

УДК 622.261:622.363

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ЛЕДОПОРОДНОГО МАССИВА И ЕГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИ ПРОХОДКЕ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ**

В. Н. Аптуков^{1,2}, В. В. Тарасов¹

¹АО «ВНИИ Галургии», E-mail: Vladislav.Tarasov@uralkali.com,
ул. Сибирская, 94, 614000, г. Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: Aptukov@psu.ru, ул. Букирева, 15, 614000, г. Пермь, Россия

Реализована новая расчетная модель для оценки температурного поля и напряжений в породном массиве на всех последовательных этапах строительства ствола в искусственном ледопородном массиве: замораживание грунта, прохождение вертикальной выработки, создание бетонной крепи и оттаивание. Модель позволяет проводить оценку динамики температур и напряжений в породном массиве, в том числе в ледопородном ограждении и в бетонной крепи на этапе замораживания и оттаивания с учетом теплофизических и механических параметров материалов. Установлено, что одинаковый режим функционирования охлаждающих колонок на всех глубинах является неоптимальным, приводящим к дополнительным затратам энергии.

Искусственное замораживание, формирование ледопородного массива, температурные поля, напряженное состояние, математическое моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20220508

Способ искусственного замораживания горных пород применяется для проходки шахтных стволов и других горных выработок в сложных горно-геологических условиях. Он состоит в образовании ледопородного ограждения вокруг будущего ствола шахты путем бурения вертикальных скважин через всю толщу водоносных пород. В них погружают замораживающие трубы, в которые опускают питающие и отводящие колонки с меньшим диаметром. По ним осуществляется циркуляция хладоносителя с помощью холодильных машин. Охлажденный до отрицательной температуры хладоноситель, циркулируя по замораживающим колонкам, забирает тепло у окружающих пород. В результате вокруг каждой замораживающей скважины образуются ледопородные цилиндры. С течением времени они увеличиваются в диаметре и смыкаются в сплошное ледопородное ограждение вокруг будущего ствола шахты, которое воспринимает на себя горное и гидростатическое давление, а также защищает шахтный ствол от затопления, создавая благоприятные условия для его проходки по обычной технологии.

В строительстве шахтных стволов на Верхнекамском месторождении искусственное замораживание водоносных пород — основной способ защиты от проникновения подземных вод и рассолов. Оно впервые применено в 1928 г. при проходке ствола № 2 Соликамского калийного комбината. Широкое распространение способ искусственного замораживания горных пород получил в Польше, Германии, Великобритании, Франции и Нидерландах [1].

Формирование напряженно-деформированного состояния грунтов при промерзании обусловливается криогенными процессами, включающими [2]:

- фазовый переход воды в лед с увеличением объема примерно на 9 %;
- криогенную миграцию воды к фронту промерзания в мелкодисперсных грунтах и обезвоживание грунтов в пределах нижележащих горизонтов;
- напорную миграцию воды и грунтовой массы, вызванную оттеснением из локально промерзающих участков в менее напряженные талые зоны;
- температурные деформации всех грунтовых компонентов.

Все перечисленные процессы протекают одновременно и неоднозначно влияют на формирование напряженно-деформированного состояния грунтов. Увеличение объема замерзающей воды и ее миграция к фронту промерзания — основная причина выпучивания грунтов. Температурное сокращение всех грунтовых компонентов массива с понижением температуры и обезвоживанием грунта, расположенного под промерзающим слоем, приводит к его оседанию. Промороженные грунты обладают ярко выраженными реологическими свойствами: ползучесть, снижение прочности во времени и релаксация напряжений. Данные свойства проявляются из-за деформации и формирования разрушений цементационных и межчастичных связей мерзлых грунтов. В толще пластичных пород происходит рост неравномерно распределенных по внешнему контуру нагрузок за счет развития морозного пучения.

Количественный и качественный учет данных факторов — трудноразрешимая проблема механики мерзлых грунтов, несмотря на огромный объем исследований в данном направлении. Помимо чисто температурных расчетов, обсуждается разработка методов прогноза формирования напряженного состояния, нагрузок на крепь и на охлаждающие элементы в искусственно замороженных породах. При решении прикладных вопросов проектирования замораживающих колонок и их функционирования используются в основном инженерные методики и накопленный опыт.

При строительстве стволов по заданной толщине ледопородного ограждения подбирается температурный режим замораживания, зависящий от свойств породного массива. Одна из причин аварий при замораживании — различная горизонтальная деформация ледопородного ограждения на границах слоев с разными теплофизическими свойствами [1–5].

