

парафина, грн.;  $C_5$  - стоимость закачки  $1 \text{ м}^3$  парафина, грн.;  $Q$  - количество парафина, подсчитанное с учетом диаметра выработки, толщины закрепляемого вокруг слоя пород и длины  $L$ ;  $C_6$  - стоимость 1 квт-часа электроэнергии, грн;  $G$  - расход электроэнергии, затрачиваемой на разогрев закрепляемой породы, квт-час.

Для получения оптимального варианта величина радиуса закрепления вокруг одиночного иньектора  $r$ , изменяется с заданным шагом в пределах возможного для соответствующих горно-геологических условий. Для каждого из заданных значений  $r$ , подсчитываются требуемое количество иньекторов и суммарная их длина, определяется требуемый объем закрепляющего вещества. Результаты расчетов сравниваются между собой и выбирается вариант, требующий наименьшей стоимости (4).

Границы изменения  $r$ , устанавливались в процессе натурного эксперимента. Для песков средне- и крупнозернистых они составили 1,2...1,6 м [1].

Выполненные расчеты показали, что для обеспечения безопасности и эффективности горнопроходческих работ в Днепровском бурогольном бассейне на глубине  $H \geq 75$  м необходимо закрепить участок массива длиной  $L = 15$  м впереди забоя выработки и слой пород мощностью 1,6 м вокруг выработки. Оптимальный вариант термохимического закрепления такого участка требует расхода 0,5 м труб, 0,2 т парафина и 70 квт час электроэнергии на каждый кубический метр закрепляемой породы. При этом используется 13 иньекторов, которые располагаются по двум концентрическим окружностям при одном иньекторе в центре. Расстояние между окружностями 1,3 м, а между иньекторами - 2 м. Стоимость оптимального варианта составляет 50 тыс.грн., что в 1,5 раза меньше чем при замораживании такого же участка.

Технология термохимического закрепления водонасыщенных пород с установленными по описанной методике параметрами, успешно применена при проведении рукава №1 центрального водоотлива шахты "Верболозовская" ГХК «Александрияуголь».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработать и внедрить технологию закрепления пород вокруг горных выработок и создания противофильтрационных завес на базе отходов твердеющих углеводородов нефти: Отчет о НИР (закл.) / Государственная горная академия Украины (ГГА Украины); Руководитель В.И.Бондаренко - № ГР 01910015644.- Днепрпетровск, 1992.-76 с.
2. Крауч С., А.Старфилд. Методы граничных элементов в механике твердого тела.-М.: Мир,1987. - 328 с.
3. Rongved L. Dislocation over bounded plane over in an infinite solid // J. Appl. Mech. - 1957, № 24. - P. 252-254.

УДК 621.695.204.1

В.П. Франчук, А.П. Зиборов,  
Е.А. Кириченко

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ТРУБОПРОВОДА ГЛУБОКОВОДНОГО ГИДРОПОДЪЕМА

У роботі запропоновано методику розрахунку параметрів напружено-деформованого стану транспортного трубопроводу у складі гірничо-морських видобувальних комплексів. Приведено результати експериментальних досліджень тривкісних параметрів макету труб-

ного ставу з використанням науково-дослідного судна «Полігон» у Чорному морі. Отримано задовільну збіжність експериментальних та розрахункових даних.

Необхідність проектування технологічного обладнання горно-морських добычних комплексів поставила перед механікою ряд складних задач по визначенню параметрів напружено-деформованого стану гнучких протяжених трубопроводів, взаємодіючих з рухомою рідиною.

Схема сил і моментів, діючих на елемент трубопровода, показана на рисунку 1.

