

УДК 622.234.5

**А.С. Хрулев, А.Н. Карпухин, С.Д. Сурин**

## **ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ ПЕСКА НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ**

*Предложена технология скважинной гидродобычи строительных песков и сооружения подземных хранилищ на территории газоконденсатных месторождений Ямала.*

*Ключевые слова: скважинная гидродобыча, газоконденсатное месторождение, оттайка, подземный резервуар, вода, воздух, песок.*

**С**кважинная гидродобыча (СГД) песка на полуострове Ямал основана на водно-тепловом оттаивании многолетнемерзлых песчаных отложений.

Целью данной работы являлось создание эффективной технологии скважинной гидродобычи строительных песков и сооружения подземных хранилищ на территории газоконденсатных месторождений Ямала.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) определение механизма водно-теплового разрушения мерзлых песков;
- 2) выбор технологической схемы отработки подземного резервуара (ПР);
- 3) разработка методики определения параметров отработки ПР при СГД;
- 4) определение технико-экономических показателей технологии СГД.

Механизм водно-теплового разрушения исследовался на лабораторных установках методом физического моделирования. В опытах определялась скорость оттаивания в зависимости от положения оттаиваемой поверхности образца.

Для ледяного образца (рис. 1) скорость оттаивания вертикальной поверхности превысила скорость оттаивания горизонтальной поверхности в пять раз. Это обусловлено возникно-

вением естественных конвективных течений в пограничном слое образца вдоль вертикальной стенки под действием гравитационных сил вследствие разницы температуры  $a$ , следовательно, и плотностей воды. Для горизонтальной поверхности оттаивание происходит медленнее, потому что отсутствуют условия для образования конвективного течения вдоль оттаиваемой поверхности.

По сравнению с ледяным образцом, скорость оттаивания вертикальной поверхности мерзлого песчаного образца оказалась в 6 раз выше, что объясняется образованием дополнительного конвективного потока, обусловленного падением оттаявших частиц песка вдоль вертикальной поверхности.

Увеличение скорости оттайки горизонтальной поверхности песчаного образца в 2 раза вызвано уменьшением его льдистости по сравнению с ледяным образцом. Частицы песка падают перпендикулярно поверхности и не приводят к возникновению конвективных течений в пограничном слое вдоль оттаиваемой поверхности (рис. 2).

Вблизи границы раздела вода-воздух наблюдалось увеличение скорости оттаивания (рис. 3).



**Рис. 1. Форма ледяного образца в начале (слева) и в конце опыта (справа)**



**Рис. 2. Форма песчаного образца в начале (слева) и конце опыта (справа)**

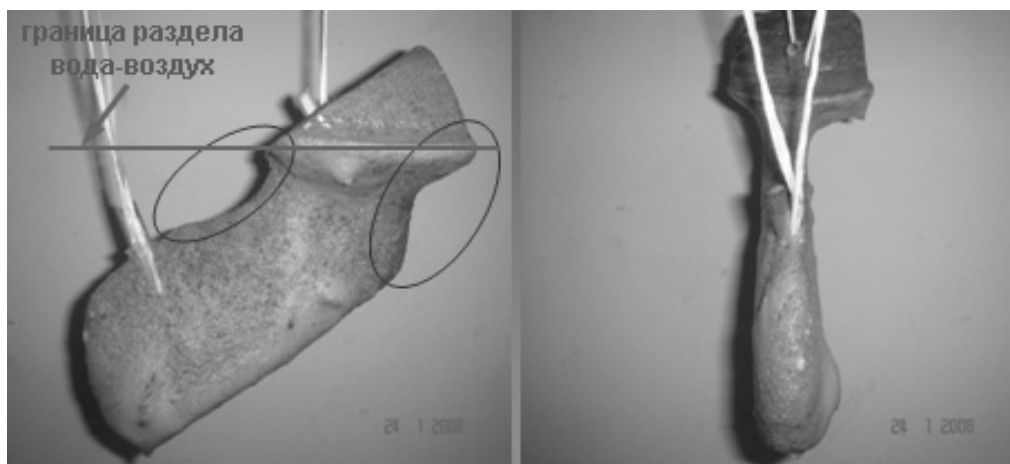
Это связано с формированием вертикального фронта оттаивания у наклонной поверхности, характерной для сводчатой части подземной камеры. Скорость перемещения фронта оттаивания в 15—20 раз превышает скорость оттаивания наклонной поверхности. Зарождение и развитие вертикального фронта, по-видимому, связано с конвективным движением потока воды вдоль границы раздела вода-воздух.

