

УДК 536.24

О.В. Карнач

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТА В ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА

Рассмотрены основные факторы, влияющие на тепловой комфорт в подземных сооружениях. Представлены основные расчеты по оценке фильтрационных свойств обделок. Обоснована целесообразность использования тепловых труб для обеспечения теплового комфорта в подземных сооружениях.

Ключевые слова: устойчивость массива пород, тепловой комфорт, подземные сооружения, тоннель, тепломассообмен, фильтрационные свойства, аккумуляция, холод, тепло.

Влияние термовлажностного режима на тепловой комфорт в подземных сооружениях метрополитена

Условия эксплуатации подземных сооружений характеризуются разнообразием переменных природных и техногенных факторов, взаимодействие которых создает множество комбинаций, отражающих специфику требований к способам их эксплуатации. Изменение любого из влияющих факторов может привести к нарушению не только технологического режима, но и теплового баланса в формируемой природно-технической системе «породный массив — технология — подземное сооружение».

Основными факторами, определяющими состояние этой природно-технической системы, являются термовлажностные и фильтрационные воздействия, а также воздействия внешней среды.

В настоящей работе изложен новый подход к выбору оптимального варианта проектного решения.

1. Подземное сооружение рассматривается как видоизменяемый георесурс, относящийся к классу динамических открытых управляемых

систем. Совместно с массивом горных пород подземный объект образует природно-техническую систему, динамически изменяющуюся в пространстве и во времени.

2. Для качественной оценки надежной эксплуатации подземных сооружений в работе использован анализ вида и последствий отказов тоннелей. Подобный анализ заключается в рассмотрении каждого элемента системы «массив — технология — подземное сооружение» на предмет определения вида и причин отказа элемента и прогнозирования воздействия его на всю систему. Самой распространенной и значимой негативной причиной является существенное снижение фильтрационной надежности и нарушение тепломассообмена. Целью расчетной оценки взаимодействия тоннелей с окружающей средой является выявление критических ситуаций и определения таких значений характеристик природно-технической системы «породный массив — конструкции тоннеля — содержимое тоннеля», ниже которых возникают явления, исключающие надежное функционирование подземного объекта.

Надежное состояние природно-технической системы определяется сочетанием показателей термовлажностных, фильтрационных, химических, электрохимических и биологических воздействий, исключающим появление дефектов обделок и снижение технической, технологической и эксплуатационной надежности системы.

Основным элементом окружающей среды, испытывающим термодинамические изменения от функционирования рассматриваемой системы является массив вмещающих пород. Опроецированно через массив вмещающих пород термодинамические изменения передаются на другие компоненты природной экосистемы.

Надежность состояния системы «породный массив — сооружение» во многом определяется оптимальным сочетанием параметров теплового комфорта в сооружении, оказывающего влияние на недопущение дефектов и отказов обделок, техническую и технологическую надежность системы.

На основании данных практики в данной геологической, гидро-геологической, климатической и техногенной среде существенными показателями являются: характеристики вмещающих пород; фильтрационные характеристики обделки и гидроизоляции; требования к параметрам среды внутри сооружения. Параметры среды внутри сооружения характеризуются оптимальными и допустимыми значениями температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в тоннеле.

Настоящие положения распространяются на тоннели, закладываемые на глубине от 10 м, а также на другие типы подземных сооружений за исключением теплофикационных в связи с особым характером протекания ряда процессов в последних.

При решении вопросов теплового комфорта в тоннеле оцениваются

фильтрационные свойства обделок, плотность которых исключает фильтрацию загрязненных вод в массив; фильтрационные свойства вмещающих грунтов, влияние глубины заложения тоннеля, сезонных и техногенных температур на конструкции.

Для расчетной оценки, приняты следующие характеристики пород вмещающих тоннель:

- фильтрационные (коэффициент фильтрации, пористость);
- состав пород (литология и стратиграфия, фракционный состав массива и включений в основную породу);
- влажность и консистенция грунтов;
- уровень стояния грунтовых вод;
- напор подземных вод.

