

УДК 622.691

**С.Д. Сурин**

## **ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАССИВ МЕРЗЛЫХ ПОРОД ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ БУРОВЫХ ОТХОДОВ В ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ**

*Решены задачи изучения температурного режима многолетнемерзлых грунтов при воздействии на них теплых отходов бурения, сбрасываемых в подземные полости. Подобраны граничные условия на дневной поверхности, соответствующие реальным.*

*Ключевые слова: мерзлые песчаные отложения, буровые отходы, температурные разрезы грунтов, подземные резервуары.*

**Семинар № 20**

**В** настоящее время приоритетным регионом для освоения газовых месторождений является Крайний Север. При освоении НГКМ объем буровых отходов может достигать 400-500 тыс. м<sup>3</sup>. ООО «Подземгазпром» было предложено создание серии подземных резервуаров в мерзлых дисперсных грунтах на территориях северных НГКМ. Строительство подземных резервуаров ведется в многолетнемерзлых песчаных отложениях или прослоях пластовых льдов методом размыва пород через скважину с последующим выносом оттаявшего материала на поверхность. Такой метод позволяет добывать строительные пески с глубин до 100 м, а образовавшиеся камеры использовать для захоронения слаботоксичных буровых отходов.

Организацией ООО «Подземгазпром» были разработаны регламенты создания устойчивых полостей в мерзлых песчаных отложениях объемом от 1700 до 5000 м<sup>3</sup> на глубинах от 10 до 100 м.

Целью данной работы являлось изучение теплового воздействия на многолетнемерзлый массив в процессе эксплуатации подземных резервуаров, в

который входит стадия заполнения резервуаров отходами бурения и стадия полного промерзания продуктов хранения, а также изучение закономерностей и факторов, влияющих на динамику промерзания буровых отходов.

Поставленные задачи решались численным методом с помощью программы «Тепло», созданной на кафедре геокриологии МГУ (авт. свидетельство №940281). Данная программа расчета температурного режима грунтов основана на энтальпийном методе, позволяющем наиболее точно отразить физические процессы, происходящие при оттаивании-замерзании влаги в грунте. В качестве численного метода применена схема метода конечных разностей как наиболее простая и надежная. Программа дает возможность рассчитать температурный режим в грунтовом массиве при:

- неоднородных свойствах грунтов;
- переменных пространственных размерах элементов-блоков, составляющих массив грунта;
- различных граничных условиях на границах расчетной области.

Прежде, чем перейти к моделированию процесса замерзания отходов

Таблица 1

**Осредненные характеристики грунтов на Бованенковском НГКМ  
(по данным ООО «Подземгазпром»)**

теплофизические характеристики						
грунт	Ст ккал/м <sup>3</sup> °С	См ккал/м <sup>3</sup> °С	Λт ккал/м час °С	Λм ккал/м час °С	Qф ккал/м <sup>3</sup>	Т.н.з., °С
Суглинки легкие	739	505	1,35	1,55	30000	-0,5
Пески пылеватые	620	450	1,55	2,09	17500	0
Суглинки тяжелые	720	550	1,12	1,42	30000	-1
Буровые отходы	800	580	1	1,35	50000	-1,5
Лед/Вода	1000	500	0,5	2	72000	0

Таблица 2

**Граничные условия, используемые в расчетах****(Т, °С - среднемесячная температура воздуха, а, ккал/м<sup>2</sup> час****°С - коэффициент теплоотдачи, используемый в программе «Heat»)**

Граничные условия на поверхности												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Т	-24,1	-27,4	-23,3	-12,0	-6,2	1,5	7,1	8,1	3,1	-3,6	-14,6	-19,0
а	0,6	0,6	0,4	0,4	1,2	3,0	3,0	3,0	2,2	1,3	1,0	0,7

бурения, необходимо получить граничные условия на дневной поверхности. Для этого была решена одномерная задача, целью которой было получить коэффициенты теплоотдачи (используемые для дальнейшего счета в программе «Тепло»). Исходными данными являлись теплофизические характеристики мерзлых грунтов и данные по термокаротажу скважин на территории Бованенковского НГКМ. Обработка данных натуральных наблюдений, предоставленных ООО «Подземгазпром», позволила выделить осредненный температурный разрез на территории Бованенковского НГКМ, характеризующийся температурами на глубине нулевых годовых амплитуд от -4 до -6 °С.

Грунтовый разрез можно в общем представить как трехслойный со следующими теплофизическими свойствами грунтов (табл. 1).

На верхней границе расчетной области в программе задаются граничные условия третьего рода с

различной среднемесячной температурой воздуха (табл. 2) и коэффициентами теплоотдачи, меняющегося из-за накопления/таяния снежного покрова.

Для получения коэффициента теплоотдачи была решена одномерная задача. При известном распределении температур в массиве грунтов (данные по термометрии скважин на Бованенковском НГКМ), данных о среднемесячных температурах воздуха на этой территории и известных теплофизических характеристиках грунтов были подобраны такие коэффициенты теплоотдачи, чтобы расчетное температурное поле соответствовало реально существующему (табл. 2).

