

На основі даних табл. 1 оцінимо величину безрозмірних параметрів з (11) і (12). Границі зміни значень цих безрозмірних параметрів наведено в табл. 2.

Підбір ґрунтових матеріалів і ВР повинен здійснюватися з урахуванням необхідності дотримання рівності між відповідними параметрами моделі та природи у випадку моделювання конкретних умов виконання робіт. Якщо ж розв'язується задача встановлення загальних закономірностей досліджуваних процесів, то значення безрозмірних величин, отриманих по параметрах моделі, повинні попадати в границі зміни відповідних безрозмірних величин, наведених у табл. 2. Крім того, рекомендується в моделі використовувати неволокнистий торф. Це пов'язано з тим, що до фізико-механічних властивостей торфів та їх деформування під навантаженням додається ще один – лінійний визначальний параметр.

1. *Зарецкий Ю. К., Гарицелов М. Ю.* Глубинное уплотнение грунтов ударными нагрузками. – М.: Энергоиздат, 1989.

2. *Menard L.* La Consolidation dynamique des sols de fondation // Annales de l'ITRTP. – № 320, Sept.

3. *Кушнир В. Я.* Консолидация неоднородных намывных оснований при глубинном виброуплотнении // Инж. геология. – 1988. – № 5.

4. *Бондар П. П., Лучко А. І.* Стенд для дослідження консолідації водонасиченого торф'яного ґрунту при дії вибуху в ньому // Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – Київ: НТУУ "КПІ": ЗАТ "Техновібух", 2000. – Вип. 4.

5. *Евгеньев И. Е., Казарновский В. Д.* Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: Транспорт, 1976.

6. *Боровиков В. А., Ванягин И. Ф.* Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. – М.: Недра, 1990.

7. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. – М.: Госиздат физ.-мат. лит., 1965.

8. *Гундарев К. А., Кравец В. Г.* Параметры взрывных работ при ликвидации просадочных свойств лессовых массивов // Использование энергии взрыва на объектах ирригационного и мелиоративного строительства в грунтах. – Киев: Наук. думка, 1976.

УДК 624.534.142

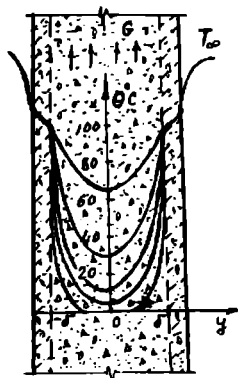
ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В КОНСТРУКЦИЯХ ШАХТНОЙ КРЕПИ ПРИ ПОЖАРЕ

Т. Рембеляк, докт.- инж. (Краковская металлургическая академия, РП)

Процес тепломасопереносу в тілі конструкції кріплення можна моделювати у вигляді витарювання потоку рідини в каналі, обрамленому проникними матрицями.

При пожаре в подземном шахтном пространстве тепловой поток омывает поверхность железобетонной крепи, высушивает и уплотняет ее, создавая поверхностный слой определенной толщины. По структуре этот слой отличается от бетона конструкции крепи и похож на плотную обшивку – матрицу, в которой за счет усадки закрываются поры и капилляры. Температурный градиент между поверхностным слоем и внутренним телом материала крепи создает движение влаги в порах внутри тела подобно тому, как это происходит в канале, заполненном водой и сыпучим материалом. Поры и стенки между порами служат для своеобразного теплопереноса. Благодаря теплопроводности материала стенки тепло передается от стенки к порам (или наоборот), изменяется механизм переноса тепла и структуры потока теплоносителя, протекают фазовые превращения внутренней влаги. Накопленная нагретая влага внутри тела превращается в водяной пар, часть которого, диффундируя на поверхность, испаряется, а часть за счет градиента температур, конденсируясь, заполняет поры и начинает двигаться внутри канала. Капиллярные силы натяжения обеспечивают равномерную насыщенность тела жидкостью поперек канала. Наружная поверхность крепи со стороны горной породы также играет роль плотной стенки канала и передает тепловой поток горной породе.

Физическая модель теплопереноса в конструкциях крепи при эндогенном пожаре показана на рисунке. Условный плоский канал шириной 2δ заполнен поровой водой, имеется стенка между порами с теплопроводностью λ . Поровая вода с удельным массовым расходом G играет роль теплоносителя. Снаружи через уплотненный слой в виде обшивки канал омывается потоком тепла от пожара с температурой T_0 или подвергается воздействию теплового потока g .