Расчетная схема заморзания массива предложена в [6, 7]. Промерзающий слой последовательно переходит в одну из следующих стадий: начального заморзания $T_{\text{п}} > T > T_3$; активного промерзания и пучения $T_{\text{нп}} > T > T_{\text{кп}}$; дальнейшего охлаждения $T_{\text{кп}} > T > T_{\text{сж}}$; морозной усадки $T_{\text{сж}} > T > T_{\text{к}}$. Пример распределения температуры в ледопородном ограждении на основании эксперимента [7]:

- в центре $T = T_{\text{к}}$ — температура замораживающей колонки – 20 °С;
- далее $T = T_{\text{сж}}$ — температурная граница морозной усадки – 15 °С;
- далее $T = T_{\text{кп}}$ — температура конца пучения – 8 °С;
- далее $T = T_{\text{нп}}$ — температура начала пучения – 2 °С;
- далее $T = T_3$ — температура заморзания 0 °С;
- далее $T = T_{\text{п}}$ — исходная температура породы + 10 °С.

В диапазонах этих температур меняются физико-механические и теплофизические свойства грунтов, что связано с охлаждением и фазовым переходом при замерзании влаги. По данным ряда авторов [2, 3, 6, 7], процесс морозного пучения совершается в слое породы на стадии активного промерзания $T_{\text{нп}} > T > T_{\text{кп}}$. Границы такого диапазона температур для разных пород меняются в широких пределах и зависят от плотности, дисперсности, скорости промерзания, водонасыщенности. Основные требования к выбору режимов замораживания, прохождению выработки и строительству крепи, последующему оттаиванию основаны на инженерных подходах [8 – 10].

Современные расчетные модели с оценкой напряженно-деформированного и температурного состояния разрабатываются прежде всего для исследования образцов различного типа грунтов при замораживании [11]. Эти модели достаточно сложные и на современном этапе трудно применимы. Численное моделирование указанных процессов сосредоточено на решении температурных задач с целью оценки ледопородного ограждения и сроков его создания [12 – 15].

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА И ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Схема расчета состоит из серии этапов, охватывающих изменяющиеся во времени температурные процессы и напряженно-деформированное состояние с учетом измерения самой расчетной области. Естественно, что при таком подходе каждый из этапов проработан настолько, насколько это целесообразно при решении практических задач.

В силу симметричности расположения охлаждающих элементов и предположения об однородности и изотропности породного массива рассматривался сектор породного массива с углом $\theta = \pi / N$ (N — количество замораживающих скважин). Границы сектора проходили через центр скважины и через биссектрису угла между центрами скважин, радиус сектора в расчетах $R = 30$ м (рис. 1). Глубина расположения рассматриваемой части горизонтального сечения породного массива учитывалась заданием соответствующего горного давления σ_r ($r = R$) $= -\gamma H$. На прямолинейных границах сектора формулировались условия симметрии для температуры и перемещений: $\partial T / \partial n = 0$, $U_n = 0$, где n — нормаль к границе $\theta = 0$ и $\theta = \pi / N$.

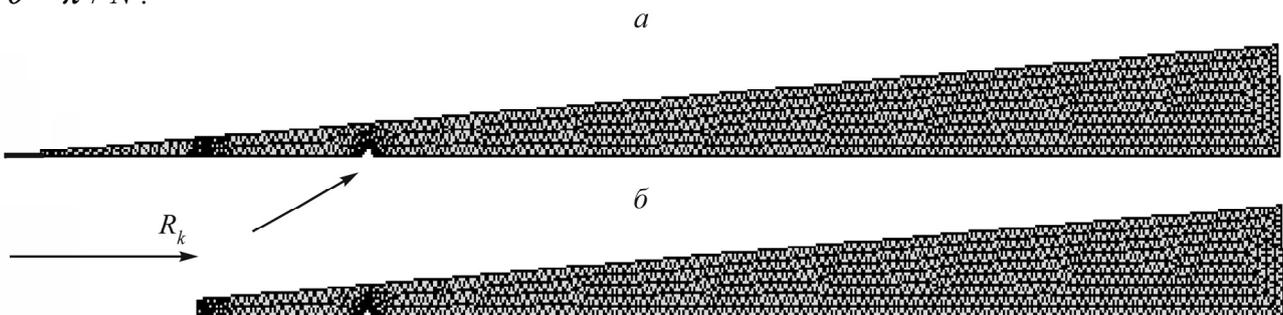


Рис. 1. Пример расчетной области с дискретизацией на конечные элементы до (а) и после (б) прохождения вертикальной выработки: стрелкой указано расположение замораживающей камеры; R_k — радиус пройденной выработки

