© А.С. Хрулев, Ю.Л. Филимонов, С.С. Роднов, Ю.Г. Шайкина, 2007

УДК 622.241

А.С. Хрулев, Ю.Л. Филимонов, С.С. Роднов, Ю.Г. Шайкина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИННОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ РАЗРАБОТКИ ПОГРЕБЕННЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПЕСЧАНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Семинар № 18

Интенсивное развитие газодобывающего комплекса на Севере Тюменской области определяет рост потребности в природных строительных материалах, достигающей сотен миллионов кубических метров.

Анализ геологического строения покрывающих осадочных пород на территории газоконденсатных месторождений Ямала показывает, что запасы песчаных пород, залегающих вблизи поверхности, ограничены и не обеспечивают потребности в песке при освоении этих месторождений. Пески имеют низкое качество и нередко удалены от объектов строительства. В тоже время в ходе инженерно-геологических изысканий выявлены значительные запасы мерзлых погребенных песчаных отложений, залегающих на глубине 15-30 м и перекрытых глинами, суглинками и пластовым льдом. Мощность песчаных отложений колеблется от 20 до 100 м и их залегание прослеживается на значительные расстояния.

Эффективная разработка погребенных песчаных отложений возможна способом скважинной гидродобычи (СГД), который позволит извлекать песок в непосредственной близости от объектов строительства.

Основываясь на опыте разработки многолетнемерзлых погребенных россыпей, была предложена технологическая схема скважинной гидродобычи, основанная на водно-тепловом разрушении мерзлых песчаных отложений (рис. 1). Добыча песка ведется через наклонную скважину диаметром около 300 мм, пробуренную под углом 30^0 к вертикали. Вода из наземного водоема, нагреваемая от солнечной радиации, насосом подается в нижнюю часть скважины. В результате теплообмена с мерзлыми песчаными породами происходит оттаивание песка и его осаждение на дне подземной камеры. Гидросмесь песка эрлифтом поднимается на поверхность и направляется на карту намыва для складирования песка, а отделяющаяся вода возвращается в водоем. В зависимости от температуры воды в водоеме, составляющей от 6 до 14^0С, и льдистости песчаных пород, удельный расход на водно-тепловое разрушение может составлять от 30 до 10 $м^3/м^3$ добытого песка, поэтому, после теплообмена в подземной камере, основное количество подаваемой в

