

*д.т.н. Должиков П.Н.,
Рыжикова О.А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина),
д.т.н. Кипко А.Э.
(ООО «Славсант», г. Антрацит, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЛИКВИДАЦИИ ПРОРЫВА ГРУНТОВОЙ ДАМБЫ

У статті наведені аналітичні дослідження, на основі яких розроблена технологія, яка дозволяє ліквідувати прорив ґрунтової дамби шляхом «закладки» каналу прориву структурованим глиноцементним розчином з регулюванням реологічних властивостей.

***Ключові слова:** суфозійні процеси, прорив ґрунтових дамб, ліквідаційна свердловина, тампонажний розчин, реологічні властивості.*

В статье приведены аналитические исследования, на основе которых разработана технология, позволяющая ликвидировать прорыв ґрунтовой дамбы путем «закладки» канала прорыва структурированным глиноцементным раствором с регулируемыми реологическими свойствами.

***Ключевые слова:** суффозионные процессы, прорыв ґрунтовых дамб, ликвидационная скважина, тампонажный раствор, реологические свойства.*

Введение. В ґрунтовых дамбах в результате суффозионных процессов образуются зоны повышенной фильтрации, которые со временем могут стать участками прорыва. Это означает, что тело дамбы в некотором локальном участке потеряло устойчивость, и в нем сформировался канал прорыва. Как показывает практика эксплуатации гидротехнических сооружений промышленных предприятий, канал прорыва имеет различную неправильную форму, которая для математического описания может быть идеализирована прямоугольной призмой или цилиндром.

Для ликвидации прорыва наиболее эффективно применение глиноцементного раствора, причем движение его должно быть в структурном режиме [1]. Основное требование к процессу ликвидации канала прорыва – это структурирование раствора в процессе движения по трубам и заполнение канала прорыва в режиме послойной «закладки» [1, 3].

Анализ литературных источников показал, что исследования по ликвидации прорыва дамбы глиноцементным раствором ранее не выполнялись [1, 3, 4].

Цель работы – установить зависимости взаимосвязи реологических параметров тампонажного раствора, раскрытия канала, размеров грунтовой дамбы и параметров инъекции структурированного раствора.

Рассмотрим уже сформировавшийся канал прорыва грунтовой дамбы и стационарное течение жидкости в нем (воды). При этом характерный размер канала обозначим b , ширину дамбы в основании обозначим L . Канал прорыва в общем случае расположен под углом α , а движение жидкости в нем идет со скоростью v_b (рисунок 1).