В результате проведенных расчетов получены осредненные температурные разрезы грунтов на Бованенковском НГКМ. Полученные зависимости температур от глубины использовались в дальнейших расчетах в качестве исходных данных на начальный момент времени.

Прогнозные теплотехнические расчеты, как правило, выполнялись в два этапа.

На первом этапе выполнялись теплотехнические расчеты формирования температурного режима грунтов основания при существующих условиях теплообмена в геотехнических системах. Решение прогнозных задач этого этапа дало возможность получить параметры поверхностного теплообмена, соответствующие реальным. Критерием, подтверждающим правильность назначения верхних граничных условий в прогнозной задаче, является сходимость расчетного температурного поля многолетнемерзлых грунтов с температурным полем грунтов, зафиксированным в процессе натурных исследований (данные предоставлены ООО «Подземгазпром»). Сформированные на этом этапе параметры расчетных областей моделей использовались на следующих этапах прогнозных расчетов в качестве начальных условий.

На втором этапе оценивалось время полного перехода захороненных отходов бурения в мерзлое состояние в зависимости от глубины заложения выработок, их геометрии и литологических особенностей разреза. В этой серии расчетов делалось допущение, что резервуары заполняются отходами бурения мгновенно (т.к. время заполнения резервуаров существенно меньше времени промерзания) и в них не остается пустого пространства (ввиду конвергенции выработок и расширения отходов бурения в процессе замерзания). Принималось, что отходы бурения сбрасываются в хранилища при температуре +4 0С.

Время, за которое отходы бурения перейдут в твердомерзлое состояние напрямую зависит от объема резер-

вуара, глубины его заложения, литологических особенностей разреза и геометрической формы полости. Время восстановления температурного режима грунтов после полного замерзания буровых отходов также зависит от глубины заложения подземной выработки и литологического состава грунтов, слагающих массив.

При проведении математического моделирования процесса промерзания отходов бурения, сбрасываемых в подземные выработки, сделаны следующие допущения:

- о все расчеты сделаны для трехслойного разреза, сложенного легкими суглинками мощностью 10 м вблизи поверхности, 40 м слоем песчаного грунта и подстилающими ниже тяжелыми суглинками;

- о свойства грунтов не изменяются внутри одного инженерно-геологического слоя, как по простиранию, так и по глубине;

- о ввиду симметричности резервуара и изотропности свойств грунтов можно свести задачу к осесимметричной;

- о на боковых границах расчетной области задается тепловой поток равный нулю, на нижней границе – тепловой поток, соответствующий температурному градиенту на полуострове Ямал (2,6 °С на 100 м), на верхней границе – граничные условия третьего рода с коэффициентом теплоотдачи, табл. 3;

- о считается, что буровые отходы сбрасываются в резервуар мгновенно (такое допущение не влияет на общее время промерзания буровых отходов и существенно снизит количество операций по расчету);

- о резервуар заполняется отходами бурения полностью (на 100%) без оставления воздушной прослойки;

Таблица 3

**Время промерзания отходов бурения в зависимости от глубины заложения, объема и геометрии подземных резервуаров в мерзлых песках**

Объем, М <sup>3</sup>	Глубина заложения кровли, м	Высота резервуара, м	Радиус резервуара, м	Время промерзания, год	Время восстановления естественных температур, год
1700	15	15	6,0	62	0.5
		10	7,4	55	0.5
	30	15	6,0	77	0.9
		10	7,4	67	0.8
3500	15	15	8,6	92	0.6
		10	10,6	71	0.5
	30	15	8,6	117	1.2
		10	10,6	83	1.1
5000	15	20	8,9	122	0.6
		15	10,3	99	0.6
	30	20	8,9	167	2.0
		15	10,3	133	1.8

о под временем восстановления естественного температурного режима многолетнемерзлых пород считается время, которое прошло после полного перехода отходов бурения в твердое состояние до момента охлаждения массива до естественных температур или до момента перехода грунтов в твердомерзлое состояние (для песчаных грунтов эта температура составляет  $-1^{\circ}\text{C}$ , для глинистых  $-2^{\circ}\text{C}$ ).

*Глубина заложения.*

Оценивалось время промерзания подземных резервуаров в зависимости от глубины заложения подошвы выработки. При прочих равных условиях (одинаковые теплофизические свойства мерзлых грунтов в разрезе, одинаковые объемы подземных выработок и идентичная геометрия самой выработки) время промерзания будет существенно отличаться.

Например, при использовании следующих теплофизических характеристик грунтов (табл. 1), слагающих усредненный разрез на территории

Бованенковского НГКМ, для резервуаров полезным объемом 1700, 3500 и 5000 м<sup>3</sup>, при заполнении их отходами бурения при температурах  $+4^{\circ}\text{C}$  получено расчетное время замерзания (табл. 3).