Моделирование осуществляется как последовательный расчет этапов, при этом все переменные (температура, напряжения, деформации и пр.) сохраняются, изменяются и влияют на дальнейшие процессы. Получаемые в расчете поля напряжений отражают историю всех температурных изменений, а такжехождение выработки и создание бетонной крепи. Выделены следующие этапы:

1) формирование ледопородного ограждения: проводится расчет процесса замораживания и соответствующего изменения напряженного состояния в окрестности охлаждающих скважин;

2) прохождение вертикальной выработки радиуса $R_k = 4.5$ м и возведение бетонной крепи толщиной 0.5 м (предполагается, что время возведения крепи составляет 1–2 сут);

3) строительство ствола на других глубинах и создание кейлькранцевой зоны;

4) размораживание породного массива после завершения строительства ствола.

В расчетах использовалась схема замерзания массива, представленная в [3], но для значения температуры замораживающей колонки $T_k = -35$ °С. Замораживающая колонка учитывалась в расчетной схеме в виде круговой полости радиуса 73 мм, на границе которой задана температура, изменяющаяся во времени.

Расчеты проведены для горизонтальных разрезов в терригенно-карбонатной (–83 м) и в соляно-мергельной толще (–236 м). Принято, что проходка ствола начинается после 6 месяцев (183 сут) работы охлаждающих колонок со средней скоростью 1 м/сут, поэтому начало второго этапа для уровня –83 м происходит на 266-е сутки, а для уровня –236 м — на 419-е сутки. Таким образом, второй и третий этапы для рассматриваемых уровней существенно отличаются как по распределению температуры (зонам ледопородного ограждения), так и по влиянию прохождения выработки и создания бетонной крепи на напряженное состояние.

Кейлькранцевая зона находится на уровне –290 м, проходка до которого с учетом проведения специализированных работ составляет еще ~90 сут, после чего начинается четвертый этап. Время начала этапа оттаивания ~509 сут с начала отсчета времени.

Температура замораживания грунтовых вод в терригенно-карбонатной толще принята –7 °С, в соляно-мергельной толще — –21 °С. В режиме оттаивания температура теплоносителя в колонках растет приблизительно на 1 °С в сутки, изменяясь от –35 до +35 °С в течение 70 сут.

К основным теплофизическим характеристикам замороженных пород, необходимым при расчете процесса искусственного замораживания, относятся плотность массива ρ , коэффициент теплопроводности K , удельная теплоемкость c . К характеристикам, определяющим напряженно-деформированное состояние при замораживании, относятся модуль упругости E , предел прочности $\sigma_{сж}$, коэффициент теплового расширения α , относительная деформация морозного пучения ε_{fn} . В таблице приведены некоторые параметры, которые используются в расчетах, выполненных методом конечных элементов в пакете ANSYS [16].

Параметры породного массива и бетона

Массив / бетон	K , кКал/(ч·м·К)	c , Дж/(кг·К)	E , ГПа	$\sigma_{сж}$, МПа	ρ , кг/м ³	α , 1/°С	ε_{fn}
–83 м, терригенно-карбонатные породы	1.50 (норма) 1.80 (заморозка)	920	10	40	2100	$0.8 \cdot 10^{-5}$	0.027
–236 м, соляно-мергельная толща	0.85 (норма) 1.50 (заморозка)	920	5	23	2100	$1.0 \cdot 10^{-5}$	0.014
Бетон	1.50 (норма)	850	15	30	2500	$1.5 \cdot 10^{-5}$	

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Сечение в соляно-мергельной толще, глубина –236 м. Результаты расчета температуры по радиусу r вглубь массива на первом этапе представлены на рис. 2а для первого месяца (кривая 1), трех месяцев (кривая 2), шести месяцев (кривая 3) и 419 сут (кривая 4).