Коэффициент фильтрации трещиноватых пород определен в зависимости от коэффициента трещиноватости породы и раскрытия трещин по формуле:

$$K_{фтр} = 3,3 \cdot 10^5 \cdot m_{тр}^{2,1} \cdot \delta^2, \quad (1)$$

где $m_{тр}$ — коэффициент трещиноватости (количество трещин на 1 м линии измерения; δ — раскрытие трещин).

В случае, когда тоннель проходится в массиве, сложенном слоями несвязных и водоупорных пород, водоносные горизонты могут сообщаться между собой за счет трещиноватости массива. При этом образуются подземные резервуары или водные бассейны, питаемые водными осадками на поверхности Земли, а в некоторых случаях и поверхностными водоемами.

Если в водоносных горизонтах, находящихся в пределах зоны вероятного образования водопроводящих трещин и выше тоннеля, остаточный напор воды составляет 1 м и более в горизонтах, расположенных выше зоны водопроводящих трещин в водоупорных слоях, для этих условий напор воды определяется зависимостью:

$$H_{\partial} = \frac{\sum m_{\text{гг}}}{m^3 \sqrt{K_n}}, \quad (2)$$

где $\sum m_{\text{гг}}$ — суммарная мощность прослойков глин под водоносным горизонтом, попадающим в зону ведения работ, м; $H_{\text{д}}$ — допустимый напор, м; K_n — коэффициент фильтрации пород; m — мощность вынудой породы, м.

Граничные условия для формулы (2): $\sum m_{\text{гг}} \geq 5m$.

Оценка фильтрационных свойств обделок произведена путем статистической обработки данных обследования более 10 подземных сооружений. Получено около 100 значений, обработка которых позволила получить достоверные данные о величине коэффициента фильтрации бетона вторичных обделок.

В большинстве подземных сооружений в качестве гидроизоляционной конструкции используется вторичная бетонная или железобетонная монолитная обделка.

По результатам обследования 8 тоннелей установлено, что коэффициент фильтрации изменяется по высоте вторичной обделки, при этом изменения в малой степени зависят от способа укладки бетонной смеси за опалубку.

К расчетам принят показатель коэффициента фильтрации обделки в наиболее слабой части — шельге свода.

Согласно нормативам оптимальная относительная влажность в тоннелях метрополитена должна поддерживаться на уровне 40-60%. В верхней трети тоннелей она характеризуется величинами от 60 до 90%. В этих пределах создаются условия для газовой, биологической и электрохимической коррозии бетона в основном сводовой части тоннеля.

Абсолютная влажность атмосферы тоннелей W (г/м³) складывается из влаги, являющейся результатом испарения воды $W_{\text{абс1}}$ (г/м³) с поверхности об-

делки и абсолютной влажности поступающей в тоннель вентиляционной струи $W_{\text{абсвс}}$ (г/м³).

$$W_{\text{абс}} = W_{\text{абс}}^{\text{в}} + W_{\text{абс}}^{\text{вс}}. \quad (3)$$

Сравнение принятых коэффициентов фильтрации с предельными показателями и ожидаемым водопритоком позволяют сделать вывод об уровне теплового комфорта в подземном сооружении и необходимости дополнительных водо- и теплозащитных и мероприятий.

Создание активной зоны аккумуляции холода (тепла) вокруг полости подземного сооружения

Подземные сооружения (полости), предназначенные для использования аккумулированного холода (тепла), имеют ряд недостатков:

а) разрушение пород по контуру полости в результате многократных фазовых изменений, что приводит их в негодность или требует определенных затрат на поддержание в рабочем состоянии;

б) ограниченные параметры аккумуляции холода (глубина промерзания, температура охлаждения, общая зона охлаждения), что не всегда обеспечивает заданные пределы регулирования температуры внутри сооружения. В связи с этим встал вопрос о техническом управлении формированием тепловых полей вокруг полостей (сооружений), т. е. аккумуляцией запасов холода. Это вызвало необходимость создания способов и средств управления тепловыми полями, позволяющими сохранять естественную устойчивость пород вокруг сооружения, разработки расчетных методов систем управления, позволяющих с достаточной точностью определять запасы аккумулированного холода (тепла).

