

УДК 622.692

## МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Александров А.А.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия, e-mail: rector@bmstu.ru*

Котляревский В.А.<sup>1</sup>, Ларионов В.И.<sup>2</sup>

*Научно-образовательный центр исследования экстремальных ситуаций  
(НОЦ ИЭС) МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
e-mail: <sup>1</sup>kotlyarevsky22@mail.ru, <sup>2</sup>lar@esrc.ru*

Лисин Ю.В.

*ОАО «АК «Транснефть», Москва, Россия  
e-mail: transneft@ak.transneft.ru*

**Аннотация.** *Рассмотрена модель, представляющая метод динамического анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и параметров движения линейной части (ЛЧ) заглубленного в грунт магистрального трубопровода на сейсмические нагрузки с произвольной ориентацией оси нефтепровода к вектору волны. Предложены модели материалов и среды. Разработан алгоритм решения задачи, в котором предусмотрено нагружение трубопровода сейсмическими волнами по трем компонентам в прямоугольной системе координат.*

**Ключевые слова:** *магистральный нефтепровод, грунт, нагрузки, внутренние усилия, температурный перепад, акселерограмма, преобразование Фурье*

Значительная часть трассы нефтепровода прокладывается в зонах воздействия опасных природных явлений и процессов, высокую опасность из которых представляют сейсмические воздействия. В связи с этим актуальной является разработка комплекса методов и мероприятий по обеспечению безопасной и надежной эксплуатации магистральных нефтепроводов на участках со сложными геологическими условиями.

Анализ существующих нормативных и литературных источников показал, что в настоящее время мало внимания уделяется динамическому расчету трубопроводов на прочность – важной составляющей обеспечения надежности при эксплуатации трубопроводных систем. В нормативной литературе практически отсутствуют методические рекомендации по дополнительному расчету трубопроводов на динамические нагрузки. Поэтому выявление закономерностей динамики трубопровода при сейсмическом воздействии, разработка алгоритма прочностного расчета трубопровода на статические и динамические нагрузки становятся необ-

ходимыми для оценки безопасности трубопровода и разработки рекомендаций по повышению его надежности.

В статье приводятся основные положения метода динамического расчета – область решения, инерционные и жесткостные характеристики моделирующей дискретной системы, начальные и граничные условия; анализируется волновая динамика процесса взаимодействия трубопровода грунтом; рассматриваются математические модели материалов и сред. Предложенная модель динамического расчета наполненной нефтью трубы, впаивной в сплошную среду – вмещающий грунтовый массив, на сейсмические воздействия с учетом начальных статических напряжений представляет собой комплексный анализ прочности, как один из аспектов надежности, и позволяет существенно повысить точность оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода.

## 1. Модель взаимодействия трубопровода с вмещающим грунтовым массивом

### 1.1. Обоснование дискретизации расчетной модели

В расчетном алгоритме при моделировании механических свойств вмещающего грунтового массива с впаивным трубопроводом использована схематизация дискретной стержневой системой с инерцией, сосредоточенной в узловых массах на пересечениях прямых стержней. Продольные деформации стержней вызывают напряжения, зависящие от реологических характеристик грунтовой среды и материалов трубы. Система уравнений дискретной системы включает уравнения движения узлов, условия совместности, соотношения для деформаций, уравнения состояния конструкционных материалов и вмещающей среды, соотношения для внешних нагрузок, начальные и граничные условия.

Сплошная среда (грунтовый массив) может быть аппроксимирована структурой по треугольной или квадратно-диагональной схеме (рис. 1.1).

Рассматриваемые структуры в определенных условиях являются эквивалентом слоев среды (плоская деформация) или пластинок (плоское напряженное состояние), работающих в своей плоскости. Жесткостные свойства упругой среды определяются двумя константами – модулем упругости  $E_0$  и коэффициентом Пуассона  $\mu_0$ . Изменение геометрии системы связано с перемещениями узлов, что вызывает осевые (продольные) деформации и поворот стержней, сохраняющих прямолинейность. Стержни с продольной жесткостью произвольно связаны между собой, их концы шарнирные.