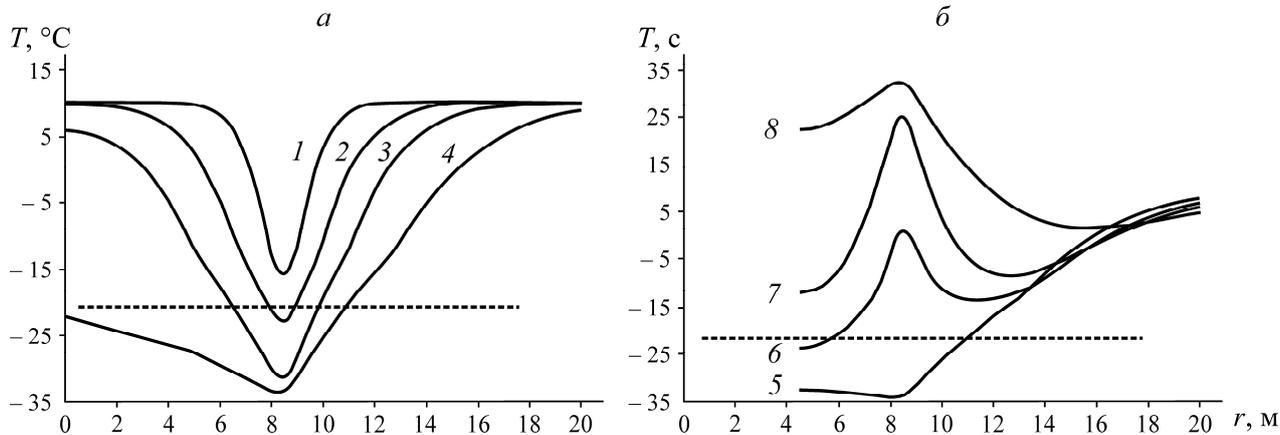


Рис. 2. Радиальное распределение температуры T в породном массиве (отм. –236 м) от начала замораживания до проходки выработки (а) и в течение строительства ствола до процесса оттаивания в течение года (б). Пунктирная линия — температура замерзания в соляно-мергельной толще

Внутренний и внешний радиус промерзания для первого месяца — нет, третьего месяца — 7.8–9.0 м, шестого месяца — 6.6–9.9 м, 419 сут — 0–10.8 м. Следовательно, ширина зоны промерзания для первого месяца — 0 м, третьего — 1.2 м, шестого — 3.3 м, 419 сут — 10.8 м.

На рис. 2б представлено распределение температуры на последующих этапах: кривая 5 — 509 сут, начало оттаивания; кривая 6 — 509 сут + 3 мес, кривая 7 — 509 сут + 5 мес, кривая 8 — 509 сут + 12 мес. Максимальное понижение температуры достигается к началу процесса оттаивания (509 сут) в области между бетонной крепью и охлаждающими элементами. Уже через три месяца после оттаивания температура повышается до уровня замораживания. При дальнейшем оттаивании наблюдаются существенные изменения температуры в области между бетонной крепью и радиусом 12–13 м.

Радиальные напряжения, вызванные расширением пород при замораживании и далее в процессе оттаивания, показаны на рис. 3 (обозначения аналогичны рис. 2).

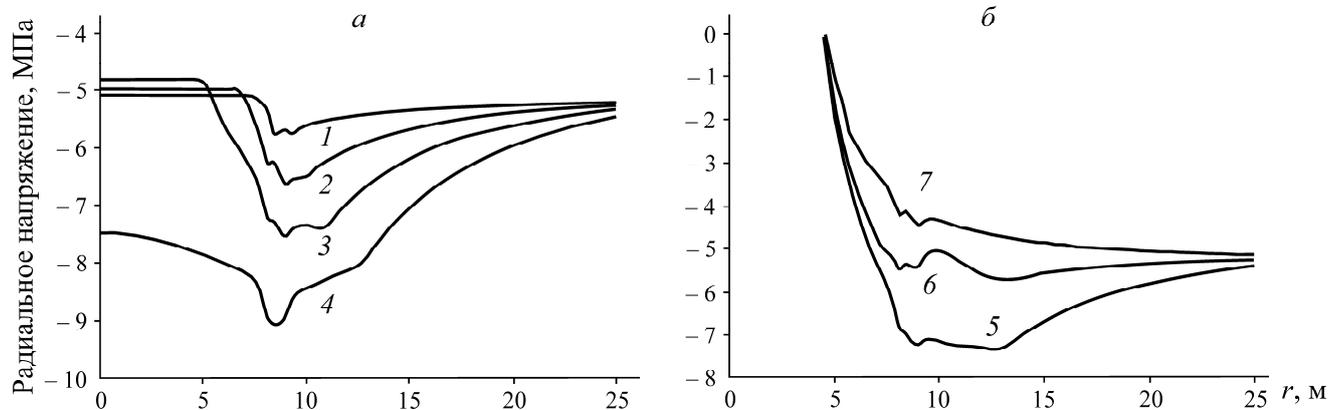


Рис. 3. Распределение радиальных напряжений в породном массиве (отм. –236 м) от начала замораживания до проходки выработки (а) и в течение строительства ствола до процесса оттаивания в течение года (б)

