагающим в ее движении является вынужденная конвекция, но по мере продвижения она тормозится вследствие вязкости среды. На некотором расстоянии вынужденная конвекция сменяется естественной, вызванной разностью плотностей теплой и холодной воды. Начинается всплытие струи, по мере которого она отдает тепло и вовлекает в свое движение дополнительные объемы окружающей воды. По достижении поверхности (раздела вода-воздух) уже относительно

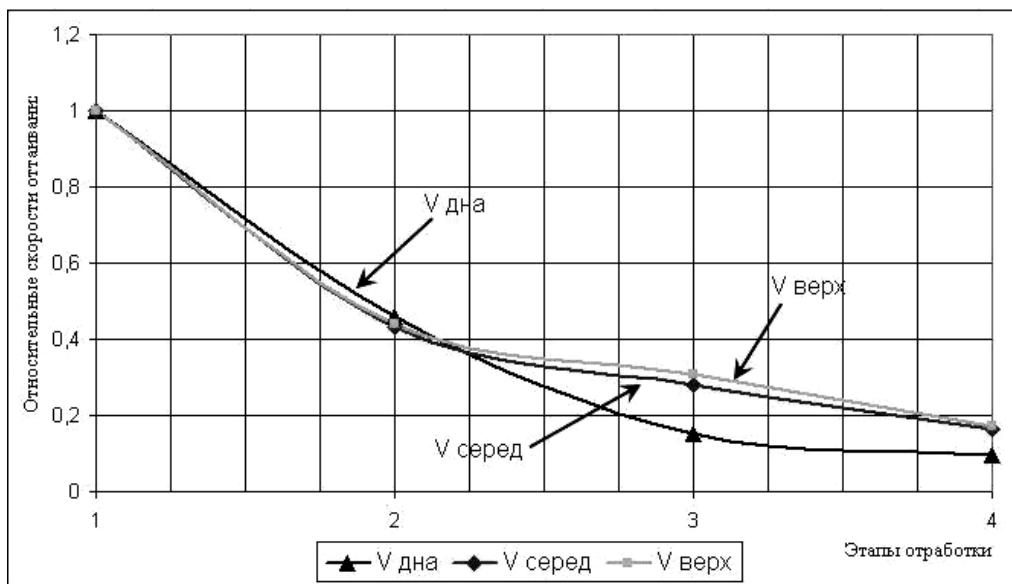


Рис. 2. Зависимость относительных скоростей оттаивания выбранных точек подземной камеры от этапа отработки

**Основные расчетные параметры технологического регламента формообразования подземной емкости при добыче песка объемом 5450 м<sup>3</sup>**

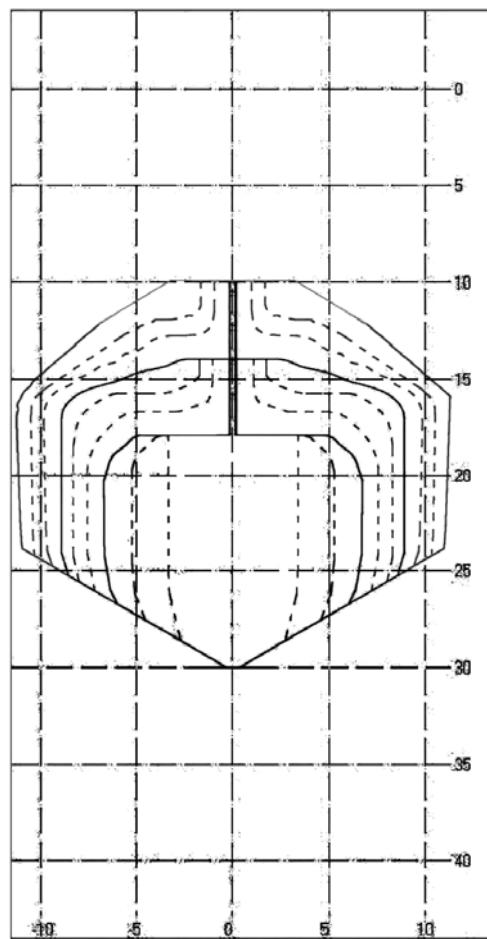
№ ступени	Уровень установки башмака колонны, м		Уровень границы вода-воздух, м	Производительность,		
	Пульпо-подъемной	Паро-подающей		по песку, м <sup>3</sup> /ч	по воздуху, м <sup>3</sup> /ч	по пару, кг/ч
1	2	3	4	5	6	7
I	30	28	18	11,0	1500	605
II	30	28	14	8,0	1500	445
III	30	28	10	5,0	1500	285

Величина противодавления, МПа	Радиус камеры, м		Объем выработки, м <sup>3</sup>		Чистое время отработки, час	
	Максимальный	У потолка ступени	Объем ступени	Объем камеры	Ступени	Камеры
8	9	10	11	12	13	14
0,19	6,7	6,7	1350	1350	123	123
0,15	8,9	2,4	1560	2910	195	318
0,11	11,0	4,2	2540	5450	508	826

теплая вода расходится к стенкам камеры, где происходит не только теплообмен, но и массообмен с мерзлыми песчаными стенками. В результате растепления, оттаявшие частицы песка падают ко дну камеры, дополнительно турбулизируя своим движением пограничный со стенками слой воды, образуя конвективные потоки вдоль поверхности стенок, увеличивающие тепло- и массообмен. В результате в объеме подземной камеры возникают торы движения воды относительно вертикальной оси камеры, расходящиеся от кровли вдоль стенок.