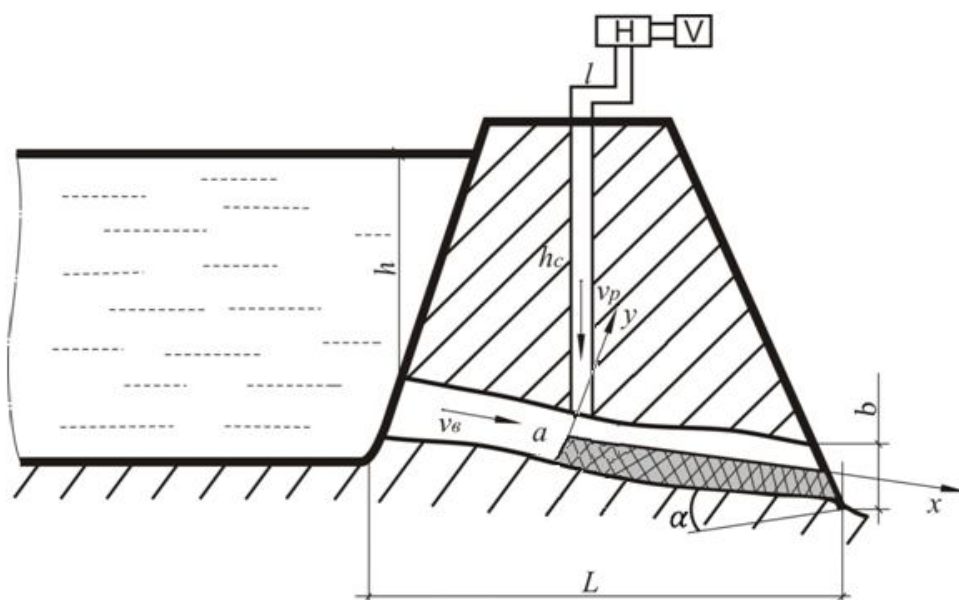


Рисунок 1 – Схема ликвидации прорыва дамбы вязкопластичным раствором

Пусть в средней части дамбы пробурена ликвидационная скважина диаметром d_c на глубину h_c . На выходе из скважины глиноцементный раствор обладает скоростью v_p , а следовательно, и гидродинамическим давлением.

Из закона сохранения энергии при движении раствора по скважине следует:

$$\left(mg - 2\pi r_c \tau_0 \left(h + \frac{L \sin \alpha}{2} \right) \right) \left(h + \frac{L}{2} \sin \alpha \right) = \frac{mv_p^2}{2}, \quad (1)$$

где r_c – радиус скважины;

τ_0 – динамическое напряжение сдвига раствора.

После преобразования из (1) получена скорость движения раствора:

$$v_p = 2 \left(g - \frac{4\tau_0}{\rho d_c} \right) \left(h + \frac{L \sin \alpha}{2} \right), \quad (2)$$

где ρ - плотность тампонажного раствора.

Приближенно можно считать, что скорость движения жидкости в канале прорыва равна скорости истечения из отверстия [2]:

$$v_p = \mu \varphi \sqrt{2gh}, \quad (3)$$

где μ , φ – гидравлические коэффициенты.

Следовательно, результирующая скорость движения тампонажного раствора в канале прорыва будет равна векторной сумме v_p и v_g или в скалярном виде:

$$v = \sqrt{v_p^2 + 2v_p v_g \sin \alpha + v_g^2}. \quad (4)$$

При этом движение раствора уже происходит под углом к горизонту на много больше α и на расстоянии R равном $L/2$ раствор осаждается в канале и формирует устойчивый слой толщиной a .

Теперь отметим, известно [3], что режим движения вязкопластичного раствора характеризуется следующими безразмерными критериями:

$$\begin{aligned} Re &= \frac{vd\rho}{\eta}; \quad Sen = \frac{\tau_0 d}{\eta v}, \\ He &= \frac{\tau_0 d^2 \rho}{\eta^2}; \quad Re^* = \frac{Re}{1 + \frac{1}{6} Sen}, \end{aligned} \quad (5)$$

где τ_0 , η – реологические параметры раствора;

Re , Re^* – обычный и обобщенный критерий Рейнольдса;

Sen – критерий Сен-Венана;

He - критерий Хюдстрема.

Из записанных критериев следует, что для обеспечения структурного режима движения тампонажного раствора необходимо значение скорости его движения:

$$v_{kp} = \frac{Re^* \eta}{2 \rho d} \left(1 + \frac{2 \tau_0 d^2 \rho}{3 Re^* \eta^2} \right). \quad (6)$$

Или после преобразований получаем:

$$v_{kp} = 10^4 \frac{\eta}{\rho} d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{1}{3 \cdot 10^3} \cdot \frac{\tau_0 d^2 \rho}{\eta^2}} \right) = 10^4 \frac{\eta}{\rho} d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{1}{3 \cdot 10^3} He} \right), \quad (7)$$

где значение обобщенного критерия Рейнольдса составляет $Re^* = 2000 \div 3000$, а для структурного режима движения раствора значение параметра Хюдстрема имеет значение: $He \ll 600$.

При соблюдении заданного режима движения тампонажного раствора в ненарушенном ядре потока происходит структурирование раствора и к моменту его осаждения в канале прорыва он приобретает заданную пластическую прочность. Это означает, что необходим оптимальный технологический режим нагнетания раствора за счет сочетания диаметра трубопровода и скважины, производительности насоса и времени закладки канала прорыва.