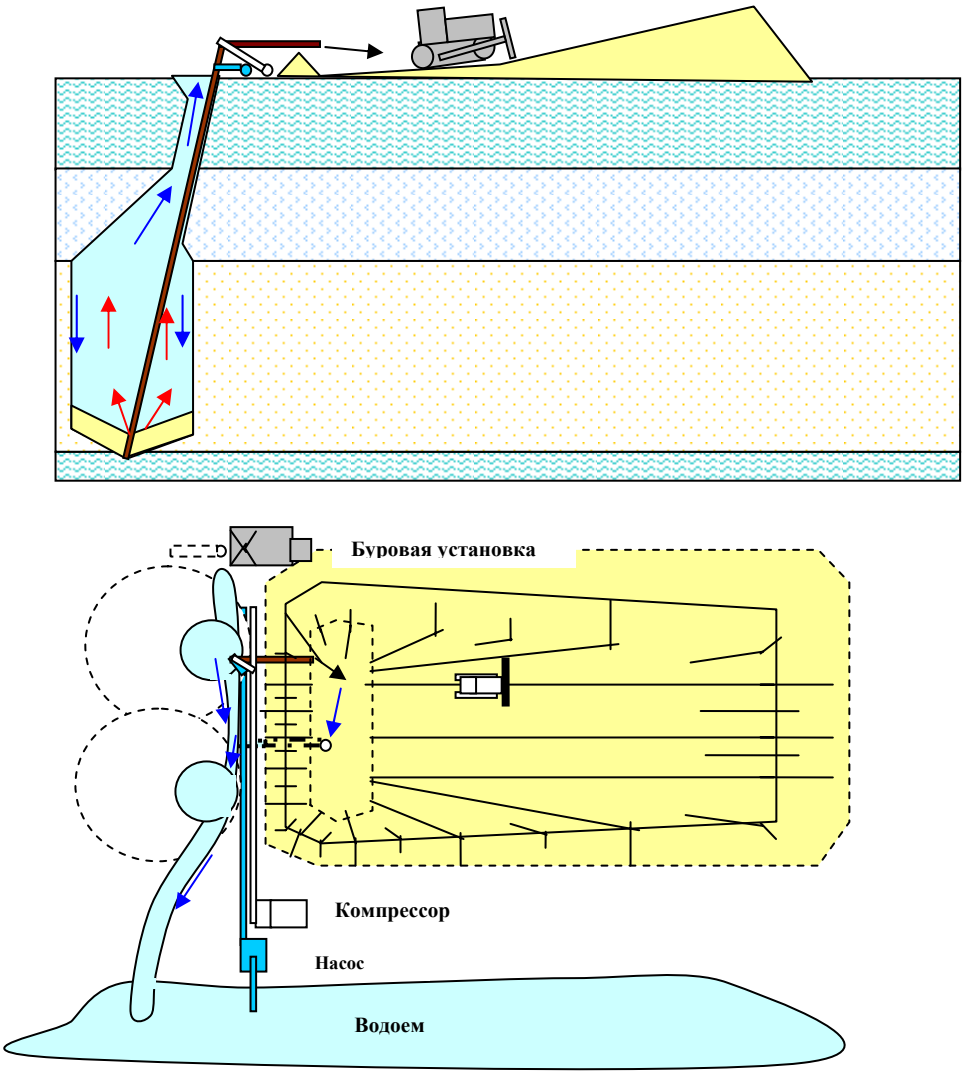


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема скважинной гидравлической разработки многолетнемерзлых песчаных отложений

скважину воды не поднимается эрлифтом на поверхность, а по скважине и водоотводной канаве самотеком возвращается в наземный водоем. Это позволяет повысить уровень затопления эрлифта и снизить затраты воздуха на подъем гидросмеси песка. Наклон скважины под углом 30^0 к вертикали обеспечивает безопасное ведение добычных работ вне зоны подработанного пространства подземной камеры и не приводит к существенному снижению производительности эрлифта.

Целью проводимого исследования являлось определение основных параметров СГД мерзлых погребенных песков по предложенной технологической схеме.

Программа работ включала:

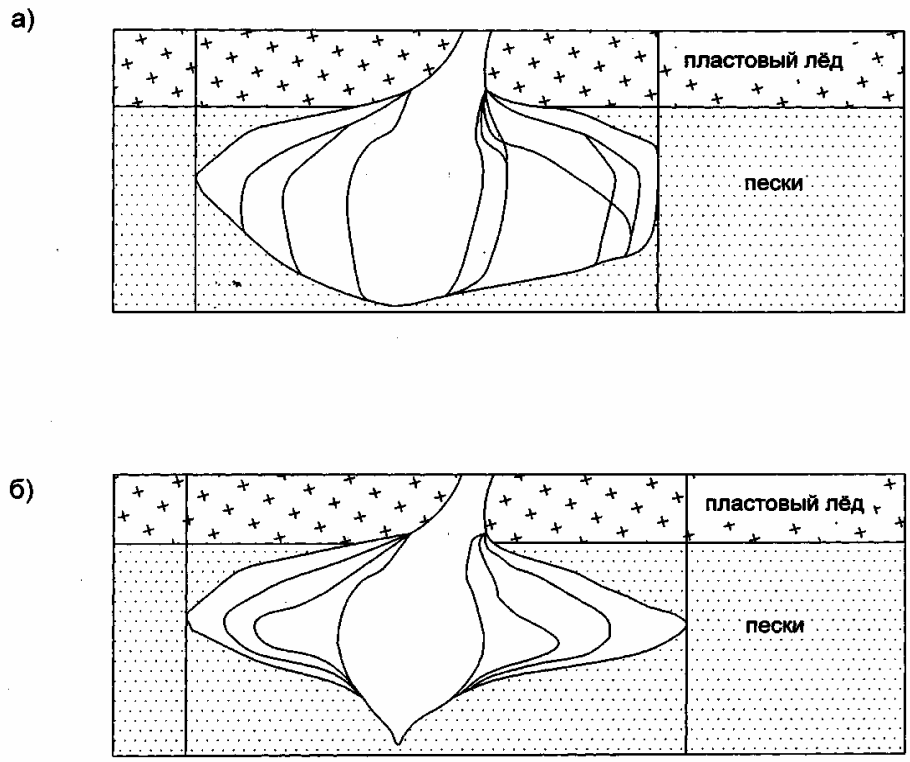


Рис. 2. Динамика отработки камеры: а) непрерывная схема; б) циклическая схема

• Моделирование процесса оттайки массива мерзлых песков при непрерывной и циклической подаче воды и удалении оттаявших песков из подземной камеры.

• Расчет теплового баланса в подземной камере.

• Расчет устойчивости затопленной и незатопленной подземной камеры.

