Учитывая, что амплитуда колебаний $A=\sqrt{a_0^2+b_0^2}$, из совместного решения уравнений (5.59) и (5.60) получаем

$$(3/4\mu_2 k^3)^2 A^6 - 3/2\,\mu_1\mu_2 k^4 A^4 + [(\mu_1 k)^2 - (k^2-\omega^2)^2]\,A^2 - F^2 = 0. \quad (5.61)$$

В резонансной зоне при $k=\omega$ (частота вынуждающей силы принимается равной собственной частоте колебаний и в зоне захвата колебаний (см. § 5.2) амплитуда A определяется из уравнения

$$3/4\mu_2 k^3 A^3 - \mu_1 k A \pm F = 0. \quad (5.62)$$

В приведенных расчетах значение вынуждающей силы было принято по формуле (5.43), что соответствует колебаниям трубопровода при докритическом режиме обтекания. Аналогичные решения получаются и при закритическом режиме обтекания, когда вынуждающая сила принимается по формуле (5.44). В этом случае при определении параметров μ_1, μ_2 и F по формулам (5.49)—(5.51) следует принять $a=a_1$; $b=b_1$; $c=c_1$.

Амплитуду колебаний для различных сечений по длине трубопровода можно найти по формуле (5.46)

$$y(x)=AX(\bar{x}), \quad (5.63)$$

где $X(\bar{x})=A_1 \operatorname{ch}\lambda\bar{x}+B_1 \operatorname{sh}\lambda\bar{x}+C_1\cos\lambda_1\bar{x}+D_1\sin\lambda_1\bar{x}$ (5.64)

определяется из решения уравнения (5.47), A_1, B_1, C_1, D_1 — постоянные, определяемые из граничных условий;

$$\lambda=\sqrt{\frac{Nl^2}{EI}+\sqrt{\left(\frac{Nl^2}{2EI}\right)^2+\frac{m+m_{\text{пр}}}{EI}l^4\omega^2}}; \quad (5.65)$$

$$\lambda_1=\sqrt{-\frac{Nl^2}{EI}+\sqrt{\left(\frac{Nl^2}{2EI}\right)^2+\frac{m+m_{\text{пр}}}{EI}l^4\omega^2}}. \quad (5.66)$$

Расчет резонансных колебаний выполняют в такой последовательности: определяют круговую частоту собственных колебаний подводного трубопровода $\omega=2\pi n$; определяют число Рейнольдса Re и устанавливают режим обтекания трубопровода; в зависимости от режима обтекания находят величину [по формулам (5.43) и (5.44)] и частоту (с учетом явления «захвата» колебаний) вынуждающей силы; для заданных граничных условий по уравнению (5.64) определяют форму $X(\bar{x})$ основного тона колебаний трубопровода; по уравнениям (5.61) и (5.63) вычисляют амплитуду колебаний;

определяют динамический изгибающий момент

$$M=EIy^{\text{II}}(x)=\frac{AEI}{l^2}X^{\text{II}}(\bar{x}) \quad (5.67)$$

и результирующие напряжения от действия статических нагрузок и колебаний трубопровода.

ГЛАВА 6. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СТВОРОВ И ПРОФИЛЕЙ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

§ 6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПОДВОДНОГО ПЕРЕХОДА

Выбор места (створа) и конструктивных решений подводного перехода существенно влияют на надежность всего магистрального нефте- и газопровода, поэтому к качеству проектирования подводных трубопроводов следует предъявлять высокие требования.

Оптимальный вариант подводного трубопровода, выбранный при проектировании, должен обеспечивать:

наилучшие условия для безаварийной эксплуатации подводного перехода, т. е. его эксплуатационную надежность;

минимальные приведенные затраты на строительство и эксплуатацию;

наиболее рациональное использование материальных ресурсов строительных организаций и минимальные сроки строительства.

Одно из самых важных требований, предъявляемых к оптимальному варианту подводного трубопровода, — обеспечение его эксплуатационной надежности. Анализы аварий и обследований подводных трубопроводов показывают, что основными причинами, вызывающими их предаварийные и аварийные состояния, являются:

переформирования русла и берегов реки в створах переходов, в результате чего размытые участки трубопроводов подвергаются силовому воздействию потока;

механические повреждения якорями судов, плотами, льдом.

Следует отметить, что подводные трубопроводы, заглубленные в грунт ниже предельной границы размыва, повреждений, как правило, не имели. Поэтому можно считать, что заглубление трубопровода ниже предельной границы размыва обеспечивает надежность перехода.

Определение предельной границы размыва русла и берегов реки представляло известные трудности. Лишь с появлением гидроморфологической теории руслового процесса стало возможным достаточно обоснованно оценивать деформации русла и берегов реки на длительный период. Применение гидроморфологической теории руслового процесса обусловливает некоторое увеличение общего объема изыскательных работ.