Диаметр d и критическая длина нагнетательного трубопровода l равны [4]:

$$d_{kp} \leq \frac{4h_c \cdot \tau_0}{\Delta P_{mp}}, \quad (8)$$

$$l_{kp} = \frac{d^4 \cdot \Delta P_{mp}}{10,8 \cdot Q \cdot \eta + 5,3 \cdot \tau_0 d^3}, \quad (9)$$

где ΔP_{mp} – перепад давления в трубопроводе;

Q – производительность насоса.

Как следует из (7), оптимальная скорость движения глиноцементного раствора в трубопроводе, соответствующая структурному режиму, составляет 0,1-0,35 м/с. Исходя из реальных размеров грунтовых дамб, это означает, что при длине нагнетательного трубопровода 25-50 м управлять скоростью структурирования раствора необходимо в течение 5-10 минут. За это время в режиме безнапорной «закладки» канала раствор формирует слой толщиной a , растекающийся на расстояние $R = L/2$.

Из уравнения материального баланса следует:

$$abR = \frac{\pi d^2}{4} v_{kp} \cdot t,$$

$$a = \frac{\pi d^2 v_{kp} \cdot t}{4bR}, \quad (10)$$

где t – время формирования закладочного слоя.

При рассмотрении устойчивости закладочного слоя необходимо учесть гидродинамическое давление воды и тампонажного раствора. Запишем сдвигающие и удерживающие силы в проекции на ось X.

$$K_x + F_\partial = F, \quad (11)$$

где K_x – гравитационная сила;

F_∂ – динамические силы потоков:

$$F_\partial = F_{\partial\epsilon} + F_{\partial p},$$

где $F_{\partial\epsilon}$ – сила динамического давления потока воды;

$F_{\partial p}$ – сила динамического давления раствора.

Следовательно, имеем для гидродинамического давления:

$$P_\partial = \frac{\rho_\epsilon v_\epsilon^2}{2} + \frac{\rho_p v_p^2}{2}. \quad (12)$$

Уравнение равновесия сил запишется в виде:

$$mg \sin \alpha + \left(\frac{\rho_p v_p^2}{2} + \frac{\rho_\epsilon v_\epsilon^2}{2} \right) \cdot ab = aR \tau_0. \quad (13)$$

Откуда после преобразований получаем значение динамического напряжения сдвига структурированного раствора:

$$\tau_0 = \rho_p g b \sin \alpha + b \left(\frac{\rho_\epsilon v_\epsilon^2 + \rho_p v_p^2}{L} \right) = b \left(\rho_p \left(\frac{v_p^2}{L} + g \sin \alpha \right) + \rho_\epsilon \frac{v_\epsilon^2}{2} \right). \quad (14)$$

Таким образом, получено математическое выражение взаимосвязи реологических параметров тампонажного раствора, раскрытия канала прорыва и размеров грунтовой дамбы, что позволяет обосновать технологические параметры закладки канала прорыва.

Реологические характеристики раствора определяются его рецептурой. Известно [5], что наибольшее влияние на структурирование раствора

оказывает концентрация силиката натрия (жидкого стекла). Поэтому в общем случае для задания необходимой рецептуры раствора следует записать систему уравнений:

$$\begin{cases} P_m = f(C_u, C_d, t) \\ \tau_0 = f(C_u, C_d, t) \end{cases} \quad (15)$$

из которой возможно определить концентрацию цемента C_u и жидкого стекла в растворе C_d для его структурирования за время t . Отметим, что исходя из графиков зависимостей пластической прочности и динамического напряжения сдвига раствора (рисунки 2, 3), эти зависимости наиболее адекватно аппроксимируются степенными функциями.