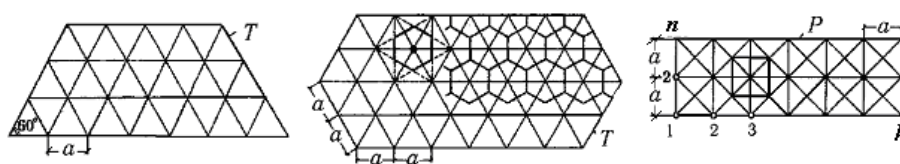


Рис. 1.1. Аппроксимация сплошной среды по треугольной ( $T$ ) и квадратно-диагональной ( $P$ ) схемам

Параметры треугольной стержневой системы, эквивалентной по жесткости изотропной пластинке единичной толщины  $\delta = 1$ , при  $\mu_0 = 1/3$  определяются соотношением

$$E_1 F_1 = \frac{1}{2} \sqrt{3} a \delta E_0, \quad (1.1)$$

где  $E_1$  – модуль Юнга материала стержней;  $F_1$  – площадь поперечного сечения стержней.

Для квадратно-диагональной системы область решения далее представлена в виде прямоугольника с  $k$  узловыми массами по оси  $X$  и  $n$  – по  $Y$  (рис. 1.2).

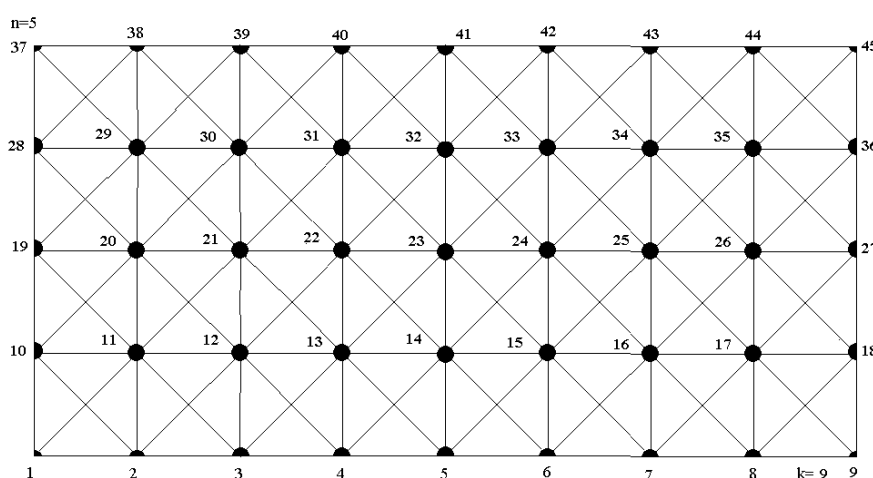


Рис. 1.2. Прямоугольная область для квадратно-диагональной системы, моделирующей грунтовой массив: исходное состояние области с числом  $N_k = (k - 1) \cdot (n - 1)$  квадратных элементов, ограниченным мощностью процессора конкретного ПК

Для этой схемы эквивалентность по жесткости свойствам изотропной пластинки с  $\delta = 1$ , при  $\mu_0 = 1/3$  дается соотношением

$$E_1 F_1 = \sqrt{2} E_2 F_2 = \frac{3}{4} a \delta E_0, \quad (1.2)$$

где  $E_1$  – модуль Юнга материала элементов, составляющих квадраты;  $E_2$  – модуль Юнга для материала диагональных элементов;  $F_1$  и  $F_2$  – соответствующие площади поперечных сечений элементов;  $a$  – размер стороны квадратной ячейки.

При  $\mu_0 \neq 1/3$  пластинка приобретает свойства ортотропии, то есть зависимости от поворота осей координат. Для сохранения изотропии при  $\mu_0 = 1/3$  имеется возможность выбора только одной упругой константы  $E_0$ .

Инерционные свойства сплошной среды определяются ее плотностью  $\rho$ . Массам узлов  $M_j = \delta \rho A_j$  соответствуют площади  $A_j$  примыкающих участков поверхности пластинки (рис. 1.3a).