Такое расхождение во времени промерзания объясняется тем, что для проникновения на большую глубину потоку холода требуется большее время. Это подтверждается и временем восстановления естественного температурного поля после замерзания отходов бурения (пропорционально глубине заложения выработки).

*Геометрия полости.*

Существенное влияние на промерзание буровых отходов, сброшенных в хранилища, оказывает геометрия подземных выработок. Как показали проведенные расчеты при прочих равных условиях (объеме, глубине заложения кровли, литологическом разрезе и пр.) наиболее быстрое промерзание происходит в резервуарах с большим радиусом и меньшей высотой (при аппроксимации резервуаров

цилиндрической формой). Проведенные расчеты для резервуаров объемом 1700, 3500 и 5000 м<sup>3</sup> показали, что при одинаковом строении геологического разреза и одних и тех же глубинах заложения кровли резервуаров дольше замерзание происходит в полостях с большей высотой и меньшим радиусом. Это объясняется тем, что максимальный теплообмен с дневной поверхностью идет через кровлю подземной полости, следовательно, чем больше площадь кровли, тем больше подток холода и, как результат, быстрее промерзание. С боков к выработке поток холода меньше ввиду постепенного разогревания стенок и уменьшения градиента температур. Результаты моделирования представлены в табл. 4.

Время восстановления естественного температурного поля лишь косвенно зависит от геометрии выработки. При большей высоте резервуара восстановление естественного режима дольше происходит в нижней части выработки. Однако это можно объяснить той же причиной, что и в предыдущем случае (где исследовалось время восстановления исходных температур от глубины заложения выработки).

#### *Особенности разреза.*

Геологический разрез, представленный мерзлыми дисперсными грунтами, оказывает сильное влияние на время промерзания отходов, захораниваемых в резервуар. Так, например, при одной и той же глубине залегания кровли выработки (на 30 м от дневной поверхности) и при различных мощностях и глубинах залегания переслаивающихся глинистых и песчаных пластов время полного промерзания резервуара может отличаться в 2 и более раз.

Если представить ситуацию, где трехслойный разрез сложен сверху

вниз глинами – песками – глинами то, проведя серию расчетов можно получить зависимость времени замерзания подземных резервуаров от мощности приповерхностного глинистого пласта. Так при мощности верхнего глинистого горизонта в 30 м время замерзания резервуара объемом 5000 м<sup>3</sup> с радиусом 8.9 м и высотой 20 м, залегающего в песчаном пласте, составляет 189 лет, а при мощности глин 15 м – уже 167 лет; при залегании песчаных грунтов непосредственно с поверхности время промерзания данного резервуара сокращается до 111 лет (данные по теплофизическим свойствам грунтов представлены в табл. 1). Такие значения времени промерзания отходов бурения, захороненных в подземных резервуарах, обуславливаются тем, что песчаный материал обладает существенно большей теплопроводностью, нежели глинистый. Следовательно, поток холода с дневной поверхности будет значительно быстрее доходить до выработки и замораживать хранимые продукты.

Время восстановления естественного температурного режима зависит в той же мере от литологического состава грунтов, слагающих разрез, и их мощности. Если рассматривать аналогичный резервуар (объем 5000 м<sup>3</sup> с радиусом 8.9 м и высотой 20 м, спроектированный в песчаном пласте), то время восстановления исходных температур при мощности верхнего глинистого горизонта в 30 м составит 2 года, при мощности глин 15 м – 1 год 9 месяцев, а при полностью песчаном разрезе с поверхности – 1 год и 1 месяц.

Для детального моделирования процесса сброса отходов бурения учитывалось, что с каждой эксплуатационной скважины в процессе бурения образуется около 600 м<sup>3</sup> буровых