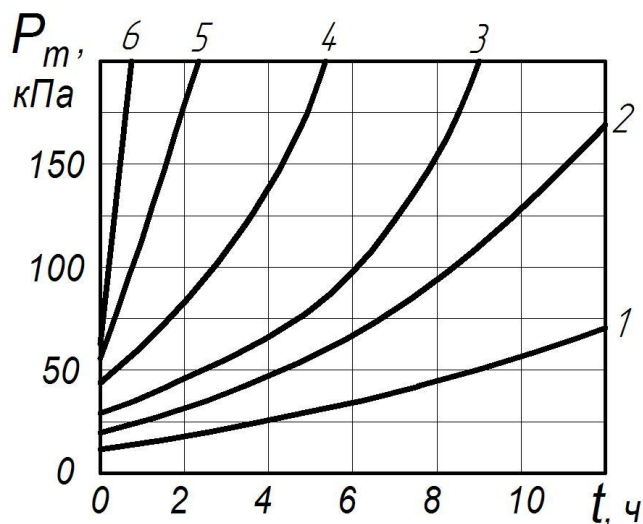


Рисунок 2 – Графики кинетики структурообразования глиноцементного раствора при содержании цемента 100 г/л и жидкого стекла:
1 – 10 г/л; 2 – 20 г/л; 3 – 30 г/л; 4 – 40 г/л; 5 – 50 г/л; 6 – 60 г/л

На основе проведенных аналитических исследований процесса ликвидации прорыва грунтовой дамбы разработана технология регулирования движения тампонажного раствора в трубах и в канале прорыва. Сущность ее заключается в следующем: на первом этапе через трубопровод заданного диаметра осуществляется послойная ликвидация канала прорыва в режиме «закладки» (число порций равно $n = 2 b/a$, концентрация цемента 200 кг/м^3 , а жидкого стекла – $60\text{-}80 \text{ кг/м}^3$), на втором этапе выполняется опрессовка канала прорыва обычным раствором в напорном режиме. При этом производительность нагнетательного насоса увязывается со временем прохождения раствора по трубам и, соответственно, набором необходимой пластической прочности раствора $P_m > 250 \text{ кПа}$.

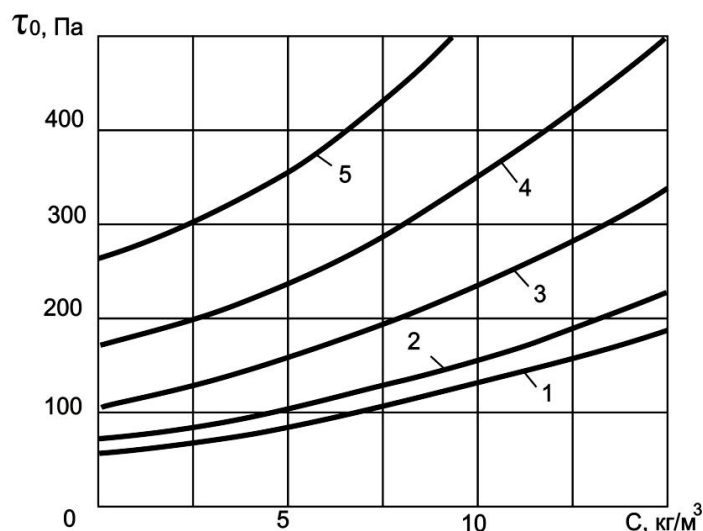


Рисунок 3 – Зависимости динамического напряжения раствора от концентрации жидкого стекла и времени при $C_{\text{г}}=100$ г/л:
1 – 1 мин; 2 – 10 мин; 3 – 60 мин.; 4 – 90 мин.; 5 – 120 мин.

Вывод. Таким образом, ликвидация прорыва грунтовой дамбы может быть надежно и безопасно выполнена путем «закладки» канала прорыва структурированным глиноцементным раствором с регулируемыми реологическими свойствами в соответствии с полученными аналитическими зависимостями.

Библиографический список

1. *Физика движения вязкопластичных тампонажных растворов: монография / П.Н. Должиков, А.Э Кипко. – Донецк: Вебер, 2007. – 237 с.*
2. *Рабинович Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович. – М.: Недра, 1980. – 278 с.*
3. *Кипко Э.Я. Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт: учеб. пособие / Э.Я. Кипко, П.Н. Должиков, Н.А. Дудля и др. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – 415 с.*
4. *Литовченко В.Н. Экспериментальный тампонаж крупных карстовых полостей. Деп. в ЦНИЭИуголь №3073/8. – М.: ЦНИЭИуголь, 1984. – 3 с.*
5. *Проектирование глиноцементных тампонажных растворов / Э.Я. Кипко и др. – Д.: НГУ, 2009. – 181 с.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Дроздом Г.Я.