Вблизи границы раздела вода-воздух у наклонной поверхности, характерной для донной части подземной камеры, также формируется вертикальный фронт оттаивания (рис. 3).

Угол наклона поверхности ниже вертикального фронта составляет 10—15°, что меньше величины угла естественного откоса песка в воде и, по-видимому, связано с оттаиванием и размывом наклонной поверхности потоком, сформированным вдоль вертикального фронта оттаивания.

При создании подземных резервуаров в мерзлых песчаных породах необходимо учитывать вертикальные и горизонтальные скорости оттаивания, т.к. их значения влияют на правильное определение формы подземной полости.

Технологическая схема обработки подземного резервуара исследовалась



**Рис. 3. Исследование оттаивания наклонной стенки**

при создании камеры через вертикальную и наклонную скважину, при непрерывной и циклической подаче воды и изменении положения уровня раздела вода-воздух.

Вода подавалась в нижнюю часть по наклонному водоводу, установленному под углом  $60^{\circ}$ , а отбор оттаявшего песка производился через дно модели при помощи гидравлического затвора. На начальном этапе обработки камера развивалась симметрично относительно наклонной скважины. Дальнейшее развитие камеры вело к симметрии, но уже относительно вертикальной оси, проходящей через точку ввода теплоносителя.

По циклической схеме обработки подача теплоносителя в камеру, процесс оттаивания и последующее удаление всего оттаявшего песка и воды из камеры производились периодически. Производительность оттайки песка на протяжении всего процесса обработки камеры остается постоянной. При этом средняя производительность в 2—3 раза ниже, чем при непрерывной схеме обработки. Форма камеры дисковая с максимальным пролетом в средней части. Придонная часть камеры, вследствие накоп-

ления песка оттаивает медленнее, что уменьшает объем камеры по сравнению с непрерывной схемой обработки при одном и том же пролете [2].

При обработке через вертикальную скважину и поддержании постоянного уровня раздела вода-воздух камера развивается в виде цилиндра с углом наклона днища, равным углу естественного откоса песка в воде, что свидетельствует о равномерном распределении температуры по всей высоте камеры (рис. 4 а, б).

При изменении положения уровня раздела вода-воздух, диаметр камеры определяется временем взаимодействия оттаиваемой поверхности с водой. Поэтому в процессе обработки можно формировать устойчивый свод камеры плавным или ступенчатым изменением положения уровня раздела вода-воздух как сверху — вниз, так и снизу — вверх.

По результатам моделирования технологии обработки подземных камер можно сделать следующие выводы:

- целесообразно использовать непрерывную схему обработки подземной камеры с постоянным отбором оттаявшего песка, при этом произво-

длительность подъема песка должна превышать производительность его оттайки;

- поддержание постоянного уровня теплоносителя приводит к равномерному тепловому воздействию по всей высоте камеры и приданию ей цилиндрической формы;

- геометрию камеры можно формировать изменением положения границы раздела вода-воздух и временем нахождения оттаиваемой поверхности в затопленном положении;

- замедление оттаивания днища камеры обусловлено накоплением оттаявшего песка, скапливающегося под углом естественного откоса песка в воде.

На основе проведенных лабораторных исследований разработана методика определения параметров создания подземных резервуаров. Методика основана на расчете теплового баланса отработки подземной камеры и включает в себя:

1. Определение производительности оттайки по уравнению баланса тепла.

2. Определение параметров отработки ПР по этапам.

3. Определение параметров эрлифтного подъема песка.

Определение производительности оттаивания производится по уравнению теплового баланса — суммарное тепло, вносимое в подземный резервуар, должно быть равно суммарным тепловым затратам:  $\sum Q_{вн} = \sum Q_{затрат}$

Расчет тепла, вносимого в подземный резервуар при подаче пара:

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

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

$$\sum Q_{вн} = q_{пара} \cdot r_{пар} + q_{воды} \cdot c_{воды} \cdot \times \\ \times (100 - T_{пр}) + q_{2воды} \cdot c_{воды} \cdot \rho_{воды} \times \\ \times (T_{внеш.} - T_{пр}), \text{ МДж/ч,}$$

где  $r$  — удельная теплота парообразования, 2, 26 МДж/кг;  $c_{воды}$  — теплоемкость воды,  $4,205 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  $\rho_{воды}$  — плотность воды,  $1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Расчет затрат тепла по составляющим:

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

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

$$Q_{плавл. льда} = \Pi_{п} \cdot G \cdot L \cdot \rho_{л}, \text{ МДж/ч,}$$

где  $L$  — удельная теплота плавления льда, 333600 Дж/кг;  $\rho_{л}$  — плотность льда, 920 кг/м<sup>3</sup>.