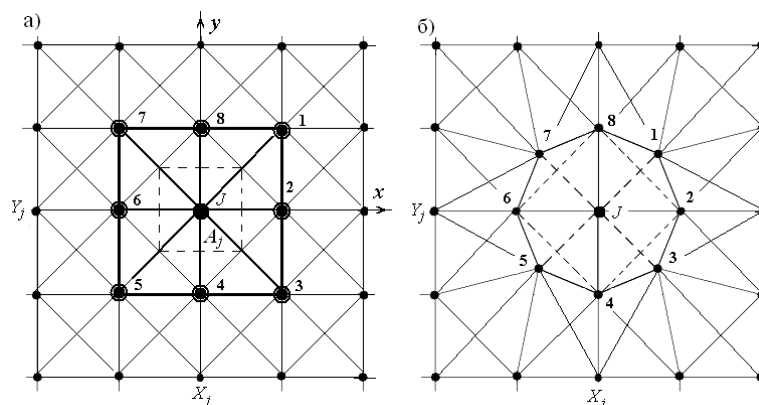


Рис. 1.3.

- а) Зона  $J$ -го (внутреннего) узла на расчетной сетке, контролирующей по массе площадь  $A_j$  грунтовой среды; узел нагружен усилиями 8 стержней, соединенных с соседними узлами с номерами 1 - 8 в локальной системе координат  $x_j$ ;
- б) схема контура трубы (вариант – с минимальным числом узлов 1–8), впаянной в среду; масса  $J$ -го узла соответствует массе нефти, наполненной на все сечение трубы

Внутренний узел контролирует площадь  $A = a^2$ , граничный узел  $\frac{1}{2}a^2$  и угловой  $\frac{1}{4}a^2$ , как это показано на рис. 1.2. Соответствующие значения масс

$$M_{BH} = \delta \rho a^2, \quad M_{ГР} = \frac{1}{2} \delta \rho a^2, \quad M_{УГ} = \frac{1}{4} \delta \rho a^2.$$

К каждому внутреннему узлу сходятся восемь стержней с половинным объемом  $2a(F_1 + \sqrt{2} F_2)$  и массой  $M = 2a(F_1 \rho_1 + \sqrt{2} F_2 \rho_2)$ , где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности материалов стержней.

Приравняем  $M = M_{BH}$ :

$$\rho a \delta = 2(F_1 \rho_1 + \sqrt{2} F_2 \rho_2), \quad (1.3)$$

и, исключив отсюда площади сечений посредством (1.2), получим

$$\frac{1}{C_{ПА}^2} = \frac{\rho}{E_0} = \frac{3}{2} \left( \frac{\rho_1}{E_1} + \frac{\rho_2}{E_2} \right). \quad (1.4)$$

Скорость продольной упругой волны в пластинке  $C_{ПА} = \sqrt{E_0 / \rho}$ , а в стержнях  $C_j = \sqrt{E_j / \rho_j}$  ( $j=1, 2$ ), то есть  $C_{ПА}^{-2} = \frac{3}{2}(C_1^{-2} + C_2^{-2})$ , и в случае  $C_1 = C_2$  имеем  $C_1 = \sqrt{3} C_{ПА}$ ,

$$E_1 / \rho_1 = E_2 / \rho_2 = 3 E_0 / \rho. \quad (1.5)$$

Отсюда видно, что при соблюдении равенства (1.3), обеспечивающего эквивалентность инерционных свойств стержневой модели, и (1.2) – ее жесткостных свойств, нельзя точно удовлетворить условию равенства скоростей упругих волн

в среде и в стержнях модели. Скорости продольных волн в стержнях будут в  $\sqrt{3}=1,732$  раза превышать скорость продольных волн в среде.