В качестве метода исследования принято физическое моделирование на плоской модели. Для гидродинамического и теплового подобия использовался мелкозернистый песок той же крупности, льдистости и температуры, что и в натурных условиях, и теплоноситель, температура и расход которого определялся критериями подобия. Модельная установка была выполнена из оргстекла, размером 1300 х 700 и шириной 80 мм. В модели послойно намораживался водонасыщенный песок высотой 400 мм, и пластовый лед высотой 200 мм. Вода подавалась в нижнюю часть модели по наклонному водоводу, установленному под углом 30^0 к вертикали, а отбор оттаявшего песка из камеры производился через дно модели в мерную емкость с использованием гидравлического затвора. Температура модели составляла около -5 ^{0}С, а подаваемой воды 8-10 ^{0}С.

При проведении исследований через 15-30 минут фиксировались: расход воды, температура воды на входе в камеру, в камере и на выходе из нее, объем извлеченного песка и положение стенок гидродобычной камеры.

На рис. 2 показано изменение формы сечения подземной камеры при непрерывном и циклическом режиме подачи воды и отборе оттаявшего песка. Накопление песка в подземной камере при циклическом режиме приводит к замедлению оттайки в ее нижней части и уменьшению поверхности эффективного теплообмена на стенках камеры, что отражается на ее форме.

Для определения технологических параметров отработки подземной камеры рассчитывался тепловой баланс для модели и натурных условий, на основании которого, при принятых расходах и температуре теплоносителя, определялась производительность по песку.

$Q_в = Q_{плавл.\ льда} + Q_{нагрев\ песка} +$

$+Q_{нагрев\ воды} - Q_{потери}$

- $Q_в$- количество теплоты, отдаваемой водой в подземной камере, кДж/ч

$Q_в = 1000*C_{в.}* \Delta t_1 * W$

$c_в$= 4,19 кДж/кг*град – теплоемкость воды; Δt_1, град. – разность температуры на входе и выходе из подземной камеры; W, $м^3$/ ч – расход воды.

- $Q_{плавл.\ льда}$ - количество теплоты, затраченное на плавление льда, кДж/ч

$Q_{плавл.\ льда} = G * П* L$

G - льдистость грунта, $кГ/м^3$ (G= 285 $кГ/м^3$); П - производительность по песку, $м^3$/ч; L- удельная теплота плавления льда, кДж/$м^3$ (L= 334 кДж/$м^3$).

- $Q_{нагрев\ песка}$ – количество теплоты, затраченное на нагревание мерзлой породы от -5° С до 0° С, кДж;

$Q_{нагрев\ породы}= 1000*c_м* \Delta t_1 * П$

$C_м$ = 2,0 кДж/кг*град - удельная теплоемкость мерзлой породы; Δt_2 , град - изменение температуры от -5° С до 0° С.

- $Q_{нагрев\ песка}$ – количество теплоты, затраченное на нагревание оттаявшего песка от 0° С до 4° С, кДж

$Q_{нагрев\ песка}=1000* c_п* \Delta t_3 * П$

$C_п$= 2,9 кДж/кг*град- удельная теплоемкость талого песка; Δt_3 , град - изменение температуры от 0° С до 4° С.

- $Q_{потери}$ – потери тепла в вечномерзлую толщу через стенки камеры сечением S, кДж

$Q_{потери} = \bar{A} * S$

$\bar{A}$ = - λ*grad t, кДж/м*ч - вектор плотности теплового потока; λ - коэффициент теплопроводности (λ = 7,52 кДж/м*ч*град); grad t – градиент температуры в мерзлом массиве, град/м; S-площадь поверхности теплообмена в камере, $м^2$.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости динамики изменения объема камеры и производительности по песку в процессе отработки при пересчете на натурные показатели. Средняя производительность по песку в течение первого месяца при непрерывной схеме (27 $м^3$/ч) на 60 % выше, чем при циклической (17 $м^3$/ч). При максимальном радиусе 25 м объем подземной камеры, создаваемой по непрерывной схеме (23 тыс. $м^3$) в 2,3 раза превышает объем камеры, создаваемой по циклической схеме (10 тыс. $м^3$). Таким образом, несмотря на снижение удельного расхода теплоносителя при циклической схеме, для условий Севера Тюменской области с коротким добычным сезоном целесообразно использовать непрерывную схему отработки подземной камеры.

При продолжительности добычного сезона 100-120 суток и мощности продуктивного пласта мерзлого песка 30 м одним скважинным снарядом за сезон можно отрабатывать две камеры объемом по 30 тыс. $м^3$. Сезонный объем добычи одним комплексом, состоящим из 10 скважинных снарядов, составит около 600 тыс. $м^3$ песка.