Сжимающие радиальные напряжения достигают максимума 9 МПа вблизи области расположения охлаждающих колонок, к началу прохождения выработки превышают горное давление в 1.7 раза. После создания выработки происходит разгрузка, на время начала оттаивания максимум напряжения снижается до 7.3 МПа. Давление на бетонную крепь составляет 1.2–2.0 МПа. После пяти месяцев оттаивания радиальное напряжение изменяется незначительно, поэтому на рис. 3б, в отличие от рис. 2б, кривая 8 не показана.

Окружные напряжения, вызванные расширением пород при замораживании и далее в процессе оттаивания, приведены на рис. 4 (обозначения аналогичны рис. 2).

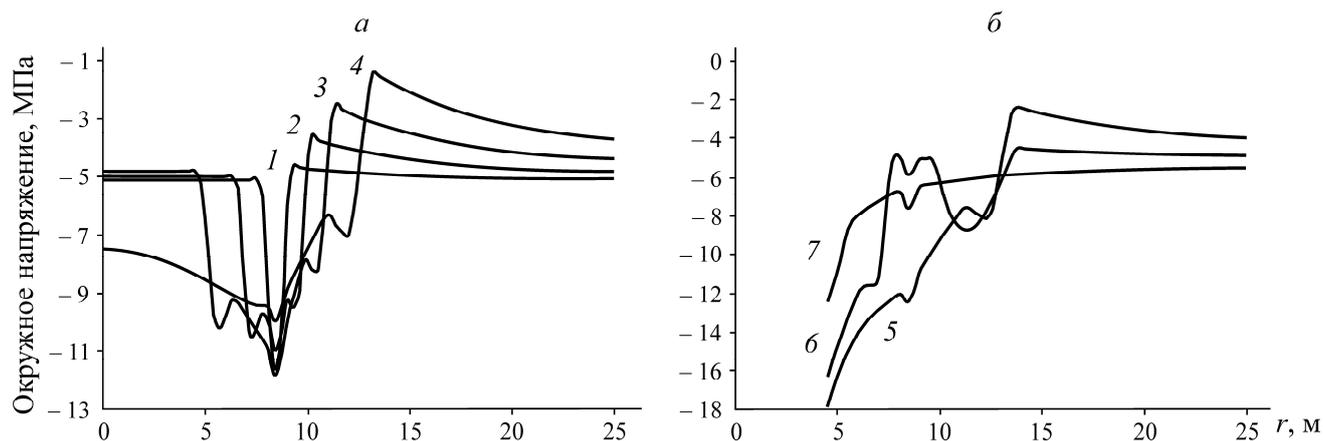


Рис. 4. Распределение окружных напряжений в породном массиве (отм. –236 м) от начала замораживания до проходки выработки (а) и в течение строительства ствола до процесса оттаивания в течение года (б)

На этапе замораживания до прохождения вертикальной выработки максимальные окружные напряжения наблюдаются вблизи охлаждающих колонок, достигая 12 МПа. При радиусах более 10 м они становятся меньше горного давления (по абсолютной величине). Это происходит вследствие перехода породного массива из замороженного состояния с сильным пучением при $r < 10.8$ м (рис. 1а) к просто охлажденному состоянию. Окружное сжатие превышает горное давление в 2.3 раза.

Окружные напряжения, в отличие от радиальных, достигают максимума на начало процесса оттаивания 17.8 МПа (рис. 4б, кривая 5). Сильная немонотонность кривой 6 объясняется большими градиентами температурного поля на этапе оттаивания (рис. 2б). Окружное сжатие превышает горное давление в 3.4 раза. Зоны максимального сжатия расположены между бетонной крепью и охлаждающими элементами. После пяти месяцев оттаивания окружные напряжения меняются незначительно.

