© В.А. Хямяляйнен, Е.В. Гурский, П.М. Будников, 2007

УДК 624.19.:622.257.1

В.А. Хямяляйнен, Е.В. Гурский, П.М. Будников

НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ ТАМПОНАЖА КРУПНЫХ ТРЕЩИН

Семинар № 10

Транспортные городские тоннели постоянно подвергаются воздействию окружающей среды. Вследствие этого в отдельных элементах сооружения возникают деформации, повреждения и разрушения.

Одним из важнейших мероприятий по упрочнению тоннельных конструкций, улучшающих их статическую работу и повышающих водонепроницаемость обделки, является тампонирование непосредственно прилегающих к обделкам тоннелей трещин в породе. В результате правильного и тщательного проведения этой работы достигается равномерное распределение горного давления по контуру тоннеля, прекращение осадок пород и уменьшение деформации обделки.

Отдельное место в этой сфере занимает тампонаж крутопадающих трещин большего раскрытия, так как он предполагает использование стабильных вязкопластичных тампонажных растворов. Это обусловлено тем, что при использовании нестабильных тампонажных суспензий возникает большой перерасход тампонажного материала вследствие его растекания по более мелким трещинам или стекания под действием угла наклона трещины. В некоторых случаях причиной перерасхода тампонажного материала является распространение раствора на значительные расстояния от обделки тоннеля, не требуемые для уменьшения водонепроницаемости пород или снижения напора подземных вод. Вышеперечисленное приводит к увеличению стоимости строительства или ремонта подземных сооружений.

В настоящее время разрабатывается теоретическая модель течения стабильного вязкопластичного тампонажного раствора в трещинах большого раскрытия с использованием теории фильтрации с предельным градиентом.

Для построения гидродинамической модели течения тампонажного раствора в крутопадающей трещине воспользуемся законом фильтрации с предельным градиентом давления:

$$grad\ P = -\frac{\mu}{k}\vec{v} - \frac{G\vec{v}}{|\vec{v}|}, \qquad (1)$$

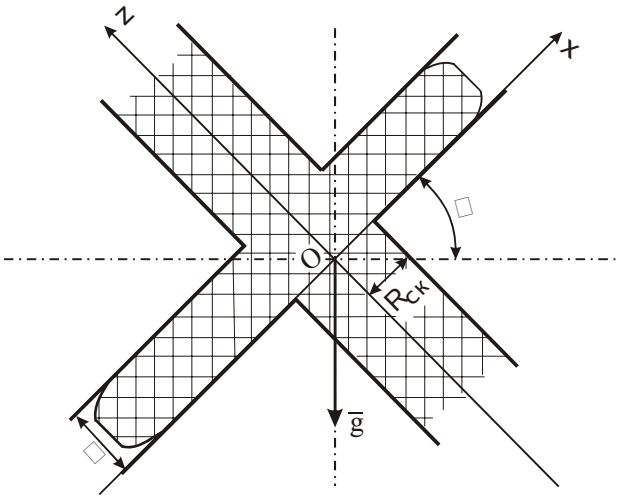
где $G \approx \alpha_1 \frac{\tau_0}{\sqrt{k}}$. (2)

В формулах (1) и (2) приняты следующие обозначения: $\vec{v}$ - вектор скорости фильтрации; μ - коэффициент динамической вязкости; k – коэффициент проницаемости; P – давление; G – предельный градиент давления; τ_o – предельное напряжение сдвига.

Если градиент давления меньше предельного G, то движение отсут-ствует, то есть

$|\vec{v}| = 0$ ($|grad\ P| \le G$).

Рис. 1. Модель крутопадающей трещины



Описание фильтрации вязкопластичной жидкости на основе закона фильтрации с предельным градиентом, а также соот-ношение (2), было введено в работе А.Х. Мирзаджанзаде [2].

Рассмотрим недеформируемую трещину (рис. 1), плоскость которой расположена под углом α к горизонтальной плоскости, с раскрытием δ. Зададим систему координат $Oxyz$ с началом отсчета в центре сечения трещины скважиной. Здесь z – ось перпендикулярная плоскости трещины; x и y – оси координат в плоскости трещины такие, что ось y расположена горизонтально, а ось x направлена вверх по трещине, перпендикулярно оси y.

С учетом массовых сил, действующих на жидкость в трещине, уравнение (1) в проекциях на оси декартовой системы координат $Oxyz$ примет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\mu}{k} v_x - \frac{G v_x}{|\vec{v}|} + \rho g \sin\alpha;$$
$$\frac{\partial P}{\partial y} = -\frac{\mu}{k} v_y - \frac{G v_y}{|\vec{v}|}; \qquad (3)$$
$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{\mu}{k} v_z - \frac{G v_z}{|\vec{v}|} - \rho g \cos\alpha,$$

где ρ - плотность раствора; g – ускорение свободного падения.