- 2) Затраты тепла на нагрев воды:

$$Q_{нагрев воды} = \Pi_{п} \cdot G \cdot c_{в} \cdot \Delta T_{в2} \cdot \rho_{л}, \text{ МДж/ч,}$$

где  $\Delta T_{в2} = (T_{камеры} - 0^\circ)$  — повышение температуры воды в резервуаре, град;

- 3) Затраты тепла на нагрев породы:

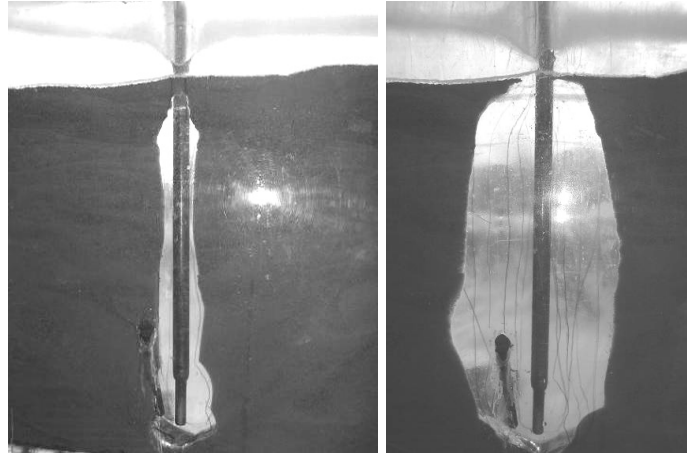
$$Q_{нагрев} = \Pi_{п} (c_1^{мерзлой} \cdot [0 - T_{массива}] + \\ + c_2^{талой} \cdot [T_{пр} - 0]), \text{ МДж/ч,}$$

где  $c_1$  — теплоемкость мерзлых пород, 2,1 МДж/м<sup>3</sup>·°С<sup>(1)</sup>;  $c_2$  — теплоемкость талых пород, 2,76 МДж/м<sup>3</sup>·°С<sup>(1)</sup>;

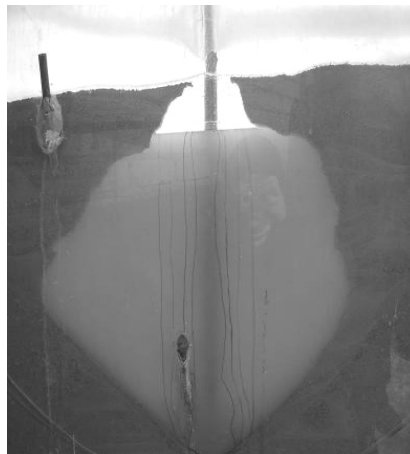
- 4) Потери тепла в массив мерзлых пород через поверхность резервуара  $S$  за время  $\Delta t$  в соответствии с законом Фурье для установившегося теплового потока к плоской стенке определяются по формуле:

$$Q_{п} = \lambda \cdot S \cdot (dT/dl) \Delta t, \text{ МДж/ч,}$$

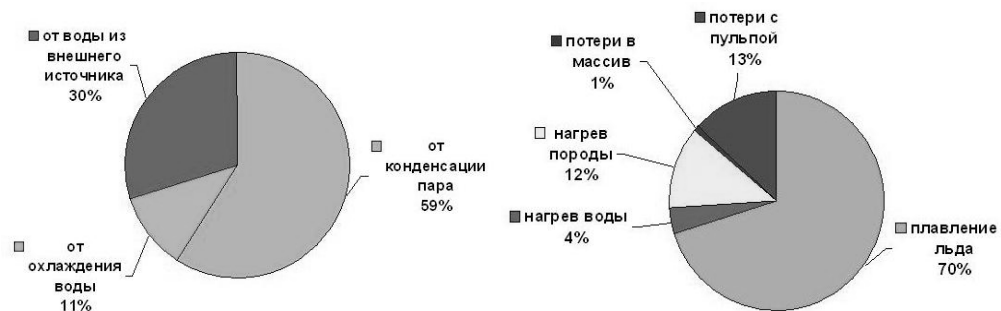
где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности мерзлого песка, ( $\lambda = 7536$  Дж/м·ч·град);  $S$  — площадь поверхности резервуара при отработке половины его объема, м<sup>2</sup>;