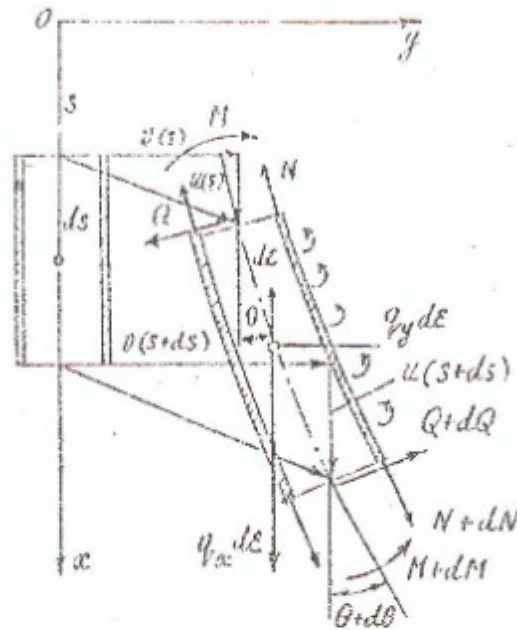


Рис. 1 – Схема сил і моментів, діючих на елемент трубопровода.

Система рівнянь продольно-поперечних коливань трубного става (для плоских коливань) отримана в [1] і має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} (N \cos \theta - Q \sin \theta) - m_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= -m_0 g - q_x \frac{d\varepsilon}{ds}, \\ \frac{d}{ds} (N \sin \theta + Q \cos \theta) - m_0 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= -q_y \frac{d\varepsilon}{ds}, \\ \frac{d}{ds} [M + u(N \sin \theta + Q \cos \theta) - v(N \cos \theta - Q \sin \theta)] + (N \sin \theta + Q \cos \theta) &= 0, \\ M = EF \frac{\partial^2 v}{\partial s^2}, N &= EF \left( \sqrt{(1 + u')^2 + v'^2} - 1 \right) - 2\nu p_* F, \end{aligned} \quad (1)$$

де:  $N$  – осевая розтягуюча сила;  $Q$  – поперечна сила;  $\theta$  – кут нахилу осі трубопровода;  $m_0$  – погонна маса трубопровода в природному стані;  $ds$  – довжина елемента трубопровода в природному стані;  $d\varepsilon$  – довжина

элемента трубопровода после деформации;  $u, v$  – продольное и поперечное перемещение сечения трубопровода вдоль оси  $X$  и вдоль оси  $Y$  соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения;  $q_x$  и  $q_y$  – погонные интенсивности гидродинамических сил внутренней и внешней природы;  $M$  – изгибающий момент;  $E$  – модуль Юнга;  $F$  – площадь поперечного сечения трубопровода по металлу;  $P_n$  – внешнее давление воды;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $t$  – время. Система (1) является нелинейной, а при рассмотрении малых колебаний становится квазилинейной (за счет нелинейностей в выражении для гидродинамических сил).

Исключая из первых двух уравнений этой системы  $M, N$  и  $Q$  (при помощи трех последних уравнений) получим следующую систему двух связанных уравнений для продольных и поперечных перемещений, которую запишем, выделив линейные их части, в виде:

$$\begin{aligned} EF \frac{d^2 u}{ds^2} - m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + m_k g + \Phi(u, v, V_s, V_n) &= 0, \\ EJ \frac{d^4 v}{ds^4} + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + 2m_s V_s \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial s} + m_s V_s^2 \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + \Psi(u, v, V_s, V_n) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где:  $V_s$  – скорость течения пульпы;  $V_n$  – скорость внешнего набегающего потока;  $m = m_k + m_s + m_n$ ;  $m_k$  – масса конструкции,  $m_s$  – масса пульпы на единицу длины,  $m_n$  – присоединенная масса жидкости на единицу длины;  $J$  – осевой момент инерции. Через  $\Phi(u, v, V_s, V_n)$  и  $\Psi(u, v, V_s, V_n)$  обозначены все нелинейные слагаемые, входящие в эти уравнения и которые из-за их громоздкости мы здесь не приводим.

В случае равновесного положения става (например, при движении плавсредства с постоянной скоростью  $V_n$  или при натекании на став морского течения со скоростью  $V_n$ , которая не меняется по времени) уравнение деформированной оси става будет описываться системой уравнений:

$$\begin{aligned} EF \frac{d^2 u}{ds^2} + m_k g + \Phi_0(u, v, V_s, V_n) &= 0, \\ EJ \frac{d^4 v}{ds^4} + m_s V_s^2 \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + \Psi_0(u, v, V_s, V_n) &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Phi_0$  и  $\Psi_0$  – значения нелинейных частей уравнений (2) при равновесном (стационарном) состоянии.