314 Таблица 4  
Теплофизические свойства ММП, принимаемые в расчетах

№1	V, м <sup>3</sup> 2000	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С		
										суглинок	6.0
№1	Н <sub>под</sub> 22.5	песок	23.0	640	455	1.4	1.91	16750	-0.16		
		суглинок	120.0	700	539	1.17	1.5	32000	-1.4		
№2	V, м <sup>3</sup> 2000	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С		
		суглинок	18.0	703	509	1	1.53	27500	-0.43		
		Н <sub>под</sub> 32.5	песок	32.5	650	465	1.32	2.15	16750	-0.31	
№2	Н <sub>под</sub> 32.5	суглинок	120.0	689	545	1.05	1.34	34000	-1.83		
		№3	V, м <sup>3</sup> 2500	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
				суглинок	11.5	724	513	1.2	1.5	30400	-0.9
Н <sub>под</sub> 32.5	песок			34.5	621	445	1.46	1.83	19200	-0.05	
№3	Н <sub>под</sub> 32.5	суглинок	120.0	674	570	1.17	1.41	30000	-1.2		
		№4	V, м <sup>3</sup> 3000	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
				суглинок	8.5	648	501	1.18	1.44	28000	-0.38
Н <sub>под</sub> 32.5	песок			30.5	623	450	1.64	2.35	19200	-0.02	
№4	Н <sub>под</sub> 32.5	суглинок	120.0	690	555	1.12	1.36	35000	-1.9		
		№5	V, м <sup>3</sup> 3500	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
				суглинок	8.5	702	513	1.01	1.54	28200	-0.4
Н <sub>под</sub> 32.5	песок			32.5	650	455	1.6	2.6	18700	-0.14	
№5	Н <sub>под</sub> 32.5	суглинок	120.0	681	532	1.1	1.36	28600	-1.85		
		№6	V, м <sup>3</sup> 4500	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
				суглинок	13.0	722	506	1.34	1.54	34000	-1.8
Н <sub>под</sub> 32.5	песок			32.0	661	492	1.64	1.84	16000	-0.2	
№6	Н <sub>под</sub> 32.5	суглинок	120.0	674	545	1.18	1.42	35000	-2		
		№7	V, м <sup>3</sup> 5000	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
				суглинок	7.0	712	650	0.8	1.2	27200	-0.1
Н <sub>под</sub> 32.5	песок			34.0	628	457	1.6	2.09	16400	-0.4	
№7	Н <sub>под</sub> 32.5	суглинок	120.0	721	575	0.9	1.06	33000	-2		

№8	V, м <sup>3</sup> 2000	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
		суглинок	24.0	792	550	1.04	1.37	32000	-0.98
	Н <sub>под</sub> 42.5	песок	35.0	699	487	1.4	1.81	16500	-0.8
		суглинок	120.0	712	529	1.16	1.32	35000	-2
№9	V, м <sup>3</sup> 2500	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
		суглинок	23.0	740	573	1.13	1.3	30000	-0.6
	Н <sub>под</sub> 42.5	песок	37.0	660	445	1.09	1.68	15500	-0.8
		суглинок	120.0	659	528	1	1.23	32000	-2
№10	V, м <sup>3</sup> 3000	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
		суглинок/супесь	15.5	652	486	1.09	1.68	25500	-0.25
	Н <sub>под</sub> 42.5	песок	40.5	645	444	1.36	2.12	17000	-0.33
		суглинок	120.0	678	548	1.13	1.47	28750	-1.62
№11	V, м <sup>3</sup> 3500	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
		суглинок	17.5	688	481	1.23	1.94	19000	-0.1
	Н <sub>под</sub> 42.5	песок	42.5	652	462	1.45	2.26	15500	-0.05
		суглинок	120.0	662	526	0.96	1.17	35000	-1.58
№12	V, м <sup>3</sup> 2500	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
		суглинок	28.0	724	540	0.96	1.21	32000	-1.9
	Н <sub>под</sub> 52.5	лед	36.0	1000	500	0.5	2	80000	0
		песок	53.5	643	466	1.73	2.89	16500	0
		суглинок	120.0	657	543	0.9	1.06	34000	-2
№13	V, м <sup>3</sup> 3000	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
		суглинок	32.0	747	566	0.91	1.32	30000	-0.8
	Н <sub>под</sub> 52.5	песок	58.0	595	436	1.63	2.49	17000	-0.1
		суглинок	120.0	669	574	1.21	1.45	32000	-1.9
№14	V, м <sup>3</sup> 4000	грунты	подошва пласта в программе "Тепло"	Ст, ккал/ м <sup>3</sup> °С	См, ккал/ м <sup>3</sup> °С	∧т, ккал/м час °С	∧м, ккал/м час °С	Qфаз, ккал/ м <sup>3</sup>	Тн.з, °С
		суглинок	8.5	826	583	0.89	1.49	32000	-0.7
	Н <sub>под</sub> 52.5	песок	44.5	626	457	1.6	2.35	16000	-0.5
		суглинок	120.0	695	581	1.06	1.28	35000	-2

отходов. Время, необходимое на монтаж буровой установки, непосредственно бурение скважины и последующий демонтаж установки, составляет один месяц, т.е. отходы в резервуар поступают стадийно через равные промежутки времени раз в месяц. Приблизительный объем каждой «порции» 600 м<sup>3</sup>. Т.к. в этой постановке задачи более детально рассматривается тепловое воздействие на мерзлые грунты в первые годы хранения отходов бурения, то было решено смоделировать неполное заполнение полости (на 90-95%). Данная серия расчетов проведена для различного строения грунтовой толщи, чтобы оценить комплексное влияние факторов, указанных в первой серии расчетов.

На границах расчетной области, используемой в программе «Тепло», задавались граничные условия со следующими параметрами: на боковых границах тепловой поток равен 0 (в виду радиально-симметричной постановки задачи и изотропности массива), на нижней границе задавался геотермический градиент, равный 2,6 °С, на верхней границе массива граничные условия принимались в соответствии с табл. 2.