**Рис. 4. Развитие камеры при обработке через вертикальную скважину**



**Рис. 5. Изменение формы камеры в процессе проведения опыта**



**Рис. 6. Диаграмма распределения вводимой тепловой энергии и распределения затрат тепловой энергии по составляющим**

$$S = \sqrt{\pi \cdot H \cdot V},$$

где  $dT/dl$  — градиент температуры на единицу длины, °С/м;  $\Delta t$  — продолжительность подачи пара, час;

5) Потери тепла с эрлифтируемой на поверхность гидросмесью составят:

$$Q_{\text{эрлифта}} = 0,5 \cdot \Pi_3 \cdot c_v \cdot (T_{\text{змфв}} - T_{\text{пр}}) \rho, \text{ МДж/ч},$$

где 0,5 — эмпирический коэффициент, характеризующий теплообмен воды, подаваемой через гидромонитор, с водой в подземном резервуаре.  $\Pi_3$  — расход воды в поднимаемой эрлифтом гидросмеси, м<sup>3</sup>/ч;

$$\Pi_3 = \Pi_{\text{г.с.}} - \Pi_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{гр}}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

где  $\Pi_{\text{г.с.}}$  — расход эрлифта по гидросмеси, м<sup>3</sup>/ч;  $\rho_{\text{п}}$  — плотность песка, 1,8 т/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{гр}}$  — плотность зерен минерального скелета песка, 2,65 т/м<sup>3</sup>.

$$\frac{\Pi_{\text{г.с.}} - \frac{\Pi_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{гр}}} + \Pi_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}}}{\Pi_{\text{г.с.}}} = 1,2, \text{ т/м}^3$$

$$\Pi_{\text{г.с.}} = \frac{1,8 \cdot \Pi_{\text{п}} \left(1 - \frac{1}{2,65}\right)}{0,2}, \text{ т/м}^3$$

$$\Pi_{\text{г.с.}} = 5,6 \cdot \Pi_{\text{п}}, \text{ т/м}^3.$$

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

При определении формы и размеров подземного резервуара на каждом этапе обработки, определяют скорость перемещения поверхности в результате оттаивания за каждый час и положение стенки подземного резервуара в конце каждого этапа, исходя из задаваемой продолжительности размыва на данном этапе.

При этом производительность, рассчитанная по уравнению баланса тепла, принимается постоянной в течение всего времени обработки подземного резервуара.

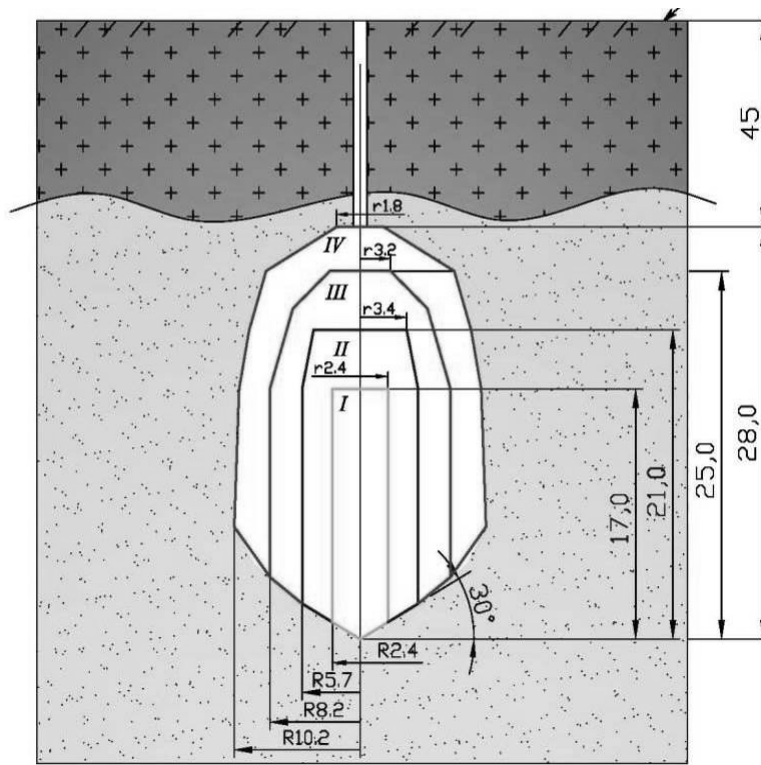
Технологическая схема обработки подземного резервуара представлена на рис. 7. Для формирования устойчивой кровли подземного резервуара здесь применена схема обработки ступенями снизу вверх. Дно подземного резервуара принято в виде конуса с углом наклона равным углу естественного откоса песка в воде. Для получения подземного резервуара заданной формы и размера варьировалась высота ступени (уровень раздела вода-воздух) и время ее создания.