Четыре соотношения (1.2) и (1.5) между шестью величинами  $\rho_i$ ,  $E_i$  и  $F_i$  ( $i = 1, 2$ ) позволяют выбрать две из них в качестве независимых. Если задать  $E_1 = E_2 = E_0$ , то получим  $\rho_1 = \rho_2 = \frac{1}{3} \rho_3$  и  $F_1 = \sqrt{2} F_2 = \frac{3}{4} a\delta$ , а погонные массы стержней

$$m_1 = \sqrt{2} m_2 = \rho_1 F_1 = \frac{1}{4} \rho a \delta. \quad (1.6)$$

Аналогично можно получить значения параметров для внешних (граничных) стержней области. Жесткости стержней, образующих внешний контур, равны  $\frac{1}{2} E_1 F_1$ . При  $E_1 = E_0$  площади сечений этих стержней равны  $\frac{1}{2} F_1$ . Плотность  $\rho_0$  для внешних стержней найдем из равенства

$$M_{ГР} = \frac{1}{2} \delta \rho a^2 = \frac{1}{2} \rho_1 F_1 a + \rho_2 F_2 a \sqrt{2} + \frac{1}{2} \rho_0 F_1 a, \quad \rho_0 = \frac{1}{3} \rho.$$

Для стержней, сходящихся к угловому узлу, плотность  $\rho_V$  определяется из равенства

$$M_V = \frac{1}{4} \delta \rho a^2 = \frac{1}{2} \rho_V F_1 a + \frac{1}{2} \rho_2 F_2 a \sqrt{2}, \quad \rho_V = \frac{1}{3} \rho = \rho_0.$$

Таким образом, стержни контура области стержневой структуры имеют плотность остальных стержней. Погонные массы контурных стержней  $m_{ГР} = \frac{1}{2} m_1$ .

Параметры квадратно-диагональной стержневой структуры, моделирующей сплошную упругую среду (пластинку) при  $\mu_0 = \frac{1}{3}$  и  $E_1 = E_2 = E_0$ , приведены в табл. 1.

Для перехода от плоского напряженного состояния для пластинки к плоской деформации для массива грунтовой среды использованы значения коэффициента Пуассона  $\mu$  и модуля Юнга  $E$  по формулам  $\mu = \mu_0 / (1 + \mu_0)$ ,  $E = (1 - \mu^2) E_0$ .

Таблица 1. Параметры квадратно-диагональной структуры

Элементы	Погонная масса	Плотность	Площадь сечения
Стороны квадратов	$m = \frac{1}{4} \rho a \delta$	$\rho_1 = \frac{1}{3} \rho$	$F_1 = \frac{3}{4} a \delta$
Диагонали	$m_1 / \sqrt{2}$	$\rho_1$	$F_1 / \sqrt{2}$
Контурные стержни	$\frac{1}{2} m_1$	$\rho_1$	$\frac{1}{2} F_1$

При  $\mu_0 = \frac{1}{3}$  имеем  $\mu = \frac{1}{4}$ ,  $E = \frac{15}{16} E_0$ . Соответствующие значения модулей сдвига  $G$  и объемной деформации  $K$  упругой среды определяются соотношениями  $G = \frac{1}{2} E I (1 + \mu)$  и  $K = \frac{1}{3} E I (1 - 2\mu)$ ; при  $\mu = \frac{1}{4}$   $G = \frac{2}{5} E$  и  $K = \frac{2}{3} E$ .

Соотношения (1.2) и (1.4) переходят в следующие

$$E_1 F_1 = \sqrt{2} E_2 F_2 = \frac{3}{4} a \delta E I (1 - \mu^2), \quad \rho (1 - \mu^2) / E = \frac{3}{2} (\rho_1 / E_1 + \rho_2 / E_2),$$

то есть при  $\mu = \frac{1}{4}$   $\rho / E = \frac{8}{5} (\rho_1 / E_1 + \rho_2 / E_2)$ .

Скорость продольных волн при плоской деформации:

$$C = \sqrt{\left( K + \frac{4}{3} G \right) / \rho} = \sqrt{3 K (1 - \mu) / [\rho (1 + \mu)]}.$$

При  $\mu = \frac{1}{4}$  скорость  $C = \sqrt{\frac{6}{5} E / \rho}$ . Соотношение между скоростями волн

$C^{-2} = \frac{4}{3} (C_1^{-2} + C_2^{-2})$ , и при  $C_1 = C_2$   $C_1 = \sqrt{\frac{8}{3}} C = 1,63 C$ , то есть скорость в стержнях в 1,63 раза больше, чем в упругом массиве.