Сечение в терригенно-карбонатной толще, глубина –83 м. Результаты расчета температуры на первом этапе представлены на рис. 5а для первого месяца (кривая 1), трех месяцев (кривая 2), шести месяцев (кривая 3) и 266 сут (кривая 4). Внутренний и внешний радиус промерзания для первого месяца равен 7.5, 9.6 м, третьего — 5.7, 10.5 м, шестого — 2.4, 12.0 м, 266 сут — 0, 12.9 м. Следовательно, ширина зоны промерзания для первого месяца 2.1 м, третьего — 4.8 м, шестого — 9.6 м, 419 сут — 12.9 м. На рис. 5б показано распределение температуры на последующих этапах: кривая 5 — 509 сут, начало оттаивания; кривая 6 — 509 сут + 3 мес, кривая 7 — 509 сут + 5 мес, кривая 8 — 509 сут + 12 мес. На момент прохождения выработки температура вынимаемого породного массива $-15 \div -23$ °С, тогда как соответствующий диапазон температур для отметки –236 м составляет $-23 \div -28$ °С из-за различных сроков прохождения выработки на разных глубинах.

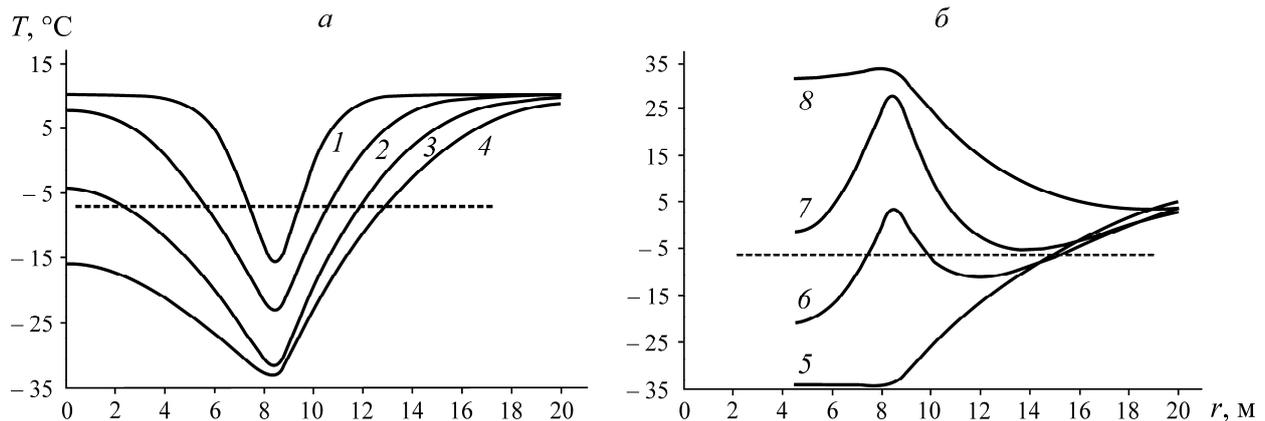


Рис. 5. Распределение температуры в породном массиве (отм. -83 м) от начала замораживания до проходки выработки (а) и в течение строительства ствола до процесса оттаивания в течение года (б). Пунктирная линия — температура заморзания в соляно-мергельной толще

Глубина промерзания к началу оттаивания составляет 15 м . После пяти месяцев оттаивания породный массив полностью выходит из замороженного состояния, а к 12 месяцам область породного массива с температурой, превышающей природный уровень (ориентировочно 10°C), достигает $r = 13 \text{ м}$.

Радиальные напряжения, вызванные расширением пород при замораживании и далее в процессе оттаивания, отображены на рис. 6 (обозначения аналогичны рис. 5). Сжимающие радиальные напряжения достигают максимума 5.6 МПа вблизи области расположения охлаждающих колонок, к началу прохождения выработки превышают горное давление в 3.1 раза. После создания выработки происходит разгрузка, на время начала оттаивания давление максимум снижается до 5.0 МПа . Давление на бетонную крепь составляет от 0.4 до 1.5 МПа . После пяти месяцев оттаивания радиальное напряжение изменяется незначительно.

