

Семин М.А., Левин Л.Ю.

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИСКУССТВЕННОГО
ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПОРОД
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ШАХТНЫХ
СТВОЛОВ**

Москва
Научный мир
2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Статический расчет	9
1.1. Внешняя нагрузка на ЛПО	10
1.2. Расчет на прочность	14
1.3. Расчет на ползучесть	21
1.4. Внутренняя граница ЛПО	23
1.5. ЛПО после возведения передовой бетонной крепи	25
Глава 2. Теплотехнический расчет	27
2.1. Расположение замораживающих скважин	29
2.2. Теплообмен в замораживающих колонках	33
2.3. Теплоперенос в массиве горных пород	40
2.4. Время замораживания пород	46
2.5. Холодопроизводительность замораживающей станции	51
2.6. Средняя температура ЛПО	53
2.7. Поддержание толщины ЛПО	55
Глава 3. Сопряженный термогидромеханический расчет	60
3.1. Термогидромеханическая модель искусственного замораживания пород	63
3.1.1. Используемые допущения	64
3.1.2. Математическая постановка задачи	66
3.2. Аэрологические процессы в строящемся стволе	72
3.3. Возможности упрощения полной термогидромеханической модели	74

3.3.1. Физические процессы	74
3.3.2. Геометрическая область	78
Глава 4. Исследование взаимосвязи тепловых и механических полей	80
4.1. Пучение и выпирание замороженных пород.....	81
4.1.1. Миграция поровых вод от фронта фазового перехода	82
4.1.2. Выпирание замороженных пород.....	82
4.2. Температурные зависимости прочностных свойств пород	88
4.2.1. Случай бесконечной высоты заходки	90
4.2.2. Случай конечной высоты заходки	99
4.3. Температурные зависимости реологических свойств пород	104
4.3.1. Модификация классической формулы Вялова.....	105
4.3.2. Учет вертикальной нагрузки на ЛПО	115
4.4. Рекомендации к проведению статического расчета ЛПО	121
Заключение.....	123
Приложения	125
П.1. Конечно-разностная схема для расчета нестационарного теплопереноса в горизонтальном слое пород	125
П.2. Конечно-разностная схема для расчета упруго-пластического деформирования ЛПО.....	132
Литература	139

ПРЕДИСЛОВИЕ

Искусственное замораживание грунтов и горных пород является одним из наиболее распространенных специальных способов строительства подземных сооружений в сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях. Под сложными гидрогеологическими условиями чаще всего понимается наличие проницаемых и неустойчивых водонасыщенных пород, пльвунных отложений, а также наличие устойчивых водонасыщенных пород, способных обеспечить ожидаемый водоприток в строящееся подземное сооружение в объеме, препятствующем его строительству [12].

Применительно к проходке шахтных стволов искусственное замораживание грунтов и горных пород используется для создания ледопородного ограждения (ледопородной завесы) вокруг запроектированной горной выработки. Для этого по контуру проектируемого ствола бурятся скважины, в которые опускаются замораживающие колонки. Далее применяется одна из двух основных схем замораживания: рассольная или безрассольная [25, 39, 51]. При использовании рассольной схемы замораживания по замораживающим колонкам, оборудованным питающими трубами, осуществляется циркуляция хладоносителя (рассола) с некоторой поддерживаемой отрицательной температурой (как правило, в диапазоне от -20 до -50°C). При использовании безрассольной схемы осуществляется испарение сжиженных газов непосредственно в замораживающих колонках без промежуточного хладоносителя. При этом в качестве хладагента используют жидкий азот, пропан, фреон, аммиак. В результате породный массив вокруг замораживающих колонок постепенно охлаждается, а содержащаяся в его порах вода кристаллизуется. По истечении некоторого времени вокруг замораживающих колонок образуются одиночные ледо-

породные цилиндры, которые в дальнейшем смыкаются, образуя сплошное ледопородное ограждение (ЛПО). Последнее служит для предотвращения поступления подземных вод в строящуюся горную выработку до возведения тубинговых колонн и герметизации стыков между ними, а также для уменьшения деформаций незакрепленных стенок породного массива до возведения постоянной крепи.