Примем  $E_1 = E_2 = E I (1 - \mu^2)$ , тогда  $\rho_1 = \rho_2 = \frac{5}{16} \rho I (1 - \mu^2)$ . При  $\mu = \frac{1}{4}$  получим  $\rho_1 = \rho_2 = \frac{1}{3} \rho$ ,  $F_1 = \sqrt{2} F_2 = \frac{3}{4} a \delta$ , что совпадает с вариантом моделирования волн в пластинке, то есть при  $\mu = \frac{1}{4}$ ,  $E_1 = E_2 = \frac{16}{15} E$  справедливы соотношения табл. 1.

В прямоугольной инерциальной системе координат  $XU$  фиксируется начальная геометрия объекта на регулярной сетке как система узлов и стержней. Узлы нумеруются  $j = 1, 2, \dots, n$  обходом в контуре области решения автоматически, причем в узлах центрируются инерция и кинематика от усилий, возникающих в стержнях при осевых деформациях и напряжениях.

Вариантными расчетами сейсмических волн в грунтовом массиве с применением рассмотренного алгоритма установлено удовлетворительное согласие полученных результатов с численным решением уравнений волновой динамики плотных сред по характеристикам полей смещений и скоростей в диапазонах реально контролируемых времен и размеров областей решения порядка десятков метров [1].

## 1.2. Модели материалов и сред

Математические модели для описания поведения материала трубы, нефти и грунтовой среды представляют зависимости напряжения от деформации. Для материала трубы в упругой стадии применяется линейная зависимость  $\sigma(\epsilon)$  по за-

кону Гука с переходом при достижении предела текучести на упруго-пластическую диаграмму Прандтля с контролем прочности по (нормативному или динамическому) пределу текучести. Для нефти применяется линейная зависимость гидростатического давления от объемной деформации  $P(\Delta)$ . Механические свойства грунта приняты по упруговязкой модели в виде зависимости напряжения (давления) от деформации и скорости деформации  $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  с учетом значений упругих постоянных и коэффициента вязкости.

Поскольку процессы нагружения оболочки скоротечные, металл может выдерживать кратковременные перегрузки (упругие напряжения, превышающие статический предел текучести). Проверка ресурса прочности может проводиться по нормативному  $\sigma_T$  или динамическому  $\sigma_d$  пределу текучести по критерию кинетического типа, определяющему  $\sigma_d$  для опасной точки стальной оболочки по условию  $\sigma_{\text{АЭ}}(t) \leq \sigma_d = \sigma(\tau)$ , в котором  $\sigma(\tau) > \sigma_T$  определяется интегралом для эквивалентного напряжения  $\sigma(t)$

$$\int_0^{\tau} [\sigma(t)/\sigma_T]^{\alpha} dt = t^*,$$

где  $\tau$  – время запаздывания динамической текучести стали;  $\alpha$  и  $t^*$  – параметры чувствительности материала к скорости деформации.

## 2. Нагрузки и внутренние усилия в МТ при дифракционном взаимодействии с сейсмическими волнами во вмещающем грунтовом массиве

В расчетном алгоритме конструкция (трубопровод) совместно с вмещающим грунтовым массивом рассматривается как единый объект, схематизируемый плоской системой прямых стержней с конечным числом «инженерных» (переносных) степеней свободы. Параметры зон, соответствующих грунтовой среде, могут быть переменными по координатам, то есть расположения слоев грунта могут различаться, что позволяет анализировать поведение трубопровода под нагрузками в достаточно сложных геологических условиях.

Полагается, что стержневая система в сечении ХУ обладает плоскостью материальной симметрии, в которой действуют волновые (сейсмические) нагрузки. Масса системы сосредоточена по концам стержней – в узлах, инерцией вращения которых пренебрегается. Расчетная схема объекта представляет кольцевую конструкцию трубы, сопряженную с грунтовым массивом: криволинейная кольцевая форма аппроксимирована многоугольником (рис. 1.3б). Область решения при начальном состоянии среды с впаянной трубой (с вариантом минимально возможного числа элементов для оболочки) представлена на рис. 2.1.