Зависимость относительных скоростей оттаивания по ступеням отработки представлена на рис. 2. На данном рисунке показаны зависимости изменения скоростей оттаивания для трех выбранных характерных точек: у дна камеры, в ее середине и у кровли. Данный рисунок отражает качественную оценку рассматриваемого процесса: при отработке камеры по ступеням с увеличением объема камеры снижается скорость оттаивания (интенсивность), а, следовательно, и производительность по извлекаемому песку. Это вызвано тем, что при развитии камеры увеличивается полезная поверхность теплообмена с вмещающим мерзлым массивом песчаных пород, что при постоянном расходе теплоносителя неизбежно ведет к уменьшению температуры воды в подземной камере, а, следовательно, и скорости оттаивания.

В качестве примера применения методики расчета параметров рассмотрим размык подземной камеры полезным объемом  $5000 \text{ м}^3$  (рис. 3). Камера отрабатывается в три технологических ступени. Для каждой ступени показаны два промежуточных состояния камеры в процессе строительства.



**Рис. 3. Схема развития подземной камеры полезным объемом  $5450 \text{ м}^3$  в три технологических ступени строительства с указанием промежуточных этапов**

При этом для отработки каждой ступени был произведен расчет теплового баланса при различных значениях подачи теплоносителя. Для снижения теплового воздействия на массив окружающих мерзлых пород по окончании строительства самым лучшим решением является откачка воды из подземного резервуара. Однако это не всегда технологически и экономически возможно. Поэтому предлагается уменьшать производительность подачи теплоносителя при пе-

реходе от одной ступени строительства к другой, тем самым, снижая скорость оттаивания и остаточное тепло в объеме камеры на момент окончания строительства.

Технологическая схема отработки подземной камеры, представленной на рис. 3.

Для формирования устойчивой кровли подземной камеры принята схема отработки ступенями снизу вверх. Интервал строительства 10,0 – 30,0 м. Все отметки приведены от земной поверхности.

При отработке первой ступени уровень воды в скважине поддерживается на отметке 18 м путем регулирования подачи воды к скважинному гидродобывающему снаряду. Величина противодавления составляет 0,19 МПа. Чистое время отработки первой ступени высотой 12 м составляет 123 часа при производительности по песку 11,0 м<sup>3</sup>/час. Объем отрабатываемой камеры на первой ступени 1350 м<sup>3</sup>.

На второй ступени уровень воды поднимается на 4 метра и поддерживается на отметке 14 м от поверхности. Величина противодавления составляет 0,15 МПа. Чистое время отработки второй ступени высотой 16 м составляет 195 часов при производительности по песку 8,0 м<sup>3</sup>/час. Объем отрабатываемой камеры на второй ступени увеличивается на 1560 м<sup>3</sup> и достигает 2910 м<sup>3</sup>.

На третьей ступени уровень воды поднимается еще на 4 метра и поддерживается на отметке 10 м от поверхности. Величина противодавления составляет 0,11 МПа. Чистое время отработки третьей ступени высотой 20 м составляет 508 часов при производительности по песку 5,0 м<sup>3</sup>/час. Объем отрабатываемой камеры на третьей ступени увеличивается на 2540 м<sup>3</sup> и достигает 5450 м<sup>3</sup>.

Основные расчетные параметры технологического регламента формообразования подземной камеры приведены в таблице.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аренс В.Ж., Бабичев Н.И., Башкатов А.Д., Гридин О.М., Хрулев А.С., Хчаян Г.Х. «Скважинная гидродобыча полезных ископаемых», М., «Горня Книга», 2007.
2. Хрулев А.С., Филимонов Ю.Л., Роднов С.С., Шайкина Ю.Г. «Определение параметров скважинной гидравлической разработки погребенных многолетнемерзлых песчаных отложений по результатам физического моделирования» Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ, №3, 2007.- с. 273-278.
3. Хрулев А.С., Карпухин А.Н., Сурин С.Д. «Обоснование параметров скважинной гидравлической разработки многолетнемерзлого песка на полуострове Ямал», – ГИАБ за 2008 г. ГИАБ

#### Коротко об авторах –

Карпухин А.Н. – аспирант, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, e-mail: A.Karpukhin@podzemgazprom.ru или webpilgrim@rambler.ru

Савич О.И. – e-mail: O.Savich@podzemgazprom.ru

Сурин С.Д. – аспирант, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, e-mail: stepan.surin@gmail.com  
ООО «Подземгазпром».