УДК 631.315 DOI: 10.18698/2308-6033-2024-3-2340

Математическое моделирование и анализ напряжений подводного кабеля при механических воздействиях

© А.З. Энес

ИИПРУ КБНЦ РАН, г. Нальчик, 360004, Российская Федерация

Рассмотрены модели эксплуатации подводных кабельных систем из поливинилхлорида, которые играют важную роль в обеспечении бесперебойного энергоснабжения. Ввиду эксплуатационных условий подводные кабели подвержены таким внешним воздействиям, как подводные течения и геологические процессы, которые могут привести к образованию подвешенных кабелей. Показан процесс разработки моделей, позволяющих анализировать повреждения кабелей и повышать надежность подводных коммуникационных систем. Для изучения напряженно-деформированного состояния кабелей были использованы конечно-элементные модели, созданные с помощью программного комплекса COMSOL. Также были предложены меры по защите подвешенного кабеля и представлены теоретические исследования их эффективности, выполненные с использованием метода конечных элементов. Приведенные результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния подводного кабеля помогут принять меры для минимизации риска его повреждений и для повышения безопасности кабельной инфраструктуры.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, подводные кабели, поливинилхлорид, метод конечных элементов, теория упругости*

Введение. В связи с повышением потребности в электроэнергии, а также с зависимостью от возобновляемых источников энергии, вырабатываемой преимущественно в прибрежных зонах, подводные силовые кабели стали незаменимым средством обеспечения бесперебойного энергоснабжения. Композитные подводные кабели работают, как правило, в сложных условиях. Для них характерны более высокая частота отказов и большее количество неисправностей, чем у традиционных силовых и оптических кабелей. Они подвергаются разнообразным внешним воздействиям, таким как сильные течения, геологические обвалы, разломы и т. д., что иногда приводит к образованию подвешенных кабелей, повышающих риск сбоев в кабельной системе. Поэтому важно принять меры для минимизации риска их повреждений [1–3], в частности, весьма актуальна разработка математических моделей, позволяющих анализировать повреждения подводных кабелей.

С помощью программного комплекса COMSOL были созданы конечно-элементные модели для изучения напряженно-деформированного состояния подводных кабелей при воздействии различных механических нагрузок. Кроме того, были предложены меры по защите подвешенного кабеля и теоретически исследована их эффективность.

Математическая модель расчета напряженно-деформированного состояния кабельных конструкций. Для определения напряженно-деформированного состояния в полимерных композиционных материалах при действиях внешних нагрузок, температурных полей и других факторов используются классические уравнения теории упругости [4, 5], а именно:

– уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + X_i = 0; \tag{1}$$

– соотношения Коши между компонентами тензора деформаций ε_{ij} и перемещений u_i

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right); \tag{2}$$

– уравнения, связывающие тензор напряжения σ_{ij} и деформаций ε_{ij} в рамках закона Гука,

$$\sigma_{ij} = K\left(\theta - 3\alpha T\right)\delta_{ij} + 2G\left(\varepsilon_{ij} - \frac{\theta}{3}\delta_{ij}\right). \tag{3}$$

Здесь σ_{ij} — тензор напряжений; K, G — модуль объемного сжатия и сдвига соответственно; θ — объемное расширение; α — коэффициент теплового расширения; T — значение температуры в точке x_1, x_2, x_3; δ_{ij} — удлинение; ε_{ij} — деформации.

В результате некоторых преобразований можно получить следующую систему трех дифференциальных уравнений в частных производных (уравнения Ляме), содержащую в качестве неизвестной только перемещения [6–8]:

$$G\Delta u_i + \left(\lambda + G\right)\frac{\partial \theta}{\partial x_i} + X_i = 0, \tag{4}$$

где

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2},$$

$$\lambda = K - \frac{2}{3}G > 0;$$

$$\theta = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3}.$$

В приведенных выше выражениях индексы i, j меняются от 1 до 3, а по повторяющимся индексам подразумевается суммирование, например, в формуле (1)

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{i1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{i2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{i3}}{\partial x_3},$$

$$i = 1, 2, 3.$$

Для решения системы (3) необходимо задать граничные условия смешанного типа

$$u_i\big|_{S_1} = u_i^0, \tag{5}$$

$$\sigma_{ij} n_i\big|_{S_2} = \sigma_i^0.$$

Здесь u_i^0, σ_j^0 — заданные перемещения и напряжения на границах области; n_j — компоненты единичного вектора, перпендикулярного поверхности S_2 ($S_1 = S_1 \cup S_2$ — полная поверхность деформируемого твердого тела).

Для решения системы (4) с граничными условиями (5) используется метод конечных элементов (МКЭ) [9, 10].

Особенности реализации метода конечных элементов для задачи определения прочностных свойств подводного кабеля при механических воздействиях. Напряженно-деформированное состояние в виде распределения напряжений и деформаций элементов кабельной конструкции определяется с помощью МКЭ. В расчетах были использованы геометрические размеры элементов (табл. 1) и физико-механические свойства (табл. 2) материалов силового кабеля марки ВБбшвнг-LS 1×240 мм [11–14].

Таблица 1

Размеры элементов силового кабеля

Элемент	Параметр	Значение
Медная жила	Сечения, мм^2	240
Изоляция жилы из ПВХ	Толщина, мм	2,2
Внутренняя оболочка из ПВХ	Толщина, мм	1,0
Броня из стальных оцинкованных лент	Толщина, мм	0,2
Защитный шланг из ПВХ	Толщина, мм	2,0