При решении поставленных задач нами особое внимание было уделено

поиску и разработке технических решений, обеспечивающих:

а) сохранение высокой устойчивости подземного сооружения (полости);

б) эффективную аккумуляцию холода из атмосферного воздуха в массиве горных пород вмещающих подземное сооружение;

в) условия эффективной и регулируемой отдачи аккумулированного холода (тепла) массивом во внутрь сооружения;

г) оптимальные параметры зоны аккумуляции холода в массиве пород, окружающем подземное сооружение (полость);

д) создание средств активной теплопередачи, позволяющих осуществлять регулирование аккумуляции и отдачи холода (тепла) массивом;

е) разработку систем и способов накопления и использования зимнего атмосферного холода (тепла) для технических нужд.

При этом были учтены граничные условия решения задач - совершенство и экономическая целесообразность средств терморегулирования, способных осуществлять активную теплопередачу на десятки метров в глубь массива и из массива.

В качестве активных средств теплоотдачи нами предложены низкотемпературные фитильные тепловые трубы, теплоносителем в которых служит жидкость, обладающая малым коэффициентом теплопроводности и низкой температурой кипения.

Тепловые трубы имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными элементами систем передачи холода (тепла), таких, например, как циркуляционными теплообменниками. Тепловые трубы не имеют подвижных деталей, бесшумны, не требуют расходов энергии на перекачку теплоносителя из зоны конденсации в зону испарения, имеют небольшой вес.

Разработана система аккумуляции атмосферного холода (тепла) в подземных сооружениях, использующая принудительную подачу требуемого количества холодного атмосферного воздуха и устройства интенсивного отбора холода от воздушной струи для передачи с целью аккумуляции его в глубине массива.

Разработана рациональная схема установки теплопередающих элементов по контуру сооружения, определены возможности регулирования процесса передачи холода (тепла). Процесс регулирования, аккумуляции и использования холода (тепла) осуществляется перемещением теплопередающего элемента в скважине, увеличивая или уменьшая зоны конденсации дающего элемента в скважине, увеличивая или уменьшая зоны конденсации и испарения теплоносителя.

Общее время аккумуляции и расход холода (тепла) в зоне между рабочими участками массива (скважинами) определяется скоростью протекания следующих процессов:

а) охлаждение содержащейся в породах воды от начальной температуры до t_0 . т.е. отдачи тепла жидкой фазой воды и охлаждение ее до температуры замерзания: $q_1 = V \gamma_B t_H$ ккал.;

б) замораживание воды при 0°C , т. е. период фазового перехода вода – лед, отдача скрытой теплоты при переходе воды в лед: $q_2 = 80 \cdot V \gamma_B$, ккал.;

в) охлаждение льда от 0°C до среднего значения температуры воздушной струи: $q_3 = V \gamma_a \cdot C_l (t_0 - t_k)$ ккал.;

г) охлаждение твердых частиц породы от начальной температуры t_n до заданной t_k : $q_4 = W \gamma_r \cdot C_r (t_n - t_k)$ ккал.;

д) общее количество холода: $Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$ ккал.

Использование тепловых труб в качестве теплопередающих элементов при аккумуляции зимнего холода из ат-

мосферного воздуха является перспективным способом терморегулирования.

В теоретическом плане динамика температурного режима в зоне аккумуляции холода (тепла) представляет задачи теплопроводности массива с фазовыми превращениями при постоянном потоке на границе в связи с равномерным поступлением холода (тепла) от теплопередающих элементов.

Влияние аккумуляции холода в вмещающем подземное сооружение массиве на его устойчивость

Использование атмосферного холода (тепла) для технических нужд в хозяйственных целях приобрело большое значение в связи с постоянно растущими потребностями в холоде (тепла) и дефицитом энергии расходуемой на его производство.

Подземные полости, предназначенные для хранилищ и другого назначения, с регулируемым тепловым режимом позволяют в определенной степени упростить системы использования холода (тепла) атмосферного воздуха и сделать их экономичными, используя для этого достаточно высокие теплоаккумулирующие свойства горных пород.

Нужно отметить, что интенсивность аккумуляции холода в горных породах примерно в два раза ниже, чем последующая его отдача при теплообмене с теплым воздухом. Это обусловлено тем, что мерзлые породы имеют более высокий коэффициент температуропроводности, чем талые. Длительность же аккумуляции холода определяется размерами зоны охлаждения, количеством аккумулируемого холода, количеством и температурой атмосферного воздуха пропускаемого через сооружение (полость).