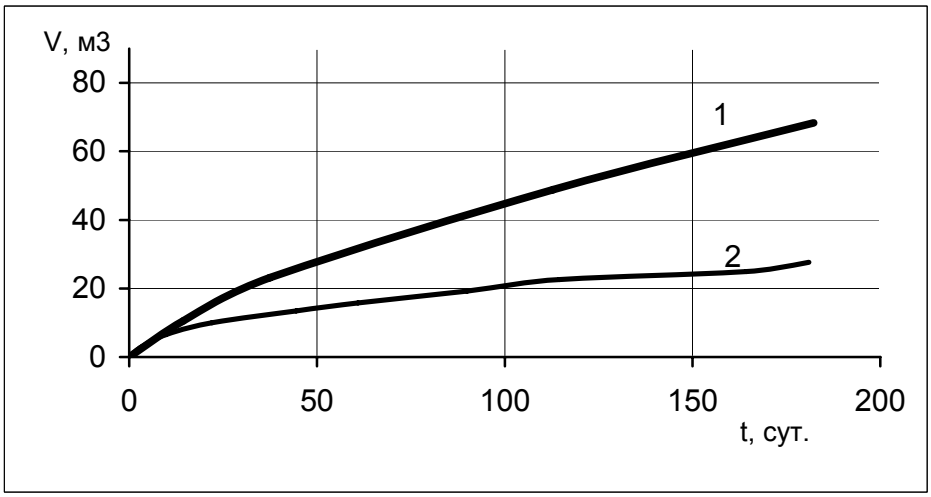


Рис. 3. Зависимость изменения объема камеры V от времени отработки t при непрерывной 1 и циклической 2 выемке песка

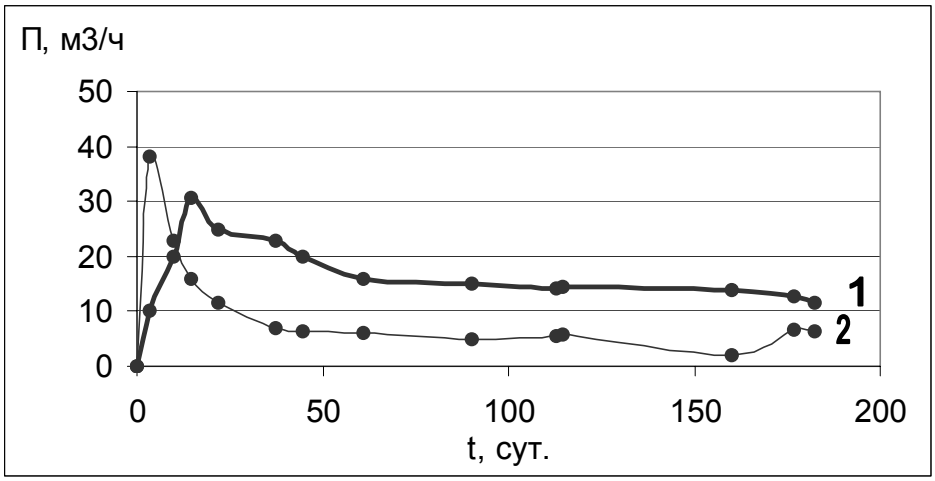
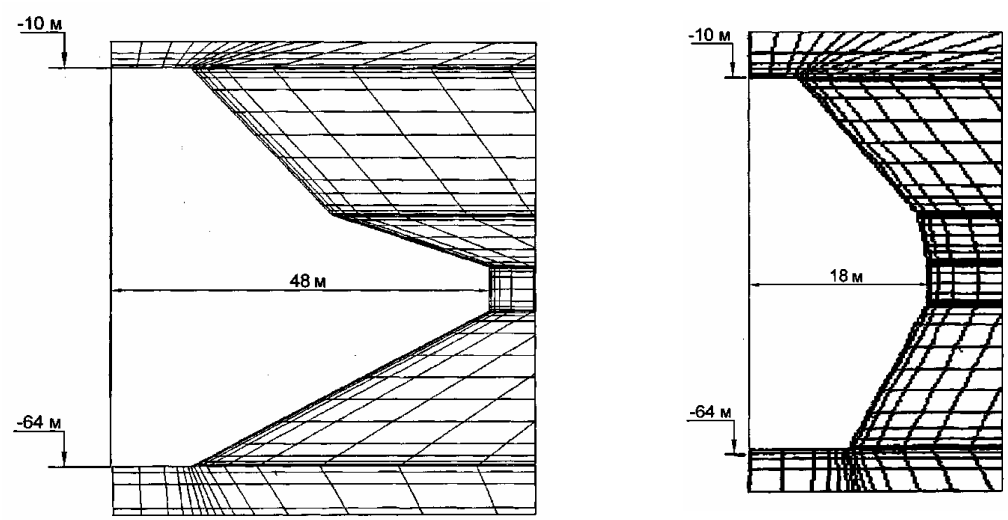


Рис. 4. Зависимость изменения производительности по твердому материалу от времени отработки t при непрерывной 1 и циклической 2 выемке песка

На основе полученных геометрических параметров добычной камеры и свойств покрывающих пород и мерзлого массива был выполнен расчет устойчивости подземных камер.