Решение о начале проходки шахтного ствола принимается после того, как ЛПО достигает требуемой толщины, имеет сплошность по всему круговому контуру и всей глубине, а средняя температура ЛПО не превышает заданной величины. Перечисленные параметры являются основными параметрами ЛПО, а их правильное и научно обоснованное определение обеспечивает быстрое и безаварийное строительство стволов шахт [23].

Таким образом, при организации искусственного замораживания пород перед горными предприятиями встает два основных вопроса: какой должна быть толщина ЛПО, достаточная для укрепления стенки строящегося ствола и предотвращения поступления в него подземных вод, и как быстро она будет достигнута с применением тех или иных охлаждающих устройств. Решение этих двух вопросов достигается на практике за счет проведения статического и теплотехнического расчетов ЛПО. Суть этих двух видов расчета ЛПО описана в главах 1 и 2 настоящей книги. В этих главах также сделан обзор применяемых сегодня на практике методов и формул для определения толщины ЛПО и времени ее достижения.

Как правило, статический и теплотехнический расчеты ЛПО проводятся раздельно. Сначала делается статический (или механический) расчет, в ходе которого из решения задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) в породах определяются требуемые толщины ЛПО для всех водоносных и неустойчивых слоев в интервале замораживания, а затем выполняется теплотехнический расчет, в результате которого из расчета теплораспределения в массиве замораживаемых пород определяется время достижения требуемых толщин ЛПО во всем интервале замораживания, а также холодильная мощность замораживающей станции. При этом механические и теплофизические процессы, происходящие в породах, рассматриваются без учета их взаимосвязи. В то же время, по оценкам, сделанным в классических советских трудах [45, 47], а также по

оценкам современных исследователей в механике [10, 63], мерзлото-
ведении [65, 72, 79, 83] и подземном строительстве [58, 77] известно,
что НДС замораживаемого породного массива может существенно
зависеть от протекающих в нем теплофизических (в том числе гидро-
динамических) процессов. Помимо этого, прочностные свойства
замороженных пород сильно зависят от температуры [79, 81]. В свою
очередь, измененное поле напряжений в породном массиве может
приводить к изменению его влажности, кривой замерзания поровых
вод, что прямым образом влияет на теплотехнический расчет.

Для того, чтобы определить и проанализировать все возможные
механизмы взаимосвязи механических и теплофизических процессов,
в главе 3 сделана общая постановка связанной термогидромеханической
(ТГМ) модели искусственно замораживаемых пород, включающей
в себя также тепломассоперенос в замораживающих колонках
и в строящемся шахтном стволе. В связанной ТГМ-модели выделе-
но несколько субмоделей (термодинамическая, гидродинамическая,
механическая и аэрологическая), а также физические процессы, по-
парно связывающие эти субмодели. Предложен подход, согласно
которому при слабой выраженности физических процессов, обуслав-
ливающих связь двух субмоделей, данные субмодели могут считаться
не связанными, а соответствующие расчеты параметров заморажива-
емых пород могут проводиться независимо друг от друга.

В главе 4 настоящей книги сделана попытка проанализировать
различные физические механизмы взаимосвязи тепловых и механи-
ческих полей в замораживаемом массиве горных пород. Рассмотрены
известные оценки для анализа изменения НДС в замораживаемом
массиве при расширении замерзающей поровой воды. Рассмотрено
влияние криогенного течения и морозного пучения на изменение
НДС пород, влияние неоднородности температуры на распределение
прочностных и реологических свойств в объеме ЛПО и как следствие
- на результирующую толщину ЛПО. Определены ситуации, когда
статический расчет толщины ЛПО может проводиться независимо от
теплотехнического расчета.

В целом книга преимущественно посвящена вопросам выбора
моделей и расчетных методов при определении проектных толщин
ЛПО и динамики их роста. Технологические вопросы проекти-
рования систем замораживания, мониторинга и контроля состояния

замороженного массива в этой книге не рассматриваются. Также в ней практически не обсуждаются вопросы, связанные с влиянием фильтрации подземных вод на формирование ЛПО. Методология численного расчета термогидравлических задач искусственного замораживания, по мнению авторов, на сегодня достаточно хорошо проработана в [4, 22, 23, 34, 37, 50, 51, 73, 74].