

УДК 622.25:551.34

O.A. Мишедченко

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ПРИ
СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТВОЛОВ В УСЛОВИЯХ
ПРОЯВЛЕНИЯ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ПОРОД**

Значительное удорожание и увеличение сроков строительства вертикальных стволов в значительной мере обусловлено постоянно растущим объемом проходки вертикальных выработок в сложных гидрогеологических условиях с применением специальных способов.

Доминирующими способами стабилизации пород являлись водопонижение и искусственное замораживание – суммарный удельный вес в общем объеме проходки специальными способами 94,3 %.

Целью искусственного замораживания является создание вокруг будущей выработки шахтного ствола временной защитной завесы из мерзлой водонасыщенной породы, предохраняющей выработку от прорыва подземных вод, поэтому ледопородное ограждение можно считать искусственно возводимой водоупорной конструкцией.

Эффективность работы такой конструкции в сложных горно-геологических условиях зависит от правильности выработанных проектных решений, безаварийно проведенных работ подготовительного цикла, бесперебойной работы замораживающего комплекса в целом и герметичности замораживающих колонок в частности, от способа

проходки и крепления ствола по замороженным породам.

На сегодняшний день ледопородные ограждения (ЛПО) рассчитывается в два этапа [2]: определяется толщина ЛПО по прочности на действие горного давления и далее подбирается температурный режим замораживания для формирования определенной на первом этапе толщины с выработкой конструктивного решения расположения замораживающих скважин.

Анализ опыта работы СУ-29 треста ГПР-2, ведущего работы по замораживанию в г. Москве, показывает, что одной из основных причин осложнений и аварий в процессе искусственного замораживания грунтов в подземном строительстве является образование в ледопородном ограждении внутренних напряжений в результате развития деформаций морозного пучения. Рабочая схема формирования температурного режима породы в ЛПО.

К настоящему времени в целом проблема морозного пучения (МП) относилась целиком к грунтам и его воздействию на фундаменты сооружений. Формирование температурного режима породы в ЛПО происходит в результате сложного взаимодействия процессов переноса тепла в системе "замораживающие колонки -

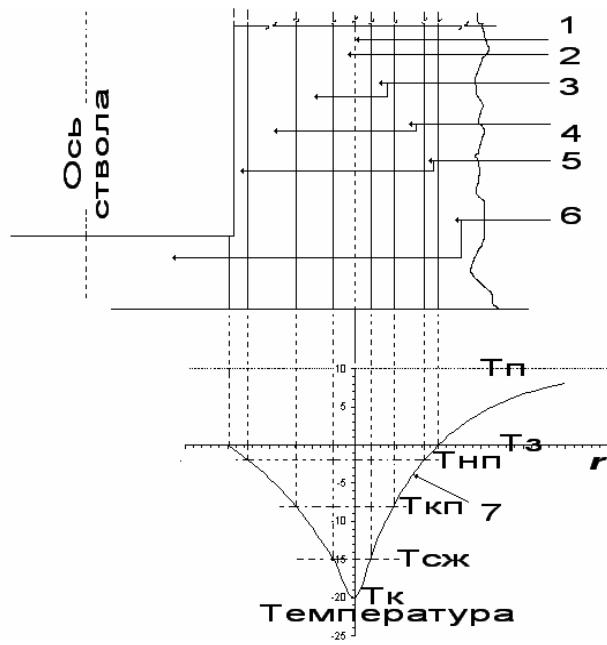


Рис. 1. Условная схема расположения в сечении ЛПО слоев, находящихся в разных стадиях промерзания:

1 – окружность замораживающих скважин; 2 – стадия переохлаждения (морозной усадки); 3 – стадия охлаждения; 4 – стадия активного пучения; 5 – стадия начального промерзания; 6 – зона нетронутого промерзанием массива пород; 7 – температурный профиль. T_p – температура на стенке замораживающей колонки; $T_{сж}$ – температурная граница морозной усадки; $T_{кп}$ – температура конца пучения; $T_{нп}$ – температура начала пучения; T_z – температура замерзания; T_p – исходная температура пород

го промерзания и пучения, дальнейшего охлаждения и морозной усадки. В зависимости от того, в какой стадии промерзания находится порода, в ней

происходят соответствующие "физические процессы изменения состояния и свойств" [3]. С понижением температуры, при переходе от одной стадии к другой, меняются физические, деформационные и прочностные характеристики породы.

Перед фронтом промерзания образуется зона иссушения (всасывания) [1], в которой за счет снижения влагодержания происходит усадка породы [2]. Таким образом, на стадии начального промерзания, внешние проявления процесса МП отсутствуют.

По данным ряда авторов [3 и др.] процесс МП совершается на стадии активного промерзания в слое промерзающей породы, ограниченного температурами $T_{нп}$ и $T_{кп}$ (конца пучения). МП породы обусловлено возникновением и ростом массивных включений льда (линз, прослоек и т.п.). Согласно работе [3 и др.] значения

"массив горных пород" и переноса влаги в системе "ЛПО – окружающий массив" [2].

Рассмотрим формирование температурного режима породы в ЛПО, следуя работе [3] применительно, однако, не к основаниям сооружений, а к предмету нашего исследования – ледо-породного ограждения (ЛПО).

При оформлении ЛПО фронт промерзания постепенно, с увеличением глубины промерзания продвигается от стенок замораживающих колонок вглубь массива. Анализируя приведенные работы представляется целесообразным отразить полученные там результаты в виде условной схемы промерзания, подобной схеме работы [3] (рис. 1).

Согласно этой схеме промерзающий слой породы последовательно вступает в одну из следующих стадий: начального замерзания (соответствует температуре породы в пределах от температуры замерзания T_z до температуры начала пучения $T_{нп}$), активно-

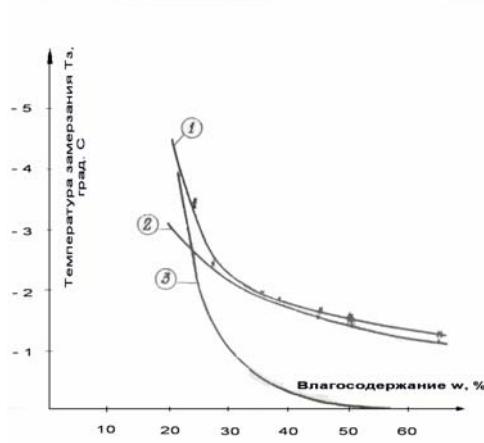


Рис. 2. Температура замерзания породы в зависимости от влажности [4]: 1 – лабораторные испытания породы нарушенной структуры; 2 – по СНиП 2.02.01 – 83; 3 – по формуле В.И. Федорова [4]

температур $T_{\text{пп}} - T_{\text{кп}}$, а также толщина зоны МП для разных видов пород изменяются в широких пределах и зависит от целого ряда факторов (плотности и дисперсности, скорости промерзания, степени водонасыщенности, засоленности и т.д.).

Свойства пород в стадии морозного пучения

В слое породы, находящейся на стадии активного промерзания и пучения, создается сложное напряженное состояние. Резко возрастают внутренние напряжения в горизонтальном и вертикальном направлениях. По данным результатов исследований ряда авторов [4 и др.] показывают, что уже при небольших давлениях на породный образец морозное пучение снижается в результате уменьшения миграции влаги в зону промерзания. В неводонасыщенных грунтах внешним давлением иногда может даже подавляться морозное

Для определения динамики фактической глубины промерзания в работе

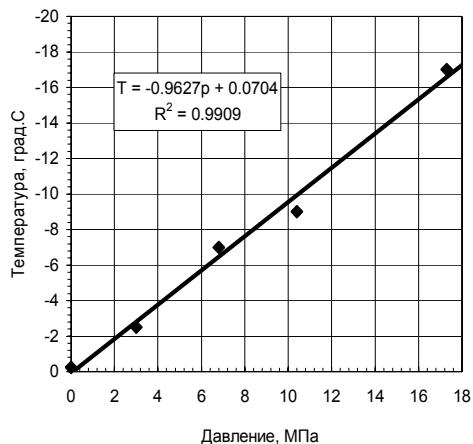


Рис. 3. Аппроксимация изменения температуры плавления льда под действием приложенного давления [7]

[4] приведены результаты лабораторного эксперимента по определению зависимости температуры замерзания грунта T_3 от влажности w и сравнение с имеющимися данными (рис. 2). Сравнивая ход кривых 1,2 и 3 делается вывод, что применение формул и таблиц СНиП 2.02.01-83 для определения T_3 дает близкие к опытным результатам, что позволяет использовать их для практических расчетов.

Внешнее давление способно понизить температуру замерзания воды в породе, вследствие чего процесс формирования ледяных прослоев протекает при более низкой температуре, чем в породах, промерзающих без нагрузки на них [7] (рис. 3).

В работе [4] получены опытные данные зависимости средней относительной деформации МП $\varepsilon_{\text{ср}}$ мягко-пластичного суглинка от величины среднего давления $\sigma_{\text{ср}}$. Эти данные обобщены в зависимость деформации пучения от внешней нагрузки следующим образом.

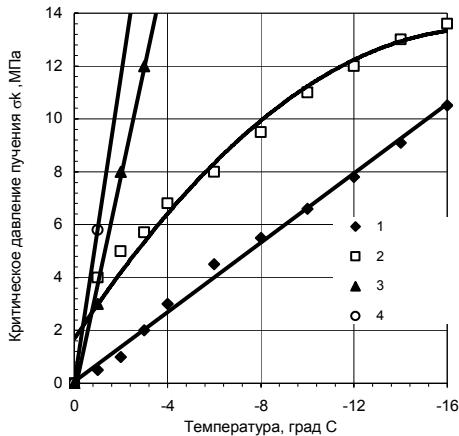


Рис. 4. Зависимости критического давления пучения σ_k для различных глин при объемном промерзании

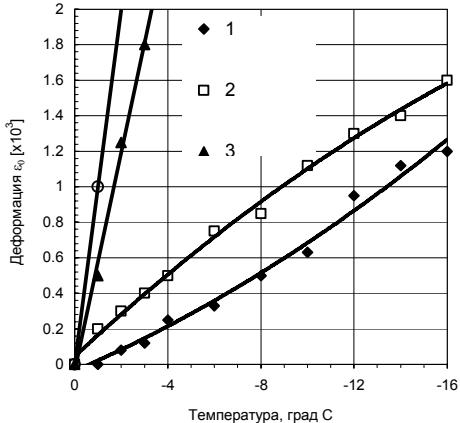


Рис. 5. Зависимости относительного пучения свободных от нагрузки глинистых пород при объемном промерзании

Такая зависимость по существу представляет собой уравнение состояния пород в состоянии морозного пучения наподобие, например, уравнений для твердых тел с внутренними напряжениями. В первом приближении зависимость ε_{cp} от σ_{cp} может быть аппроксимирована прямой линией. Тогда составляющие относительной деформации МП ε_n некоторого объема породы равны:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{zn} + \varepsilon_{xp} + \varepsilon_{up} \quad (1)$$

и определяются по формулам [4]:

$$\varepsilon_{zn} = \varepsilon_0 (1 - \sigma_{cp} / \sigma_k); \quad (2)$$

$$\varepsilon_{up} = \varepsilon_{xp} = \psi_b \varepsilon_{zn}; \quad (3)$$

где ε_0 - относительное пучение свободного от нагрузки промерзающего грунта, σ_k - условное напряжение, при котором пучение прекращается, σ_{cp} - среднее напряжение, ψ_b - коэффициент бокового пучения, равный отношению боковой деформации пучения к деформации пучения в направлении промерзания.

В этой связи важными для проведения практических расчетов пред-

ставляются зависимости величин σ_k и ε_0 от температуры. Например, для глинистых пород в работе [7] получены такие зависимости при объемном промерзании для четырех типов пород с характеристиками (1: $\rho = 21 \text{ кН/m}^3$, $w = 0,20$, $e = 0,54$; 2: $\rho = 21 \text{ кН/m}^3$, $w = 0,23$, $e = 0,54$; 3: $\rho = 20,2 \text{ кН/m}^3$, $w = 0,292$, $e = 0,73$; 4: $\rho = 19,7 \text{ кН/m}^3$, $w = 0,335$, $e = 0,82$).

Здесь ρ , w , e – плотность, степень водонасыщения и удельная пористость соответственно (рис. 4 и 5).

Как видно из формул (1-3) напряженное состояние пучащегося породного массива оказывает значительное влияние на величину пучения. Из зависимостей, приведенных на рис. 4-5 видно, что чем меньше степень водонасыщения породы, тем меньшее давление полностью исключает морозное пучение [5, 6 и пр.]

Возвращаясь к схеме рис. 1, отметим, что при понижении температуры ниже T_{kp} порода переходит в стадию охлаждения. На этой стадии в лед

превращается не замерзшая ранее связанные вода. Образующееся при этом приращение объема породы, практически полностью компенсируется температурным сжатием мерзлой породы, проявляющимся при понижении температуры [4].

При дальнейшем понижении температуры до $T_{СЖ}$ деформация температурного сжатия породы начинает преобладать над его объемным приращением. Порода переходит в стадию морозной усадки. Морозному сжатию могут подвергаться лишь близкие к стенкам замораживающих колонок слои породы с возможным возникновением трещин, направленных в тело ЛПО, из-за неизбежного возникновения растягивающих напряжений. Это будет возможно, если величина этих напряжений превысит сопротивление породы разрыву. Порода в этой стадии находит

Переход из одной стадии в другую (см. рис. 1) происходит непрерывно по мере изменения отрицательной температуры в промерзающем слое породы и постепенного продвижения фронта промерзания вглубь массива.

Данные о свойствах пород в мерзлом состоянии в зависимости от температуры (модуль упругости, прочности на сжатие и растяжение, показатели ползучести) берутся из литературных источников.

Описания процессов во времени

Процесс снижения водосодержания в единице объема w в результате ледообразования подходит под общее уравнение, описывающее разнообразные кинетические процессы. Это уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{d\eta}{dt} = f(\eta)g(w_0, T), \quad (4)$$

где $\eta = w/w_0$. (w_0 – исходное водосодержание).

Функции f и g определяются по зависимостям изменения степени водосодержания от температуры и времени, примеры которых приведены, например, в работе [2]. Этих данных пока недостаточно, поэтому в настоящее время в МГГУ проводятся исследования для более широкой номенклатуры пород

При определении температурного профиля в ЛПО теплота, выделяемая при ледообразовании, обычно учитывается только на границе ЛПО и породы в незамершем состоянии [2] в предположении, что вся влага переходит в лед. Однако в лед переходит только ее некоторая часть, другая часть влаги *переходит в лед в объеме ЛПО*

Поэтому в уравнении теплопроводности в методике учитывается объемный источник тепловыделения: скорость удельного теплообразования dR/dt . В формируемом ЛПО это возникает из-за наличия скрытой теплоты ледообразования σ . При этом.

$$R = \eta \omega \gamma_b \sigma. \quad (5)$$

где ω – пористость, γ_b – плотность воды.

Тогда уравнение теплопроводности для температуры T_m в зоне ЛПО запишется в следующем виде:

$$c_m \gamma_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m \Delta T_m + \frac{\partial R}{\partial t}. \quad (6)$$

Здесь c_m , γ_m , λ_m – удельная теплопроводность, плотность и коэффициент теплопроводности породы в ЛПО. Термические свойства полагаются независящими от напряженного состояния. Данные о зависимостях этих параметров от температуры для пород в мерзлом состоянии, а также их значения в обычном состоянии берутся из *литературных источников*.

Учитывая различное отличие в деформациях пучения, полученных в экспериментах, проведенных по "закрытой" и "открытой" схемам, к указанным уравнениям добавляется

уравнение для влагопереноса в нетронутом промерзании массиве из-за явления подсоса влаги из этой зоны в зону промерзания.

Схема определения напряженного состояния и при формировании ЛПО

Из материалов, приведенных в предыдущих разделах, построим схему определения напряженного состояния при формировании ЛПО с применением пошагового метода по времени. Она представляется следующим образом: 0 – определение напряжений от горного давления $\{\sigma_0\}$, задание температуры породы T_p ; w_0 – начальная влагоемкость при $t = 0$; 1 – определение профиля температуры T .

В результате решения совместной системы приведенных уравнений получается температурный профиль.

В термомеханической модели при промерзании породы в ЛПО общая деформация рассматривается как сумма чисто механической деформации от внешней нагрузки от горного давления и термической деформации от наличия МГ или морозной часалки

Предусматривается решение совместно термической задачи, задачи

определения внутренних напряжений и напряжений от горного давления, затем задачи ползучести. В результате последовательно уточняется температурный профиль и величина толщины ледопородного ограждения до заданной сходимости для последней величины. Как в двумерной так и в трехмерной постановках необходимо применение численных методов, в особенности метод конечных элементов.

Выводы. Рассмотрена термомеханическая модель для расчета толщины ЛПО. При определенных граничных и начальных условиях предусматривается решение задачи термовлагопереноса. Термические свойства полагаются независящими от напряженного состояния. Общая деформация рассматривается состоящей из двух составляющих: от действия горного давления и внутренняя от морозного пучения или усадки. Зависимости механических характеристик (модуль Юнга, прочности на сжатие и растяжение, показатели ползучести) от температуры берутся из литературных источников. Представлены примеры зависимостей, необходимых для построения алгоритма расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карлов В.Д. К прогнозу миграции влаги и морозного пучения грунтов. - В кн.: Механика грунтов, оснований и фундаментов. - Вып.78. Л. . 1973.
2. Насонов И.Д., Шуплик М.Н. Законоомерности формирования ледопородных ограждений при сооружении стволов шахт. - М.: Недра, 1976.
3. Перетрухин Н.А. Сила морозного выпучивания фундаментов. – В кн.: Морозное пучение грунтов и способы защиты сооружений от его воздействия. - М., Транспорт. 1967. - С.25-54.
4. Пусков В.И. Особенности морозного пучения и напряженное состояние промерзающего слоя грунта со свободной от нагрузки поверхностью // Сб. Вопросы инженерной геологии, оснований и фундаментов". - Новосибирск, 1971. - С.147-158.
5. Пусков В.И. Фундаменты железнодорожных сооружений на основании из мерзлых грунтов. - 4.1, Новосибирск, 1972, с.120.
6. Цытович И.А. Механика мерзлых грунтов. - М.: "Высшая школа", 1973. - 446с.
7. Radd F.J., Ortle D.H. Experimental pressure studies on frost heave mechanics and the growth/fusion behavior of ice // Permafrost: 2nd Int. Conf national Acad. – Washington, D.C., 1973. – pp. 377-384. ГИАБ

Коротко об авторе

Мишидченко О.А. – студентка, Московский государственный горный университет.

Рецензент кандидат технических наук, доцент В.А. Пшеничный.