Величина предельно устойчивого пролета камер определялась по результатам математического моделирования методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния массива многолетнемерзлых пород в окрестности проектируемых выработок.

Расчеты велись по разработанной в ООО «Подземгазпром» методике оценки устойчивости выработок, имеющих фор-



а) б)

Рис. 5. Параметры устойчивости затопленной (а) и незатопленной (б) камеры

Прочностные и деформационные характеристики покрывающих пород и мерзлого песка

№ элемента	Интервал, м	t, ^{0}C	Горная порода	Расчетные параметры уравнения состояния		Интенсивность касательных напряжений	Скорость изменения интенсивности деформации сдвига
				η_i, МПа с	η_υ, МПа с	σ_i^∞, МПа	$\dot{\varepsilon}_i^\infty$, 1/с
1	0-10	-2,7	суглинок	$5{,}9\cdot10^8$	$4{,}4\cdot10^{10}$	0,25	$4\cdot10^{-9}$
2	10-30	-2,7	лед	$2{,}35\cdot10^8$	$3{,}5\cdot10^{10}$	0,8	$0{,}5\cdot10^{-8}$
3	30-100	-2,7	песок	$14{,}9\cdot10^8$	$10{,}58\cdot10^{10}$	0,5	$4\cdot10^{-9}$

му осесимметричного тела, с учетом корректировки на основе эксплуатации опытных резервуаров.

Для оценки устойчивости проектируемой гидродобычной камеры принималась модель массива, вмещающего полость. Для удобства выполнения расчетов асимметричная форма камеры была приведена к осесимметричной при сохранении её исходных значений высоты и максимального пролета.

Рассматривался породный массив, состоящий из трех слоев пород с различными свойствами, характеристики и расчетные параметры которых определены по результатам физико-механических испытаний пластового льда и вмещающих его пород Бованенковской площади и приведены в таблице. Расчетная схема подземного резервуара представлена на рис. 5.

Решалась пространственная задача о деформировании весомой полубесконечной среды, ослабленной полостью. При численном решении задачи в окрестностях полости выделялась некоторая весомая область D, границы которой находятся на расстоянии 2,5 L от поверхности полости, где L – наибольший ее пролет. На границах области задавались

напряжения или перемещения, заменяющие внешние воздействия.

При выполнении расчетов давление по всей поверхности камеры принято равным давлению воды на глубине залегания потолочины. В результате расчетов получены значения напряжений, скоростей деформаций и скоростей перемещений в заданных точках окрестности выработки. Кроме этого определены перемещения всех приконтурных точек за год. Для затопленной гидродобычной камеры объемом 80 тыс. м^3 и незатопленной камеры объемом 35 тыс. м^3 области запредельного деформирования расчетом не выявлены. Конвергенция по результатам расчетов практически отсутствует.

В целом анализ и сопоставление результатов расчетов показывают, что принятые нами параметры и форма гидродобычных камер вполне соответствуют критериям устойчивости.

Выполненные исследования показали, что применение предлагаемой технологической схемы будут эффективно при разработке погребенных многолетнемерзлых песчаных отложений.

Выявленные запасы погребенного песка и технология скважинной гидродобычи могут решить проблему обеспечения строящихся объектов при освоении газоконденсатных месторождений Ямала.

Предлагаемая технология скважинной гидродобычи позволяет не только добывать значительные объемы песка из скважины, но и формировать устойчивые подземные камеры объемом 10-30 тысяч м^3, которые могут быть использованы при подземном хранении жидких углеводородов и захоронении промышленных отходов.

Коротко об авторах

Хрулев Александр Сергеевич – доктор технических наук, член-корр. РАЕН, начальник Отдела разработки мерзлых осадочных пород и сооружения подземных хранилищ,
Филимонов Юрий Леонидович – кандидат технических наук, заведующий Лабораторией устойчивости подземных резервуаров,
Роднов Сергей Сергеевич – младший научный сотрудник,
Шайкина Юлия Григорьевна – младший научный сотрудник,

ООО «Подземгазпром».