Решение системы (2) и (3) в данной работе строилось при помощи «метода конечных элементов», в основу которого положена вариационная формулировка задачи. Разделим стержень по длине на « $n$ » секций («конечных элементов») с постоянными геометрическими параметрами  $F, J, m, d$ , и т.д. Выберем произвольную функцию  $\psi(s)$ , достаточно гладкую в пределах элемента, умножим уравнения (2) на  $\psi(s)$  и проинтегрируем по длине элемента  $l$ , получим:

$$EJ \left( \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial \varphi}{\partial s} \Big|_0^l - \int_0^l \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial \varphi}{\partial s} ds \right) - \int_0^l (m \ddot{u} - m_b g) \varphi ds + \int_0^l \Phi \varphi ds = 0, \quad (4)$$

$$EJ \left( \frac{\partial^3 v}{\partial s^3} \varphi \Big|_0^l - \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} \frac{\partial \varphi}{\partial s} \Big|_0^l + \int_0^l \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} \frac{\partial \varphi}{\partial s} ds \right) + 2m_a V_a \left( \frac{\partial v}{\partial t} \varphi \Big|_0^l - \int_0^l \frac{\partial v}{\partial t} \frac{\partial \varphi}{\partial s} ds \right) + m_a V_a^2 \left( \frac{\partial v}{\partial s} \varphi \Big|_0^l - \int_0^l \frac{\partial v}{\partial t} \frac{\partial \varphi}{\partial s} ds \right) + \int_0^l m \ddot{v} \varphi ds + \int_0^l \psi \varphi ds = 0. \quad (5)$$

На каждом конечном элементе будем аппроксимировать функции  $u$  и  $v$  полиномами (в локальной системе координат):

$$u = \beta_1 + \beta_2 x, \quad v = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 x^3 \quad (6)$$

Введем в качестве неизвестных осевые смещения и поворот сечения: в начальном сечении  $u_1, v_1$ , и  $\theta_1$ , в конечном сечении  $u_2, v_2$ , и  $\theta_2$ . Тогда:

$$u = u_1 h_1(x) + u_2 h_2(x), \quad (7)$$

$$v = v_1 g_1(x) + \theta_1 g_2(x) + v_2 g_3(x) + \theta_2 g_4(x) \quad (8)$$

где:

$$h_1(x) = \left(1 - \frac{x}{l}\right); \quad h_2(x) = \frac{x}{l}; \quad g_1(x) = 1 - 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{l}\right)^3, \quad g_2(x) = x \left(1 - 2\frac{x}{l} + \frac{x^2}{l^2}\right),$$

$$g_3(x) = 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3, \quad g_4(x) = x \left(-\frac{x}{l} + \frac{x^2}{l^2}\right).$$

Вариации функций  $u$  и  $v$  обозначим:

$$\delta u = \delta u_1 h_1(x) + \delta u_2 h_2(x),$$

$$\delta v = \delta v_1 g_1(x) + \delta \theta_1 g_2(x) + \delta v_2 g_3(x) + \delta \theta_2 g_4(x).$$

Введем векторы неизвестных для элемента

$$\bar{X}_i = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad \bar{Z}_i = \begin{pmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{pmatrix}.$$

Используя в уравнениях (4) и (5) в качестве  $u$  и  $v$  их аппроксимации (7) и (8), а в качестве  $\Phi$  в первом выражении  $\delta u$ , а во втором  $\delta v$  и пользуясь независимостью вариаций  $\delta u_1, \delta v_2, \dots$ , приходим к следующим уравнениям для «конечного элемента», которые удобно записать в матричном виде.