Теплофизические свойства грунтов, определяющие скорость распространения тепловых волн в массиве ММП, теплота фазовых переходов и температура начала замерзания грунтов выбирались для каждого расчета из осредненных данных (табл. 4).

Допускается, что отходы бурения, подлежащие захоронению, обладают одинаковыми теплофизическими свойствами на всей территории северных месторождений в зависимости от глубины, характера бурения и прочих технологических условий при проходке промысловых скважин (теплопроводность в талом состоянии 1.0

ккал/м час °С, в мерзлом – 1.35; теплоемкость в талом состоянии – 800 ккал/м<sup>3</sup> °С, в мерзлом – 580; температура начала замерзания -1.5 °С; скрытая теплота фазовых переходов 50000 ккал/м<sup>3</sup>). Воздух, находящийся в верхней части подземных резервуаров в момент сброса буровых отходов и дальнейшего их замерзания, обладает одинаковыми теплофизическими характеристиками, которые не изменяются с течением времени (теплопроводность 0.1 ккал/м час °С, теплоемкость 240 ккал/м<sup>3</sup> °С). Температура буровых отходов, подаваемых в резервуар, принимается равной 8.1 °С (как средняя температура самого теплового месяца в году на территории Бованенковского НГКМ). Это позволяет оценить максимальное тепловое влияние подземных выработок на мерзлый массив и, в случае благоприятного прогноза, оставляет дополнительный запас «прочности» для массива ММП.

Оценивалось тепловое воздействие на массив многолетнемерзлых грунтов при заполнении выработки продуктами хранения. Данные расчеты основывались на следующих допущениях:

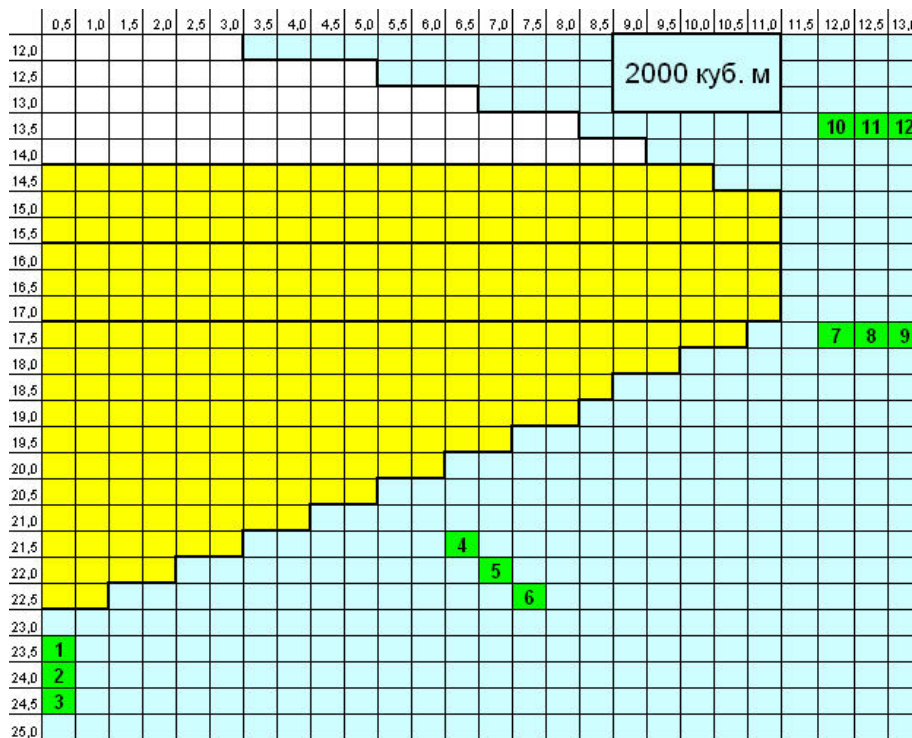
- в зависимости от объема резервуаров будет несколько стадий заполнения;

- считается, что порция отходов, поступающая в резервуар, сбрасывается мгновенно;

- начальная температура мерзлых пород получена из решения одномерной задачи с граничными условиями, соответствующим реальным;

- массив мерзлых грунтов представляет собой трехслойную толщу (сверху вниз: суглинки – пески – суглинки), причем теплофизические свойства грунтов внутри каждого слоя постоянны и не меняются с течением времени и по простиранию;





**Рис. 1. Схема разбивки массива, принятая для расчетов в программе «Тепло» для резервуара объемом 2000 м<sup>3</sup>, глубиной заложения до 22.5 м и точки снятия температурных отчетов**

- подземные полости имеют ось симметрии, следовательно, задачу можно свести к осесимметричной.

Согласно принятому регламенту на размыв подземных полостей и геометрической форме, сохраняющей устойчивость в течение необходимого отрезка времени (данные ООО «Подземгазпром»), в программе расчета «Тепло» задавалась соответствующая форма подземной камеры максимально приближенная к исходной.