Перейдем к цилиндрическим координатам (r,φ,z), где $x = r\cdot cos(\varphi)$; $y = r\cdot cos(\varphi)$; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; $\varphi = arctg(y/x)$, а ось z остается той же. Тогда система (3) примет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{\mu}{k} v_r - \frac{G v_r}{|\vec{v}|} + \rho g \cos\varphi \sin\alpha;$$
$$\frac{\partial P}{\partial \varphi} = -\frac{\mu}{k} v_\varphi r^2 - \frac{G v_\varphi r^2}{|\vec{v}|} - \rho g r \sin\varphi \sin\alpha; \qquad (4)$$
$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{\mu}{k} v_z - \frac{G v_z}{|\vec{v}|} - \rho g \cos\alpha.$$

Будем считать, что напорное движение происходит в плоскостях, параллельным границам потока, т.е. $v_z = = 0$. Также движение считаем безвихревым, т.е. полагаем, что нет циркуляции вокруг нагнетательной скважины, поэтому $v_\varphi = 0$. Так как действие массовых сил по длине потока много больше чем их действие по раскрытию трещины, то можно считать, что $\rho g \cos\alpha \approx 0$. Таким образом, система (4) примет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{\mu}{k} v_r - G + \rho g \cos\varphi \sin\alpha;$$
$$\frac{\partial P}{\partial \varphi} = -\rho g r \sin\varphi \sin\alpha; \qquad (5)$$
$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0.$$

Для несжимаемой ($\rho = const$) вязкопластичной жидкости уравнение неразрывности $div(\vec{v}) = 0$ в цилиндрических

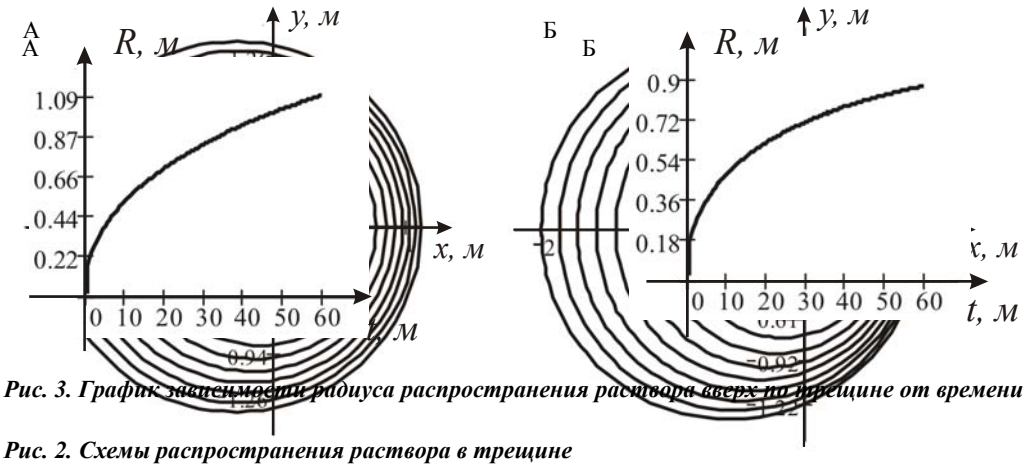


Рис. 3. График зависимости радиуса распространения раствора вверх по трещине от времени

Рис. 2. Схемы распространения раствора в трещине

координатах запишется следующим образом:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} = 0 \,. \qquad (6)$$

В соответствии с вышеизложенным, решена стационарная задача течения вязкопластичного раствора в плоскопараллельной трещине при постоянном расходе на скважине. При этом рассмотрена система уравнений (5) совместно с уравнением (6) при условии $Q = const$, полагая сечение трещины скважиной близким к окружности.

В результате решения мы получена функция распределения перепада давления в трещине:

$$\Delta P(r,\varphi) = -\frac{Q \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot \delta} + G(R_{ск} - r) - \\ -\rho \cdot g \cdot (R_{ск} - r) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha) \,, \qquad (7)$$

где $R_{ск}$ – радиус скважины, $\Delta P(r,\varphi)$ – разница давления в точке трещины с координатами (r,φ) и на скважине.

Численное моделирование процесса инъекцирования раствора в трещину позволяет оценить геометрические параметры области распространения раствора в трещине.

Для сравнения приводятся результаты двух вариантов численного счета течения в одной и той же трещине ($R_{ск}$ = 0,02 *м*; δ = 0,01 *м*; k = 2,635·10^{-8}; α = 60°) растворов с различными реологическими характеристиками:

Вариант А. Реологические характеристики раствора: τ_0 = 15,29 *Па*; Q = 0,001 *м*^{3}*/с*; ρ = 1950 *кг/м*^{3}; μ = 0,0603 *Па·с*;

Вариант Б. Реологические характеристики раствора: τ_0 = 6,756 *Па*; Q = 0,001 *м*^{3}*/с*; ρ = 1820 *кг/м*^{3}; μ = 0,02849 *Па·с*;

Далее на рисунках 1-4 графически приведены результаты численного счета при времени закачки раствора в трещину T = 60 *с*.