Для уравнения продольных колебаний:

$$M_i \bar{X} + K_i \bar{X} = \bar{F}, \quad (9)$$

где  $M_i = \{m_{ij}^1\}$  ( $i, j = 1, 2$ ) – матрица масс:  $m_{ij}^1 = \int_0^l h_i h_j ds$ . Матрица «жесткости»  $K_i$  равна:

$$K = EF_i \left[ \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{l} & \frac{1}{l} \\ \frac{1}{l} & -\frac{1}{l} \end{pmatrix} \right],$$

где:  $k_{i,j} = (h'_i, h'_j)$ , и  $\bar{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}$ , причем

$$F_1 = m_\kappa g \int_0^l q_5 ds + \int_0^l \Phi q_5 ds, \quad F_2 = m_\kappa g \int_0^l q_6 ds + \int_0^l \Phi q_6 ds.$$

Собирая уравнения (9) по всем конечным элементам  $i = 1, 2, \dots, n$ , и проводя «ансамблирование» по общим узлам, получим общую систему алгебраических уравнений для глобальных искомым переменных  $u_1, u_2, \dots, u_n$ .

К этой системе нужно добавить граничные условия в верхнем и нижнем сечениях става а также начальные условия, если производится расчет неустановившегося движения.

Для поперечных колебаний вклад отдельного конечного элемента сводится к следующему матричному уравнению:

$$EJ_1 K'' \bar{Z} + 2m_a V_a K^0 \bar{Z} + m_a V_a^2 K' \bar{Z} + m M' \bar{Z} = \bar{G}, \quad (10)$$

где обозначено:

$$K' = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - K', \quad K^0 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - K^0,$$

$$K'' = \frac{144}{l^6} \begin{pmatrix} -\frac{2}{l} & -1 & \frac{2}{l} & -1 \\ \frac{3}{l} & 2 & -\frac{3}{l} & 1 \\ \frac{2}{l} & 1 & -\frac{2}{l} & 1 \\ \frac{3}{l} & 1 & -\frac{3}{l} & 2 \end{pmatrix} + K'', \quad \bar{G} = \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \end{pmatrix}$$

$M = \{m_{ij}\}$ ,  $K' = \{K'_{ij}\}$ ,  $K^0 = \{K^0_{ij}\}$ ,  $K'' = \{K''_{ij}\}$  при этом:

$$m_{ij} = (g_i, g_j), \quad k'_{ij} = (g'_i, g'_j), \quad k^0_{ij} = (g^0_i, g^0_j), \quad k''_{ij} = (g''_i, g''_j), \quad G_j = -(\psi g_j)$$

После ансамблирования уравнений вида (10) по смежным узлам, получим общую обыкновенную систему дифференциальных уравнений для поперечных колебаний.

После того как определены перемещения сечений выбранных конечных элементов  $u_i, v_i$  и  $\theta_i$ , по формулам (6) могут быть определены перемещения и деформации в любом сечении, а затем рассчитаны силовые факторы  $M, N$  и  $Q$ , а также напряжения в элементах конструкции.

С целью экспериментальной проверки правомочности разработанной методики сотрудниками института «НИПИОкеанмаш» выполнены испытания макета трубного става (ТС) длиной 200 м в морских условиях с использованием научно-исследовательского судна «Полигон». Макет состоит из бурильных труб,

соединенных муфтами. Коренной конец макета шарнирно укреплен в спайдерном устройстве на судне. На ходовом конце крепится буферная масса, имеющая погружную технологическую платформу. Для проведения необходимых замеров специально разработаны конструкции измерительных секций, снабженных тензовставками и гидрофизическим прибором АЦИТ (автоматизированный цифровой измеритель течения), которые устанавливались между трубными секциями по длине макета. Эти секции предназначены для проведения измерений по следующим параметрам:

■ скорости морского течения по двум взаимно перпендикулярным направлениям;

■ внутренние растягивающие усилия и изгибающие моменты по длине трубопровода.

В таблице 1 приведены значения статического усилия и изгибающего момента на различных глубинах, а именно по уровням размещения измерительных секций на макете ТС.