Приблизительный схематический вид подземных полостей, задаваемых для каждого расчета в программе «Тепло», показан на рис. 1. Наблюдения за динамикой температур в мерзлом массиве по мере заполнения резервуаров отходами бурения и дальнейшего промерзания захороненного

продукта в процессе моделирования проводились в точках, указанных на рисунке.

Моделирование процесса замерзания буровых отходов проводилось до полного перехода изучаемого объема в твердое состояние. Помимо времени промерзания захороненных буровых отходов изучались максимальные размеры зоны, внутри которой растепляющее воздействие от подземной полости составило 0.5 °С. Помимо этого оценивалась максимальная зона, в которой мерзлые пески вблизи подземного резервуара переходят из твердомерзлого в пластичномерзлое состояние в процессе захоронения и промерзания буровых отходов (твердомерзлыми считаются пески при температуре ниже -0.5 °С).

Таблица 5

**Температура грунтов вблизи подземного резервуара объемом 2000 м<sup>3</sup>**

Температура БО +8.1	точка №											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
время												
1 месяц	-0.98	-1.59	-2.16	-1.46	-2.10	-2.60	-2.97	-3.18	-3.41	-3.64	-3.64	-3.64
2 месяца	-0.72	-1.40	-1.90	-1.13	-1.63	-2.07	-1.58	-2.05	-2.64	-3.28	-3.31	-3.37
3 месяца	-0.71	-1.40	-1.80	-0.92	-1.36	-1.76	-1.39	-1.76	-2.26	-2.17	-2.41	-2.73
1 год	-1.00	-1.40	-1.56	-0.58	-0.86	-1.12	-1.70	-1.85	-2.07	-2.23	-2.32	-2.46
5 лет	-1.40	-1.40	-1.47	-1.62	-1.69	-1.76	-1.90	-2.00	-2.14	-2.35	-2.41	-2.49
20 лет	-1.66	-1.70	-1.76	-1.75	-1.82	-1.89	-2.34	-2.40	-2.49	-2.77	-2.80	-2.84
50 лет	-1.88	-1.93	-1.97	-2.06	-2.13	-2.19	-2.71	-2.75	-2.81	-3.07	-3.09	-3.11

Таблица 6

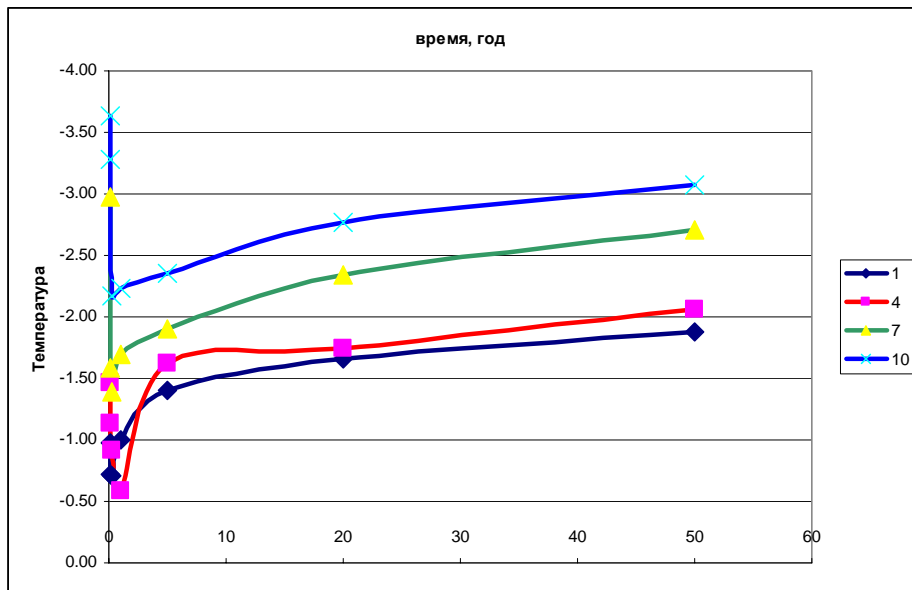
**Температура вблизи подземного резервуара объемом 5000 м<sup>3</sup>  
с глубиной заложения подошвы до 32.5 м**