Физическая модель процесса испарения влаги в условном канале в бетоне конструкции крепи

Представляет интерес задача определения температурного состояния теплового и массового компонентов системы. Механизм теплообмена двухфазного потока внутри пронизываемых матриц можно представить в

следующем виде: при нагревании влага превращается в пар и движется сначала в виде отдельных микроструй, которые постепенно заполняют поры. Охлаждаясь в них, пар превращается в жидкость (водный раствор, растворяющий цементирующие соли). Жидкость движется в виде постепенно утоняющей микропленки, обволакивающей пылевидные частицы материала, и заполняет все сужающиеся и тупиковые поры. Под действием капиллярных сил жидкость в пленке заполняет все поперечное сечение канала, благодаря чему обеспечивается равномерная насыщенность пористой структуры. Такой режим сохраняется до полного испарения влаги.

В этом процессе отсутствует обычный кризис кипения, вызываемый появлением жидкой пленки. Тепло от нагреваемой стенки передается через пористый каркас (стенки между порами) и обволакивающую его жидкую микропленку на поверхность каркаса, где и расходуется на испарение жидкости. При чрезмерно большом термическом сопротивлении теплопроводности или плотности теплового потока от пожара температура паровой воды становится выше критической и не может существовать в жидком виде. В этом случае жидкая микропленка не смачивает пористый каркас, а сворачивается в микрокапли. Режим течения жидкости в виде обволакивающей частицы микропленки сменяется режимом течения в виде потока пара с микрокаплями. Интенсивность внутрипорового теплообмена при этом резко уменьшается, что приводит к дальнейшему повышению температуры проникаемой матрицы и распространению режима течения потока пара с микрокаплями от нагреваемой стенки вглубь канала, то есть вглубь тела материала конструкции крепи. В конечном итоге это может привести к образованию и раскрытию трещин в поверхностном слое.

Учитывая медленное изменение параметров потока вдоль условного канала и значительную протяженность области испарения по сравнению с шириной 2δ , процесс теплообмена в условном канале можно считать квазиодномерным. Распределение температуры T в теле бетона крепи поперек условного канала и температуры $T_{\text{нап}}$ паровой фазы теплоносителя можно описать дифференциальным уравнением

$$\lambda \frac{d^2 T}{dy^2} = h_v (T - T_{\text{нап}}). \quad (1)$$

Давление в двухфазном потоке поперек условного канала является постоянным, поэтому температура $T_{\text{нап}}$ равна температуре насыщения T_s и также постоянна. Принимая, что капиллярные силы обеспечивают равномерное распределение жидкости внутри пористой структуры по сечению условного канала. Вследствие этого интенсивность объемного внутрипорового теплообмена $h_v(S)$ является постоянной и рассчитывается по формуле

$$\frac{h_v d_{\text{cr}}^2}{\lambda_v} = 18 \frac{(1-n)^2}{n} [1 - (1-S)^{0.5}]^{-1}, \quad (2)$$

где d_{cr} – диаметр или толщина стенки между порами; λ_v – теплопроводность

жидкости (водного раствора); n – пористость в долях единицы (например, $n = 0,33$); $S = 1 - (1 - 2\Delta/d_n)^2$ – насыщенность водным раствором условного канала бетона крепи; $\Delta/d_n = 0,5[1 - (1 - S)^{0,5}]$; Δ – толщина микропенки; d_n – диаметр капиллярных каналов.

Количество тепла g_v , передаваемое от пористого материала бетона крепи к поверхности микропенки в единице объема, можно определить следующим образом:

$$g_v = h_v(T - T_S) = \frac{\lambda_v}{\Delta}(T - T_S)F. \quad (3)$$

Из (3) видно, что

$$h_v = \lambda_v F / \Delta, \quad (4)$$

где F – площадь поверхности жидкой микропенки в единице объема, то есть для круглых заполнителей бетона

$$F = 6(1 - n) / d_{ст}.$$

Из (4) видно, что h_v возрастает пропорционально теплопроводности жидкости λ_v , но особенно значительно увеличивается при уменьшении диаметра частиц заполнителя – обратно пропорционально $d_{ст}^2$. Насыщенность канала жидкостью также влияет на интенсивность теплообмена. При $S < 0,3$ интенсивность теплообмена резко увеличивается.

Оценим порядок величины h_v , принимая следующую характеристику бетона в условном канале, где происходит тепломассообмен: $n = 0,33$; $S = 0,19$; $\lambda_v = 0,68$ Вт/(м·К). В результате получим $h_v = 163 / d_{ст}^2$, что при $d_{ст} = 10$ мм; 1 мм дает следующие значения: $h_v = 0,163 \cdot 10^1$; $0,163 \cdot 10^2$ Вт/(м³·К).

Температура насыщения T_S вдоль условного канала падает, а $h_v(S)$ – возрастает.

Граничные условия для уравнения (1)

$$Y = 0; \quad \lambda \frac{dT}{dy} = 0; \quad y = \delta; \quad -\lambda \frac{dT}{dy} = \alpha_{\infty}(T_{\infty} - T) \quad (5)$$

применимы как для нагрева при пожаре, так и для охлаждения условного канала шириной δ с адиабатической стенкой при $y = 0$. Коэффициент внешней теплоотдачи α_{∞} учитывает и термическое сопротивление уплотненного слоя крепи при пожаре.

Используя безразмерные величины, уравнение (1) с учетом (5) можно записать в следующем виде:

$$\frac{d^2\theta}{d\zeta^2} - \gamma^2\theta = 0; \quad (6)$$

$$\zeta = 0; \quad \frac{d\theta}{d\zeta} = 0; \quad \zeta = 1; \quad \theta = \theta_{\infty} - \frac{1}{Bi} \frac{d\theta}{d\zeta}, \quad (7)$$

где $\theta = T - T_S$; $\theta_\infty = T_\infty - T_S$; $\zeta = \frac{y}{\delta}$; $\gamma^2 = \frac{h_v \delta^2}{\lambda}$; $Bi = \frac{\alpha_\infty \delta}{\lambda}$ – критерий Био.

Следует отметить, что при $Bi \rightarrow \infty$ второе граничное условие постоянной температуры уплотненного поверхностного слоя имеет вид $\theta(1) = \theta(\infty)$.

Решение системы, зависящее от параметров γ , θ_∞ , Bi , имеет вид

$$\theta = D[\exp(\gamma\zeta) + \exp(-\gamma\zeta)]; \quad (9)$$

$$D = \theta_\infty \left\{ [\exp(\gamma) + \exp(-\gamma)] + \frac{\gamma}{Bi} [\exp(\gamma) - \exp(-\gamma)] \right\}^{-1}. \quad (10)$$

Плотность теплового потока, передаваемого от стенки внутри условного канала, определяется следующим образом:

$$q = (\lambda h_v)^{0.5} \theta \gamma. \quad (11)$$

Комплекс $(\lambda h_v)^{0.5} \theta \gamma$ можно рассматривать как эффективный коэффициент теплоотдачи α от внутренней поверхности стенки условного канала к испаряющемуся теплоносителю:

$$\alpha = (\lambda h_v)^{0.5} \theta \gamma. \quad (11)$$

Оценим численные значения параметров. При $\delta = 50$ мм, $\lambda = 50$ Вт/(м·К), $h_v = 20 \cdot 10^8$ Вт/(м³·К) $\gamma = 100$, $\alpha = (\lambda h_v)^{0.5} = 10^6$ Вт/(м²·К).

На рисунке показано изменение избыточной температуры по сечению условного канала конструкции крепи для нескольких значений температуры у в случае постоянной температуры $\theta = \theta_\infty = 100$ °С.

Из зависимости (12) следует, что эффективный коэффициент теплоотдачи α быстро достигает максимального значения и определяется значениями λ , h_v . Параметр h является мерой отношения количества тепла, передаваемого от матрицы к теплоносителю путем объемного внутриворотового теплообмена в условном канале, к количеству тепла, передаваемого через него теплопроводностью.

Таким образом, процесс тепломассопереноса в теле конструкции крепи можно моделировать как испарение потока жидкости в канале, обрамленном проницаемыми матрицами.

1. Kar K. K., Dybbs A. Internal heat transfer coefficients of porous metal // Heat Transfer Symposium Series. – HTD, 1982. – V. 22, P. 81–91.

2. Koh I. C. Y., Dutton I. L., Benson B. A. Fundamental study of transpiration cooling // NASA CR – 134523, 1973. – 1163 p.

3. Schneider P. I., Maurer R. E. Coolant starvation in or transpiration – cooled hemispherical shell // I. Spacecraft and Rockets, 1968. – V. 5. – № 6, P. 751–752.