Таблица 1 – Статические составляющие внутренних усилий и моментов

Скорость буксировки, м/с	Номер тензовставки	Результаты эксперимента		Результаты расчетов	
		Нормальное усилие, кН	Изгибающий момент, кН·м	Нормальное усилие, кН	Изгибающий момент, кН·м
0,6	3	14,27	0,015	14,31	0,006
	4	19,82	0,062	19,43	0,001
	5	24,18	0,20	23,61	0,002
1,1	3	14,38	0,013	14,33	0,033
	4	19,52	0,070	19,38	0,007
	5	23,81	0,010	23,54	0,002
1,1	3	15,50	0,078	14,33	0,033
	4	20,46	0,134	19,38	0,007
	5	24,28	0,027	23,52	0,002
0	1	4,56	0,010	4,31	-
	2	10,59	0,009	10,2	-
	3	15,67	0,195	15,9	-
	4	22,78	0,043	22,17	-
0,4	1	4,06	0,061	4,13	0,032
	2	10,68	0,017	10,56	0,019
	3	17,01	0,012	16,93	0,004
	4	21,46	0,061	22,54	0,021
1,5	1	4,76	0,368	4,16	0,283
	2	10,27	0,072	10,55	0,167
	3	19,05	0,046	16,72	0,035
	4	20,40	0,130	22,13	0,017

Проведенный сравнительный анализ представленных данных показывает, что значения статического нормального усилия  $N$  (усилия натяжения в динамическом пакете) достаточно хорошо согласуются между собой, относительное расхождение соответствующих значений составляет не более 12 %. Испытания

подтвердили и другой качественный результат, замеченный ранее при проведении вычислительных экспериментов: с ростом скорости базового судна нормальное усилие в трубной системе уменьшается, хотя и не очень значительно; такая разгрузка объясняется тем, что трубный став «ложится» на воду. Сравнение изгибающих моментов  $M$  говорит о более существенных расхождениях, но абсолютные величины этих моментов достаточно малы, их вклад в статическое напряженно-деформированное состояние системы на 2 порядка ниже, чем воздействие от усилия натяжения. Именно с учетом малости изгибающих моментов можно сделать вывод о малой кривизне упругой линии всей конструкции, изгибающие моменты могут оказаться значительными вблизи концов трубной системы или в местах навески оборудования с большой массой.

В таблице 2 приведены данные, полученные при обработке результатов испытаний: указаны амплитудные значения динамической составляющей для нормального усилия  $\Delta N$  и изгибающего момента  $\Delta M$ .

Таблица 2 – Динамические составляющие внутренних усилий и моментов

Скорость буксировки, м/с	Номер тензовставки	Результаты эксперимента		Результаты расчетов	
		Нормальное усилие, кН	Изгибающий момент, кН·м	Нормальное усилие, кН	Изгибающий момент, кН·м
0,6	3	2,77	0,036	2,3	0,008
	4	2,36	0,030	2,1	0,004
	5	1,21	0,035	1,34	0,004
1,1	3	3,27	0,144	3,5	0,023
	4	3,32	0,134	3,11	0,014
	5	2,16	0,068	2,33	0,0092
1,1	3	4,33	0,082	4,03	0,001
	4	4,94	0,094	4,36	0,001
	5	2,71	0,06	2,17	0,009
0	1	1,28	0,067	1,02	0,009
	2	1,38	0,039	1,14	0,004
	3	6,27	0,136	6,68	0,013
	4	0,55	0,025	0,45	0,004
0,4	1	2,78	0,083	2,32	0,021
	2	3,58	0,138	3,14	0,024
	3	1,33	0,020	1,13	0,082
	4	1,03	0,036	1,18	0,007
1,5	1	2,12	0,105	2,18	0,012
	2	4,97	0,132	4,67	0,014
	3	2,16	0,042	2,46	0,084
	4	2,33	0,089	2,63	0,023

Динамическая добавка  $\Delta N$  существенна по отношению к статической составляющей и достигает в отдельных случаях  $0,25N$ . В абсолютном большинстве случаев такая добавка сначала нарастает (при движении от нижней измерительной секции к верхней), а затем падает, достигая своего наименьшего значения на верхней тензовставке. Сопоставляя эти данные с соответствующими

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 ПОГАСНЕННОГО 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