Продолжительность низких атмосферных температур в различных районах страны колеблется в широ-

ких пределах, а следовательно, резко изменяется и продолжительность аккумуляции атмосферного холода в подземных сооружениях. К тому же горные породы обладают невысокой теплопроводностью и теплопередача в них осуществляется медленно как во времени, так и в пространстве. Естественно, возникает стремление интенсифицировать процесс аккумуляции атмосферного холода в породах.

Однако интенсификация процесса аккумуляции холода в породах вызывает качественные изменения их по контуру сооружения, которые в процессе дальнейшей эксплуатации приводят к их разрушению. Качественное изменение пород постепенно распространяется в глубь массива совместно с продвижением фронта фазовых изменений.

Проведенными исследованиями нами установлено, что прочность замороженных дисперсных пород при температуре — 10 °С на 23 - 42% выше прочности льда без твердых включений и на 9-27% выше прочности сухой породы.

Определены показатели сопротивления сжатию, сдвигу и разрыву. Установлены зависимости прочностных показателей ряда дисперсных пород в диапазоне температур от -20 до +5 °С и влажности от 1,2 до 18 %. Отмечено, что в практике наиболее часто встречаются породы с естественной влажностью 3 - 5,7 %, прочность которых при изменении температуры от минус 10 °С до положительных температур понижается на 5-35 %.

При этом установлено, что дисперсные породы в указанном диапазоне температур обладают достаточно высоким коэффициентом расширения, зависящим от температуры.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что быстрая аккумуляция холода в массиве пород соз-

дает поле напряжений расширения, которое при периодическом изменении температуры поверхности контура сооружения характеризуется известным решением Паркуса.

Вследствие того что подземные сооружения (полости) являются долгосрочными, породы на их контуре подвергаются многократному замораживанию — оттаиванию с соответствующими в каждом цикле фазовыми изменениями, что создает условия морозного трещинообразования и постепенного разрушения пород по контуру сооружения. При ежегодном сохранении ореола промораживания вокруг полости в пределах 2-2,5 м и общим ореолом охлаждения 12-15 м в течение 3-5 лет происходит разрушение пород на глубину до 3,5-4 м, а сильно трещиноватых пород разрушение достигает 8-12 м, т. е. практически выходит из строя все сооружение или отдельные его части.

В то же время постепенное аккумулялирование холода способствует своевременной и достаточно быстрой миграции внутриводной воды от фронта промерзания в глубь массива, что снижает объем замерзающей воды и ослабляет влияние поля напряжений расширения. При низкой интенсивности аккумуляции холода напря-

жения расширения успевают гаситься релаксацией пород.

Исследованиями также установлено, что кристаллические породы при замораживании теряют первоначальную прочность. Так, $\sigma_{сж}$ снижается на 17—21%, а $\sigma_{раст}$ на 26—39%.

Это объясняется тем, что при охлаждении кристаллы различных минералов имеют различные коэффициенты линейного расширения, что приводит к деформации поля сцепления между кристаллами, вызывая отрыв по плоскостям их контактов.

При этом чем больше количество зерен минералов с повышенным линейным расширением, тем значительнее снижение прочности пород в целом.

В качестве защитных мер от морозного разрушения пород на контуре сооружения предусмотрены следующие технические мероприятия:

а) намораживание защитного слоя льда по контуру сооружения, способствующего исключению поверхности пород из теплообмена с воздушной средой;

б) применение теплопередающих элементов, способствующих созданию зоны аккумуляции в глубине массива, окружающего сооружение (полость);

в) применение предварительного и последующего периодического уплотнения пород по контуру сооружения растворами синтетических смол.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ельчанинов Е.А. Проблемы управления термодинамическими процессами в зоне влияния горных работ. — М.: Наука, 1989, 240 с.
2. Цидиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. — М.: Недра, 1975, 286 с.
3. Иванов Н.С. Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах. Автореф. д.д. — Минск, 1965. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Карнач О.В. — соискатель, Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru.