

величинами динамических моментов, можно говорить об определенной зависимости значений  $\Delta N$  и  $\Delta M$ , что, по-видимому, является следствием более общего явления – взаимодействие вертикальных и продольно-поперечных колебаний, хотя, по нашему мнению, более значимым фактором, влияющим на подобное поведение динамического макета, являются продольно-поперечные колебания судна на морском волнении. Качественно сходные эффекты были получены при соответствующих расчетах с использованием разработанной методики. Уменьшение динамических составляющих к коренному и ходовому концам макета объясняется стабилизирующим воздействием массы: в первом случае массы судна, во втором – концевой массы, имитирующей технологическую платформу.

По результатам обработки испытаний макета ТС корректировка расчетной методики не проводилась, так как схождение теоретических и экспериментальных выходных данных достаточно удовлетворительное.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириченко Е.А. Полная математическая модель гидроупругих эффектов для глубоководных пульнопроводов // Науковий вісник НГА України, №2 – Днепропетровськ, 1998. – С. 53 – 57.

УДК 622.831:622.273

Е.Л. Звягильский

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОГРАЖДАЮЩЕЙ ПЕРЕМЫЧКИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ К НЕЙ ПОРОД ПОГАШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Розглядається моделювання напруженого стану мембрани та примикаючих до неї порід за допомогою поляризаційно-оптичного методу. На основі одержаних результатів запропоновано новий засіб консервації ствола, який зменшує рівень критичних напружень у примикаючому масиві в 3 рази у порівнянні з традиційним.

Проблема долговременного разрушения погашенных стволов закрытых и действующих шахт, а также обрушение поверхности в их окрестности продолжает обостряться с течением времени после погашения стволов по мере усадки засыпки. К настоящему моменту не существует достаточно эффективных способов управления состоянием массива в окрестности погашенного ствола, что порождает постоянную опасность и высокую степень неопределенности.

Согласно правилам безопасности вертикальные стволы засыпаются не склонной к самовозгоранию породой, а в на уровне коренных пород, но не ближе 10м от устья у земной поверхности устраиваются бетонные перемычки. Исследованиями автора установлено, что в ряде случаев ствол засыпать целесообразно как с геомеханической, так и с экономической точки зрения. [1]. В качестве альтернативы был предложен способ сохранения пород в окрестности ствола в допредельном устойчивом состоянии, основанный на использовании специальной мембраны, пригруженной распорной породной засыпкой.

Целью настоящей работы являлось изучение напряженного состояния мембраны и примыкающих к ней пород с помощью поляризаційно-оптичного

метода моделирования [2,3]. Объектом исследования являлась мембрана, установленная напротив ослабленного участка крепи, где наиболее вероятно зарождение и развитие разрушения ствола. Для сокращения времени моделирования исследовалась плоская задача на двух моделях из относительно тонких пластин, изготовленных с соблюдением требований геометрического подобия и находящихся в условиях плоского напряженного состояния. Отметим, что условие разрушения при прочих равных условиях быстрее наступает в случае плоской деформации по сравнению с осесимметричным напряженным состоянием в связи с тем, что в стесненных условиях объемного напряженного состояния разрушению реализоваться труднее. Поэтому рассмотрение в данном случае плоской деформации вместо осесимметричной идет в запас длительной устойчивости.

Для создания поляризованного света применялся полярископ FP ("Mcopta") диффузорного типа, в котором модель просвечивается рассеянным светом, идущим от матового стекла. Источник света для полярископа состоял из ряда «зеленых» флюоресцентных ламп. Свет излучаемый этими лампами ограничен длинами волн от 4800 до 6000 Å. Геометрическое подобие обеспечивалось выполнением всех линейных размеров модели в масштабе 1:170. Механическое подобие модели и натуры обеспечивалось подбором свойств материала и граничных условий нагружения. В качестве материала, применявшегося для изготовления модели использовалась стандартная эпоксидная смола с гексагидрофталевым ангидридом. Модуль продольной упругости  $E = 3040 - 3432$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ , предел прочности на растяжение  $\sigma_p = 10$  МПа, предел пропорциональности  $\sigma_{пр} = 54$  МПа. Тело модели имело форму квадрата с размерами 150×150 мм при толщине модели 5 мм. Диаметр ствола в пересчете на натуру равен 6 м. Воздействие распорной породной засыпки между перемычками в устье ствола моделировалось путем пригрузки перемычки рычажным устройством.

Поляризационно-оптическое исследование позволяет достаточно просто определять направления и разности квазиглавных (главных) напряжений или деформаций при линейно-упругом деформировании прозрачных материалов. Для исследуемого в данной работе случая этих данных достаточно. Чтобы произвести оценку прочности конструкции «перемычка - примыкающие породы», по теории максимальных касательных напряжений требуется знать лишь разность главных нормальных напряжений. Согласно [2], если главные напряжения в плоскости модели имеют разные знаки, оптическая разность хода при нормальном просвечивании пропорциональна величине максимального касательного напряжения, что имеет место в исследуемых моделях.

Оптические разности хода по всему полю модели определялись путем фотографирования картины полос. При этом устанавливался порядок каждой полосы подсчетом количества затемнений в ней в процессе нагружения модели. Затем полосы пронумеровывались на изображении всего поля модели с учетом того, что порядки соседних полос различаются на единицу. Направление счета полос устанавливалось путем наблюдения за направлением движения полос в

процессе нагружения модели (рис. 1, 2). Полосы вначале появлялись в точках с наибольшей оптической разностью хода и двигались в сторону, где эти разности при данной нагрузке меньше. На рисунках номера полос уменьшаются в направлении их движения при нагружении модели.

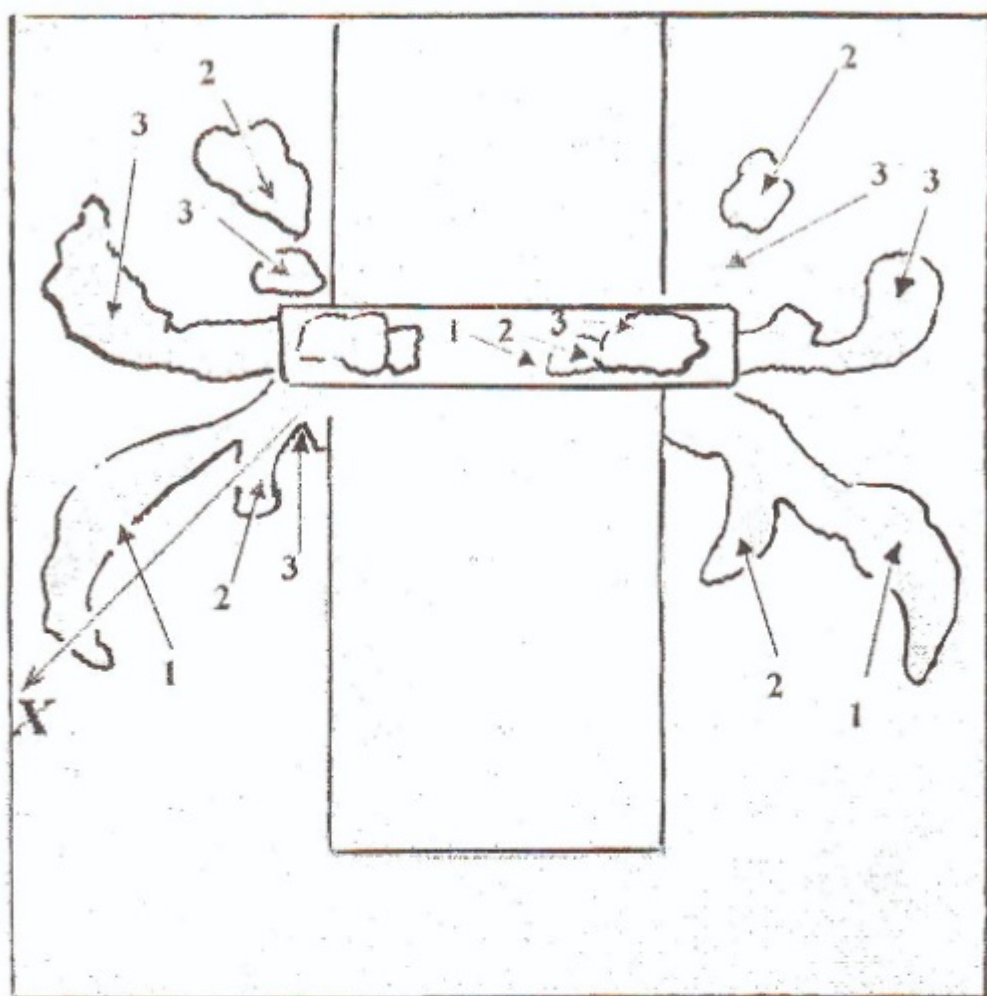


Рис. 1 - Распределение полос интерференции вокруг погашенного ствола при варианте его перекрытия плоской перегородкой

Зависимость между двойным лучепреломлением и напряжениями, выраженная через порядок полос, имеет вид [2]:

$$n = \frac{Ct}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{2Ct}{\lambda} \tau_{\max}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - длина волны света;  $n$  - порядок полос;  $C$  - коэффициент оптической чувствительности по напряжениям;  $t$  - длина пути света в модели (толщина модели);  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{\max}$  - квазиглавные напряжения и максимальное касательное напряжение в плоскости, перпендикулярной направлению просвечивания.

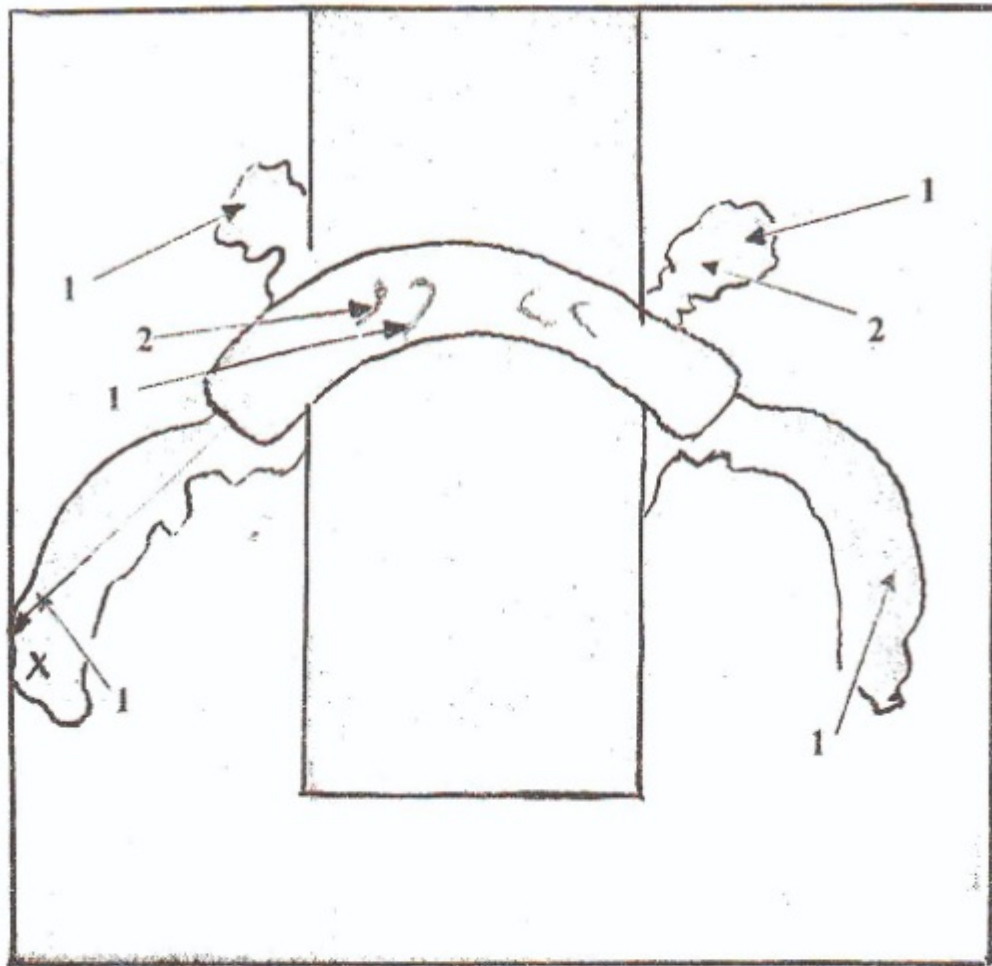


Рис. 2 - . Распределение полос интерференции вокруг погашенного ствола при варианте его перекрытия параболической мембраной

Отсюда,

$$\tau_{\max} = \frac{n\lambda}{2Ct} = n\tau_0^{(r)}, \quad (2)$$

где  $\tau_0^{(r)} = \frac{\lambda}{2Ct}$  - оптическая постоянная полосы (цена полосы) модели по наибольшим касательным напряжениям;

Зная оптическую постоянную для эпоксидной смолы  $\tau_0 = 5,7 \text{ кг/см}^2$  и толщину модели  $t = 0,5 \text{ см}$ , по зависимости  $\tau_0^{(r)} = \frac{\tau_0}{t} = \frac{5,7}{0,5} = 11,4 \text{ кг/см}^2 = 1,12 \text{ МПа}$ .

Основное внимание при обработке результатов измерений уделялось касательным напряжениям, так как именно они ответственны за возникновение разрушений в исследуемых конструкциях. Само разрушение носит характер сдвига по площадкам, на которых достигается предельное состояние, причем величина  $\tau_{\max}$  является функцией нормального напряжения, действующего на площадке скольжения.

При отработке модели №1 (с плоской традиционной перемычкой) после окончательной пригрузки модели, максимальный порядок изохром  $n$  составил 3 (см. рис. 1). Полосы интерференции фиксировались по фиолетовому цвету, как наиболее четкому на изображении. Длина волны этого цвета  $\lambda_{\text{фикс.}} = 4200 \cdot 10^{-6}$  см. Согласно формуле (2) максимальное касательное напряжение в точках с порядком полосы 3 достигает 3,36 МПа. Соответственно, для порядка изохром 2 и 1,  $\tau_{\text{макс}}$  принимает значения 2,24 и 1,12 МПа.

Концентрации максимальных касательных напряжений наблюдаются в местах заделки перегородки. Причем под краем подошвы и в самой перегородке значения на порядок выше, чем в верхней части заделки. В левой части модели наиболее четко прослеживается направление развития разрушающих касательных напряжений (ось X на рис. 1). Изохромы распространяются под острым углом  $45^\circ$  к контуру ствола и стремятся замкнуться на нем. Причем, чем выше порядок полосы, тем ближе она к контуру. Согласно моделированию аналогичной задачи с помощью метода конечных элементов [1] горизонтальная нормальная компонента становится растягивающей в породах у заделки перегородки, в результате чего провоцируется отжим с последующим срезом пород в полость ствола. Удаление опасных с точки зрения потери устойчивости мест от контура ствола можно проследить по кривой 1 на рис. 3. На представленном графике, значения по оси X отражают расстояние  $l$  от контура ствола до критической точки, отложенное по нормали к контуру. Значения представлены в безразмерном виде, то есть отнесенные к диаметру ствола  $d$ . Отметим также наличие высоких напряжений в самой перегородке. Здесь  $\tau_{\text{макс}}$  достигает значения 3,36 МПа. Описанное распределение напряжений является весьма неблагоприятным с точки зрения длительной устойчивости вмещающих пород и самой перегородки. Испытывая интенсивные касательные и растягивающие напряжения, перегородка со временем полностью отделится от пород в местах заделки, разрушится и провалится в полость ствола, что часто наблюдается в стволах, погашенных 40-50 лет назад. Данный процесс неизбежно спровоцирует разрушение и обвал конусной части в окрестности устья ствола с последующим провалом поверхности.

Отработка второй модели с перемычкой в виде параболической мембраны показала максимальный порядок полос интерференции в самой мембране 2, а во вмещающих породах 1 (см. рис. 2). В результате максимальное касательное напряжение в перегородке достигло уровня 2,24 МПа. Отсюда видно, что при прочих равных условиях разрушающие касательные напряжения в мембране  $\tau_{\text{макс}}$  в 1,5 раза, а в окружающем массиве в 3 раза меньше в случае применения параболической перегородки по сравнению с прямой. Характерным является отсутствие концентрации разрушающих напряжений в местах заделки мембраны под ее подошвой, и высокий уровень средних сжимающих, что формирует длительное устойчивое состояние. Особый интерес представляют места возникновения и направление распространения изохром. В отличие от варианта с традиционной перемычкой, они возникают со стороны торцов мембраны и распространяются вглубь массива пород (ось X на рис. 2). Угол наклона оси, вдоль

которой распространяются изохромы, равен  $47^\circ$  по отношению к контуру ствола. Однако, за счет удаления точек их возникновения от контура ствола, места концентрации максимальных касательных напряжений также удаляются от контура. При приложении окончательной максимальной нагрузки на модель, порядок изохром в данном месте не превысил 1 ( $\tau_{\max} = 1,12 \text{ МПа}$ ). Таким образом, при усадке породной засыпки над мембраной происходит удаление критических мест от контура ствола (линия 2 на рис. 3), где они компенсируются значительным уровнем сжимающих напряжений.



Рис. 3 - Удаление критических мест концентрации максимального касательного напряжения от контура ствола при двух вариантах перекрытия его сечения

В местах заделки мембраны по верхнему контуру, наблюдаются небольшие зоны концентрации напряжений с порядком полюс 2, направленные в сторону массива и в тело перегородки. Как уже упоминалось, значения  $\tau_{\max}$  в данных местах снизились в 1,5 раза по сравнению с предыдущей моделью. В целом, имея сводообразную форму, мембрана находится в устойчивом состоянии под воздействием сил сжатия от приложения вертикальной компоненты напряжений. Характер распределения напряжений при варианте с мембраной свидетельствует о том, что отжим и срез пород в направлении контура ствола не провоцируется.

Результаты проведенного исследования качественно подтверждаются ранее проведенными расчетами [1]. МКЭ анализ показал, что даже в случае возникновения обвала крепи ствола под местом заделки мембраны формируется сводообразная устойчивая область естественного равновесия. Для реализации максимального положительного эффекта, обязательно необходима активная пригрузка мембраны и распор крепи в окрестности ее заделки. Необходимый уровень давления создается при высоте засыпки порядка не более 20-30м. Мембрана трансформирует указанное давление в положительное распределение напряжений, которое переводит породы в опасном месте в устойчивое долговременное состояние.

В результате проведенных исследований установлено, что применение нового способа консервации ствола уменьшает уровень критических напряжений в прилегающем массиве пород в 3 раза, а в самой перегородке в 1,5 раза. Поэтому отжим и срез пород в полость ствола не провоцируется. Направление распространения и места возникновения изохром свидетельствуют о затухающем характере их развития для варианта со сводообразной перемычкой. Таким образом, независимым методом оптического моделирования подтверждена эффективность предложенного автором нового способа перекрытия погашенного вертикального ствола по сравнению с традиционным и оптимальность выбора формы самой перегородки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Звягильский Е.Л. Рациональная технология погашения вертикального ствола // Известия донецкого горного института, Донецк. - 1998. - №2(8). - С. 29-31.
2. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. - М.: Наука, 1973. - 576 с.
3. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику. - М.: Мир, 1970. - 484 с.

УДК 622.648.6:621.867.8:532.51.001.24

В.М. Гущин

### РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ В ТРАНСПОРТНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Наведені результати досліджень режимів руху двокомпонентного середовища у пневмотранспортному каналі, зокрема розглянуті хвильовий і порційний режими руху аеросуміщів та умови їх утворення.

Перемещение сыпучих материалов при пневматическом способе транспортирования осуществляется в границах транспортного трубопровода в виде аэросмеси. При этом, перемещающиеся частицы, как правило, сохраняют массу и форму. Особенностью существования потоков движущихся аэросмесей является наличие внутренних поверхностей раздела твердых частиц несущим газовым потоком. Эти поверхностные разделы неустойчивы и быстро распадаются, образуя новые различные вихревые объемы и массы. В процессе движения возникают сложные силовые взаимодействия между несущей средой и несомой твердой компонентой, влияющие на поля скоростей и давления. Характер и величины взаимодействий зависят от режимов движения гетерогенных потоков, сте-