На рис. 2 показаны области распространения растворов в трещине. Как показывают расчеты, они имеют эллиптическую форму, но только до тех пор, пока происходит движение раствора вверх по трещине. Как только движение вверх прекращается, эллиптическая форма нарушается, и область распространения раствора приобретает куполообразную форму, расширяющуюся к низу трещины.

На рис. 3 показана зависимость радиусов распространения растворов вверх по трещине от времени. Расчеты при большой длительности закачки

показали, что при постоянном расходе раствора на скважине раствор будет двигаться вверх по трещине только до определенного положения, а дальше движения вверх не будет.

На рис. 4 показана зависимость радиуса распространения раствора вниз по трещине от времени. Как показывают расчеты, с некоторого момента времени зависимость становится практически линейной.

На рис. 5 показана зависимость радиуса распространения раствора по ширине трещины от времени.

Таким образом, полностью определяются геометрические параметры затампонированной области. Поэтому, правильно подобрав реологические параметры раствора и время инъекцирования для условий конкретной трещины, можно получить затампонированную область необходимых размеров. При этом основное влияние на изменение радиуса во всех направлениях оказывает коэффициент динамической вязкости раствора, а также интенсивность закачки.

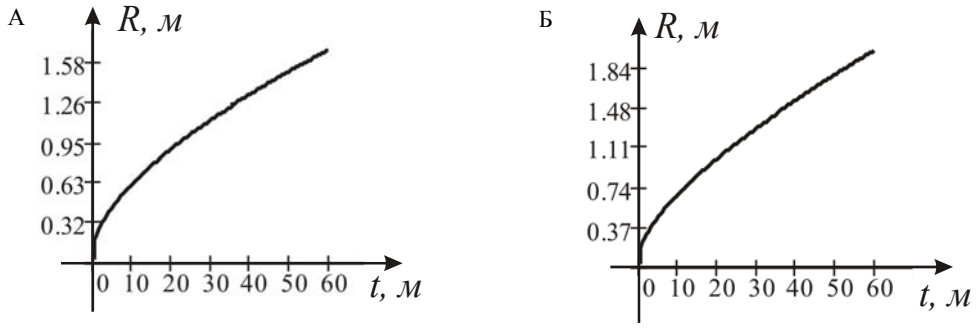


Рис. 4. График зависимости радиуса распространения раствора вниз по трещине от времени

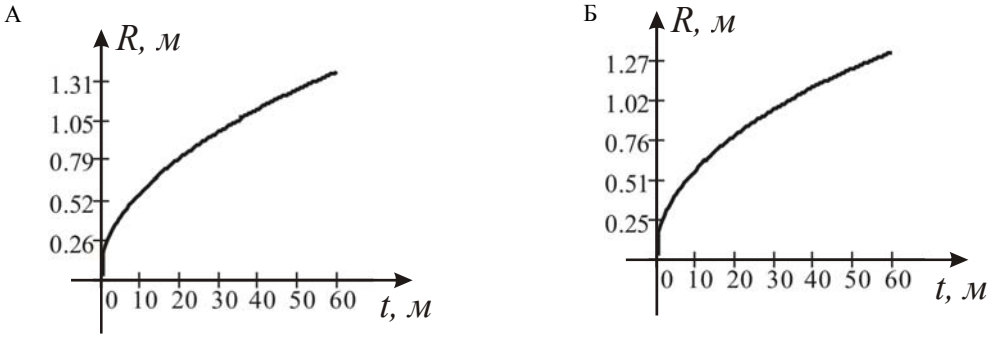


Рис. 5. График зависимости радиуса распространения раствора по ширине трещины от времени

1. *Мирзаджанзаде А.Х.* О теоретической схеме явления ухода раствора. – ДАН АзССР, 1953, т.IX, №4, с. 203-205.

2. *Николаев К.Д.* Капитальный ремонт и реконструкция железнодорожных тоннелей / К.Д. Николаев, П.А. Стальмаков, Я.И. Степанов. – М.: Транспорт, 1973. - С. 248.

3. *Урываев К.*И. Строительство и эксплуатация транспортных и пешеходных тоннелей. – М.: Стройиздат, 1974. - С. 180. ГИАБ

Коротко об авторах

Хямяляйнен Вениамин Анатольевич – первый проректор Кузбасского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, заведующий кафедрой теоретической и геотехнической механики,

Гурский Евгений Валерьевич – старший преподаватель кафедры теоретической и геотехнической механики,

Будников Павел Михайлович – старший преподаватель строительства подземных сооружений и шахт,

Кузбасский государственный технический университет.