Для обеспечения нормального ведения процесса оттаявший песок должен удаляться на поверхность с производительностью, превышающей среднюю производительность оттаивания на каждом этапе обработки. 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  $Q_{\text{в}}$ , возможной глубиной погружения  $H_{\text{в}}$ , высотой подъема  $H_{\text{э}}$ , диаметром пульпоподъемной трубы  $D_{\text{э}}$  и плотностью поднимаемой пульпы  $\rho_{\text{г}}$ .

С помощью уравнения баланса энергии определяют максимальное значение производительности эрлифта по гидросмеси  $Q_{\text{гс}}$  и соответствующее ему значение расхода воздуха  $Q_{\text{воз}}$ . И далее вычисляют производительность эрлифта по твердому  $Q_{\text{т}}$ .

Если производительность эрлифта не обеспечивает удаления оттаявшего



**Рис. 7. Технологическая схема отработки подземного резервуара (пример)**

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 гидро-разрыва пород.

На основе данной методики был разработан технологический регламент размыва, который был использован при строительстве первого опытно-промышленного резервуара на экспериментальном комплексе скважинной гидродобычи песка на Бованенковском НГКМ.

Отработка подземной камеры производилась в два этапа. На первом этапе уровень воды поддерживался у башмака обсадной колонны, а на втором этапе уровень воды был понижен и поддерживался в 15 м от поверхности. Общее время отработки камеры составила 18 суток. Чистое время отработки камеры — 315 часов (13 суток).

Технологические параметры скважинного гидродобычного снаряда, установленные в ходе испытаний:

1. При коэффициенте затопления эрлифта 0,65 и плотности поднимаемой гидросмеси 1,35 т/м<sup>3</sup> производительность снаряда по гидросмеси составила 65 м<sup>3</sup>/ч, по песку — 32,4 т/ч (18 м<sup>3</sup>/ч).

2. При коэффициенте затопления 0,51 и той же плотности поднимаемой гидросмеси производительность

снаряда по гидросмеси составила 48 м<sup>3</sup>/ч, по песку — 27 т/ч (15 м<sup>3</sup>/ч).

3. Максимальная плотность поднимаемой гидросмеси песка составила 1,59 т/м<sup>3</sup> при производительности по гидросмеси 38 м<sup>3</sup>/ч и по песку 36 т/ч (20 м<sup>3</sup>/ч).

Испытания показали, что средняя производительность по песку скважинного гидродобычного снаряда превышает среднюю производительность по оттайке песка за счет тепловой энергии воды, подаваемой на гидромонитор с температурой 13—16<sup>0</sup>С, однако при использовании парогенераторной установки производительность оттайки превышала производительность эрлифта по песку, что приводило к нестабильности его работы.

В связи с тем, что в ходе отработки подземной камеры были зафиксированы газопроявления, технологию ведения работ следует осуществлять в восходящем порядке, ступенями снизу

вверх с целью уменьшения незатопленного объема камеры.

Натурные испытания технологии СГД песка подтвердили техническую возможность применения этого способа добычи в условиях Бованенковского НГКМ.

Реализация данной технологии скважинной гидродобычи многолетнемерзлых песков в условиях полуострова Ямал приведет к значительным сокращениям строительных и эксплуатационных затрат. Сравнение затрат при скважинной гидродобыче песка на Ямале с открытым способом добычи показала, что обеспечивается рентабельность его добычи как стационарным комплексом СГД, с использованием в качестве источника энергии природного газа, так и мобильным комплексом, работающим на дизельном топливе. Эффективность использования мобильного комплекса достигается за счет снижения расходов на транспорт песка.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аренс В.Ж., Бабичев Н.И., Башкатов А.Д., Гридин О.М., Хрулев А.С., Хчеян Г.Х. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. — М.: «Горная Книга», 2007.

2. Хрулев А.С., Филимонов Ю.Л., Роднов С.С., Шайкина Ю.Г. «Определение па-

раметров скважинной гидравлической разработки погребенных многолетнемерзлых песчаных отложений по результатам физического моделирования» Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. — № 3. — 2007. — С. 273—278. **ИДБ**

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Хрулев Александр Сергеевич* – доктор технических наук, начальник отдела технологических проблем подземного хранения в многолетнемерзлых породах, Подземгазпром, a.khrulev@podzemgazprom.ru,

*Карпухин Алексей Николаевич* – аспирант,

*Сурин С.Д.* — аспирант,

Московский государственный горный университет,  
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru