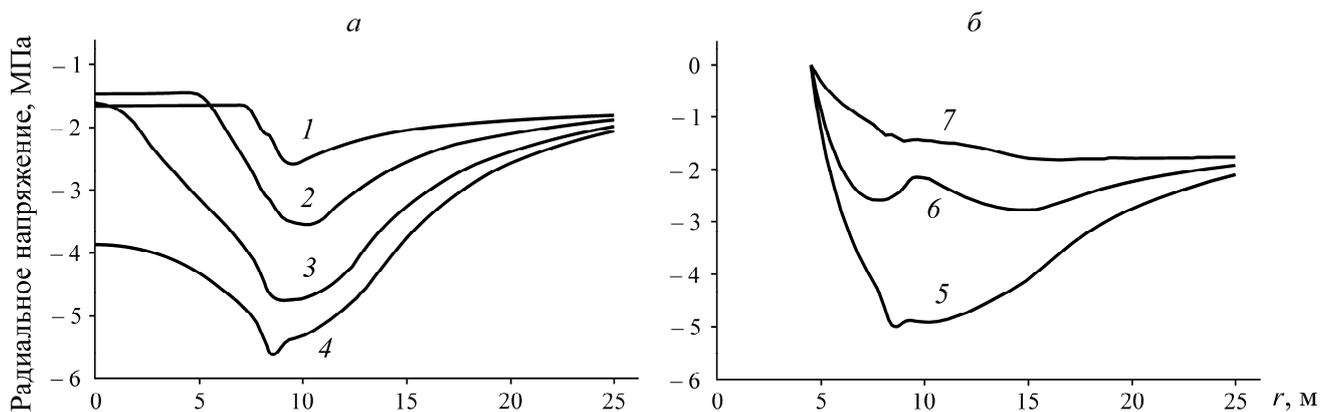


Рис. 6. Распределение радиальных напряжений в породном массиве (отм. -83 м) от начала замораживания до проходки выработки (а) и в течение строительства ствола до процесса оттаивания в течение года (б)

Окружные напряжения, вызванные расширением пород при замораживании и далее в процессе оттаивания, показаны на рис. 7 (обозначения аналогичны рис. 5). На этапе замораживания до прохождения вертикальной выработки максимальные окружные напряжения наблюдаются вблизи охлаждающих колонок, достигая 8 МПа . При радиусах более 12 м они становятся

меньше горного давления (по абсолютной величине). Породный массив из замороженного состояния с сильным пучением при $r < 12.9$ м (рис. 5а) переходит к просто охлажденному состоянию. Превышение окружного сжатия над горным давлением составляет 2.3 раза, что характерно и для уровня –236 м (рис. 4а).

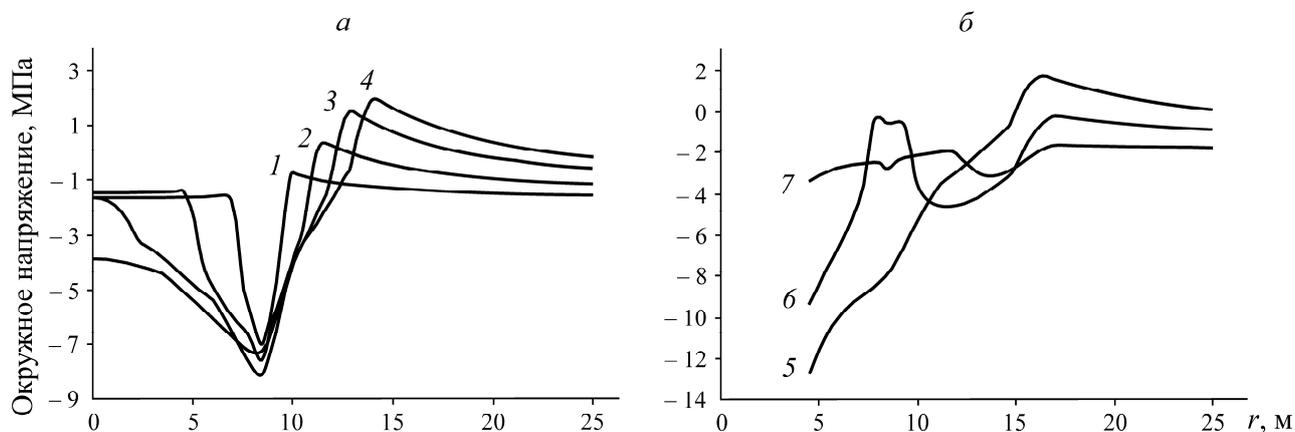


Рис. 7. Распределение окружных напряжений в породном массиве (отм. –83 м) от начала замораживания до проходки выработки (а) и в течение строительства ствола до процесса оттаивания в течение года (б)

Окружные напряжения достигают максимума на начало процесса оттаивания (рис. 6б, кривая 5) 12.7 МПа. Наблюдается (как и для уровня –236 м, рис. 4б) сильная немонотонность кривой 6, объясняемая большими градиентами температурного поля на этапе оттаивания (рис. 5б). Превышение окружного сжатия над горным давлением составляет 7.1 раза. Зоны максимального сжатия расположены между бетонной крепью и охлаждающими элементами. После пяти месяцев оттаивания окружные напряжения стабилизируются.

ВЫВОДЫ

Наблюдается значительное различие динамики распределения температур в породном массиве на разных глубинах вертикальной выработки, вызванное как различным временем охлаждения, так и существенно отличающимися физико-механическими свойствами пород. Очевидно, что одинаковый режим функционирования охлаждающих колонок при замораживании и оттаивании для всех уровней является неоптимальным, что приводит к дополнительным затратам энергии.

В терригенно-карбонатной толще при пороге замерзания -7 °С достаточная температура охлаждающих колонок -25 °С. После сооружения водоизоляционной и несущей крепи эта температура может еще повышаться. Положительная температура колонок в режиме принудительного оттаивания после 3–5 месяцев может быть несколько снижена. Аналогичный вывод по режиму оттаивания сделан и для соляно-мергельной толщи на уровне –236 м.

Расчетные значения радиальных и окружных напряжений показывают, что в случае обеспечения равномерного по охлаждающим элементам замораживания уровни напряжений не являются критическими ни для породного массива, ни для бетонной крепи. Проблемы с целостностью охлаждающих колонок могут возникать на границах слоев породного массива с резко отличающимися механическими и теплофизическими свойствами.

Результаты исследования иллюстрируют возможности предлагаемого подхода, который применим как при проектировании режимов искусственного замораживания и оттаивания в условиях проходки, так и при дальнейшей оценке прочности крепи ствола в процессе его эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишедченко О. А. История развития способа искусственного замораживания пород // ГИАБ. — 2010. — С. 226–231.
2. Роман Л. Т., Царапов М. Н., Котов П. И., Волохов С. С., Мотенко Р. Г., Черкасов А. М., Штейн А. И., Костоусов А. И. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. — М.: Университетская книга, 2018. — 188 с.
3. Насонов И. Д., Шуплик М. Н. Закономерности формирования ледопородных ограждений при сооружении стволов шахт. — М.: Недра, 1976. — 287 с.
4. Трест “Шахтспецстрой”. 65 лет деятельности и развития специальных способов проходки шахтных стволов. — М.: ООО “РПЦ Офорт”, 2008. — 346 с.
5. Тарасов В. В., Пестрикова В. С., Русаков М. И. Жизненные циклы комплекса сооружений шахтных стволов Верхнекамского месторождения. — Новосибирск: Наука, 2021. — 232 с.
6. Перетрухин Н. А. Сила морозного выпучивания фундаментов // Морозное пучение грунтов и способы защиты сооружений от его воздействия. — М.: Транспорт, 1967. — С. 25–54.
7. Мишедченко О. А. Разработка методики моделирования формирования напряженного состояния ледопородных ограждений при строительстве стволов в условиях проявления пучения пород // ГИАБ. — 2007. — С. 123–128.
8. Ольховиков Ю. П. Крепь капитальных горных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра, 1984. — 238 с.
9. Казикаев Д. М., Сергеев С. В. Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. — М.: Горн. кн., 2011. — 244 с.
10. Трупак Н. Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве. — М.: Недра, 1974. — 278 с.
11. Желнин М. С., Прохоров А. Е., Костина А. А., Плехов О. А. Экспериментальное и теоретическое исследование механических деформаций в промерзающем влагонасыщенном грунте // Вестн. ПНИПУ. Механика. — 2019. — № 4. — С. 19–28.
12. Семин М. А., Богомяков А. В., Левин Л. Ю. Теоретический анализ динамики ледопородного ограждения при переходе на пассивный режим замораживания // Зап. горн. ин-та. — 2020. — Т. 243. — С. 319–328.
13. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 172–184.
14. Левин Л. Ю., Семин М. А., Паршаков О. С. Математический метод прогнозирования толщины ледопородного ограждения при проходке стволов // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 154–161.
15. Федорова Л. Л., Куляндин Г. А., Саввин Д. В. Исследования геокриологических параметров массива горных пород для прогнозирования развития негативных криогенных процессов // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 183–192.
16. Басов К. А. ANSYS для конструкторов. — М.: ДМК Пресс, 2009. — 248 с.

*Поступила в редакцию 29/III 2022
После доработки 04/IX 2022
Принята к публикации 21/IX 2022*