Температура БО +8.1	точка №											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
время												
1 месяц	-1,38	-1,85	-2,23	-0,90	-1,52	-2,08	-3,27	-3,53	-3,42	3,66	-3,66	-3,66
2 месяца	-1,15	-1,51	-1,84	-0,70	-1,19	-1,66	-1,36	-1,90	-2,21	-3,67	-3,67	-3,67
3 месяца	-1,01	-1,32	-1,59	-0,62	-1,02	-1,41	-1,43	-1,80	-2,13	-3,64	-3,64	-3,64
4 месяца	-0,95	-1,21	-1,45	-0,56	-0,91	-1,26	-1,30	-1,62	-1,90	-3,49	-3,49	-3,50
5 месяцев	-0,89	-1,13	-1,35	-0,52	-0,84	-1,16	-1,26	-1,52	-1,77	-3,01	-3,12	-3,16
6 месяцев	-0,85	-0,16	-1,26	-0,50	-0,80	-1,09	-1,21	-1,45	-1,68	-2,26	-2,42	-2,58
7 месяцев	-0,81	-1,06	-1,19	-0,47	-0,76	-1,03	-1,18	-1,40	1,60	-1,19	-1,58	-1,91
8 месяцев	-0,79	-0,98	-1,16	-0,45	-0,73	-0,99	-1,15	-1,35	-1,54	-1,05	-1,38	-1,68
1 год	-0,80	-0,98	-1,15	-0,41	-0,66	-0,88	-1,07	-1,23	-1,39	-0,88	-1,11	-1,33
5 лет	-1,46	-1,54	-1,61	-0,91	-1,05	-1,18	-1,47	-1,53	-1,58	-1,62	-1,68	-1,74
20 лет	-1,68	-1,71	-1,75	-1,60	-1,65	-1,70	-1,76	-1,81	-1,85	-1,88	-1,93	-1,98
50 лет	-1,73	-1,76	-1,79	-1,68	-1,73	-1,77	-1,93	-1,97	-2,00	-2,16	-2,20	-2,23

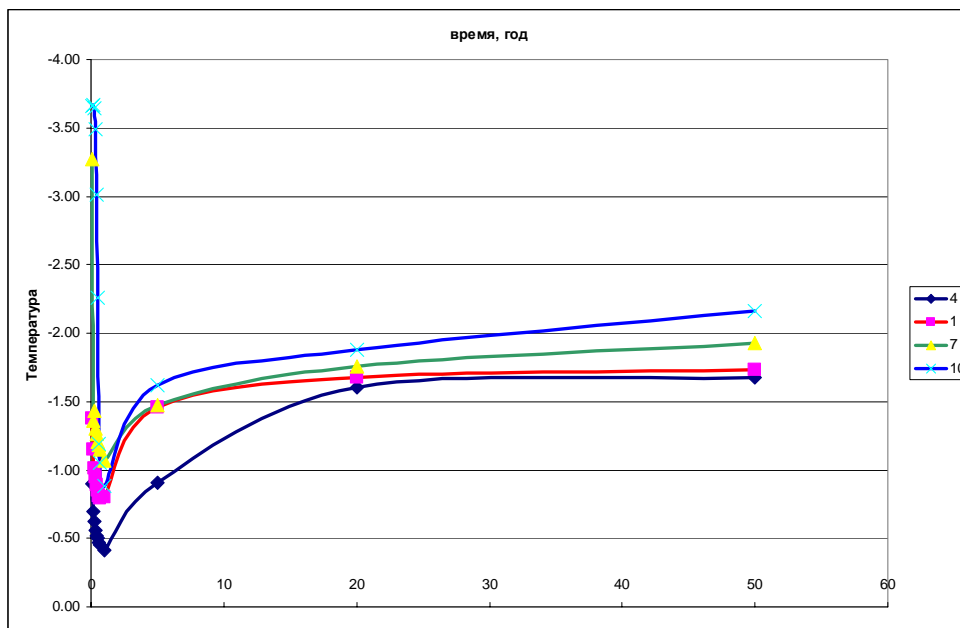
Важной расчетной характеристикой, определяющей точность проведенного моделирования, является отрезок времени, через который растепляющее воздействие от подземной выработки с теплыми буровыми отходами заменяется на охлаждающее действие со стороны массива ММП (т.е. момент, когда прекращается растепление ММП и начинается замораживание буровых отходов).

В результате проведенных расчетов получены зоны растепления вокруг подземных резервуаров в про-

цессе их заполнения. Для резервуаров объемом 2000 и 5000 м<sup>3</sup> приведены данные о температурном режиме грунтов вблизи подземной выработки через 1, 5, 20 и 50 лет после начала сброса буровых отходов в подземные хранилища (табл. 5-6). Представлены графики зависимости температуры от времени вблизи резервуаров в точках 1, 4, 7, 10 согласно рис. 1. В общем же расчеты проведены для нескольких типов резервуаров объемом от 2 до 5 тыс. м<sup>3</sup> глубины заложения подошвы резервуаров варьируются от 22.5 м до 52.5 м,



**Рис. 2. Изменение температур во времени вблизи подземного резервуара объемом 2000 м<sup>3</sup> с глубиной заложения подошвы до 22.5 м**



**Рис. 3. Изменение температур во времени вблизи подземного резервуара объемом 5000 м<sup>3</sup> с глубиной заложения подошвы до 32.5 м**

что моделирует «реальные условия», в которых нет возможности строительства резервуарного парка на одних и тех же высотных отметках.

Таблица 7

**Тепловое влияние резервуаров в процессе эксплуатации**

Объем, м <sup>3</sup>	Глубина заложения подошвы, м	Время полного заморозания, лет	Размер зоны растепления, м	Зона макс. температурного влияния, м	Время растепления, лет, мес
2000	22,5	99	0,3	7,0	1 год 4 мес
2000	32,5	117	0,3	7,5	1 год 5 мес
2500	32,5	151	0,5	8,0	1 год и 7 мес
3000	32,5	170	0,25	11,0	1 год и 8 мес
3500	32,5	184	0,15	12,5	1 год и 8 мес
4500	32,5	215	0,5	15,0	1 год и 9 мес
5000	32,5	215	0,65	15,0	1 год и 10 мес
2000	42,5	137	0,8	7,5	1 год и 6 мес
2500	42,5	158	0,9	8,5	1 год и 5 мес
3000	42,5	168	0,75	11,0	1 год и 8 мес
3500	42,5	176	0,25	13,0	1 год и 8 мес
2500	52,5	185	1,0	8,5	1 год и 7 мес
3000	52,5	217	1,05	12,0	1 год и 8 мес
4000	52,5	216	0,7	14,5	1 год и 8 мес

Резервуар объемом 2000 м<sup>3</sup>, глубина заложения до 22,5 м.

Расчетное время полного перехода буровых отходов в мерзлое состояние – 99 лет.

Размер зоны растепления песчаных грунтов до пластичномерзлого состояния составил – 0,3 м. Максимальный размер зоны теплового влияния в мерзлых песках, где температуры, по сравнению с естественными, увеличились на 0,5 °С равен – 7,0 м.

Время, прошедшее с момента начала захоронения отходов бурения до прекращения растепления массива ММП, в данном случае составляет 1 год и 4 месяца.

Резервуар объемом 5000 м<sup>3</sup>, глубина заложения до 32,5 м.

Расчетное время полного перехода буровых отходов в мерзлое состояние – 215 лет.

Размер зоны растепления песчаных грунтов до пластичномерзлого состояния составил – 0,65 м. Максимальный размер зоны теплового влияния в мерзлых песках, где температуры, по сравнению с естественными, увеличились на 0,5 °С равен – 16,0 м.

Время, прошедшее с момента начала захоронения отходов бурения до прекращения растепления массива ММП, в данном случае составляет 1 год и 10 месяцев.

В результате проведенных расчетов были изучены размеры зон растепления мерзлого массива в процессе эксплуатации подземных резервуаров для захоронения отходов бурения и время полного перехода хранимого продукта в мерзлое состояние (табл. 7).

Резюмируя, можно отметить, что в данной работе были решены задачи изучения температурного режима многолетнемерзлых грунтов при воздействии на них теплых отходов бурения, сбрасываемых в подземные полости.

В настоящей работе были решены следующие задачи:

1. подобраны граничные условия на дневной поверхности, соответствующие реальным (табл. 2).

2. проведен расчет времени промерзания отходов в резервуарах и восстановление естественного температурного режима грунтов вблизи подземной полости для резервуаров объемом 1,7, 3,5, 5 тыс. м<sup>3</sup> располо-

женных в толщах мерзлого песка. В зависимости от глубины заложения, объема резервуара и его геометрических особенностей время промерзания отходов бурения варьируется от 55 лет до 167 лет. Время восстановления естественной температурного фона после окончания процессов фазовых переходов в подземных выработках составляет от 6 месяцев до 2 лет в зависимости от особенностей заложения резервуаров.

3. рассчитано тепловое воздействие на вмещающие породы при эксплуатации подземных резервуаров разного объема (от 2000 до 5000 м<sup>3</sup>) расположенных в толще многолетнемерзлых песков. В процессе сброса продуктов захоронения в подзем-

ные резервуары происходит растепление стенок камеры и возможно оттаивание некоторого объема грунтов. В результате проделанных расчетов оценено тепловое влияние на массив многолетнемерзлых пород с указанием максимальной зоны критического растепления (где грунты переходят в пластичномерзлое состояние) и зона теплового влияния подземных резервуаров на массив мерзлых грунтов для реальных существующих условий Бованенковского НГКМ (табл. 7). Проведенные тепловые расчеты можно использовать, прежде всего, для оценки возможного изменения устойчивости подземных резервуаров в процессе их эксплуатации. **ИДБ**

### Коротко об авторе

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



## ДИССЕРТАЦИИ

### ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
<b>САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ им. Г.В. ПЛЕХАНОВА</b>			
ВОЛИК Иван Александрович	Обоснование параметров системы с взрыводоставкой руды для разработки мощных наклонных залежей применительно к условиям Малевского рудника АО «Казцинк»	25.00.22	к.т.н.
СИДОРЕНКО Сергей Александрович	Обоснование способов повышения устойчивости участковых подготовительных выработок надрабатываемых слоев при отработке пологих угольных пластов Кузнецкого бассейна	25.00.22	к.т.н.