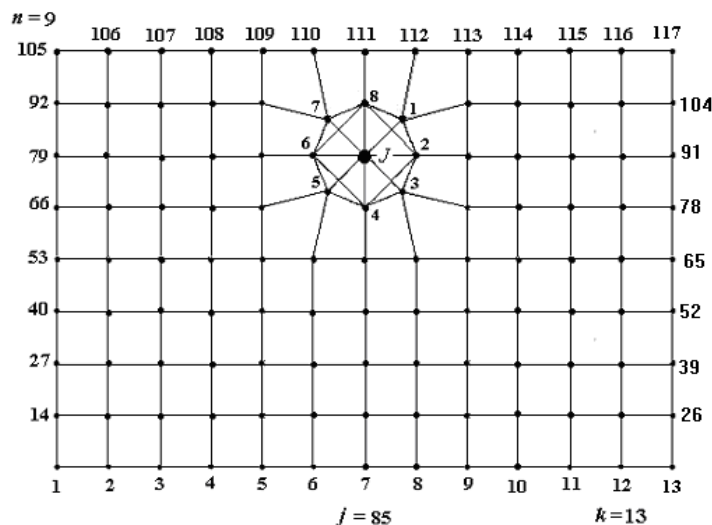


Рис. 2.1. Схема начального состояния области решения на сетке в сечении  $XU$  с впаивным нефтепроводом (диагональные элементы вмещающего массива условно не показаны)

Параметры системы, моделирующей сплошную грунтовую среду с впаивной трубой, наполненной продуктом, назначаются таким образом, чтобы при заданной геометрии на области решения обеспечить эквивалентные с реальной средой жесткостные и инерционные свойства.

Сейсмическая нагрузка на трубу представлена тремя компонентами силового вектора в проекциях на оси  $XYZ'$ .

## 2.1. Осевое нагружение МТ

Продольное усилие  $N_z$  учитывается как компонента вектора сейсмической нагрузки, соответствующая эквивалентным равномерно распределенным касательным напряжениям трения по оси МТ со стороны грунта по окружности внешней поверхности трубы. Учтены усилия, возникающие из-за попадания различных сечений конструкции в разные фазы сейсмических продольных и поперечных волн.

Пусть по трубе со скоростью  $V_k$  распространяется волна деформации  $\varepsilon = f(z - V_k t)$  длиной  $\lambda_0$ . Для синусоидальной волны  $\varepsilon = \varepsilon_k \sin[(2\pi/\lambda_0)(z - V_k t)]$ . Продольные силы  $N_k = EF\varepsilon_k$  от набегающей волны  $k$ -го типа определяются по формуле [3]

$$N_k = EF v_m I(\alpha_k V_k) \leq N_\tau. \quad (2.1)$$

Изгибающие моменты  $M_k$ :

<sup>1</sup> Нормативная оценка сейсмостойкости заглубленных в грунт нефтепроводов [2] регламентирует расчет только на действие продольной сейсмической нагрузки с указанием ускорения по значению балльности землетрясения.



$$M_k = EJ a(t) / (\beta_k V_k)^2. \quad (2.2)$$

Здесь  $E$  – модуль упругости материала трубы;  $F$  и  $J$  – площадь и момент инерции сечения трубы;  $v_m$  – максимум скорости частиц грунта;  $a(t)$  – мгновенные (в момент времени  $t$ ) значения ускорений грунта;  $V_k$  – скорость волны  $k$ -го типа;  $\alpha_k$  и  $\beta_k$  – коэффициенты. Для продольных волн ( $k = 1$ )  $\alpha_1 = 1$ ;  $\beta_1 = 1,6$ ; для поперечных волн ( $k = 2$ )  $\alpha_2 = 2$ ;  $\beta_2 = 1$ .

Скорость  $v_m$  в зависимости от категории грунта по сейсмическим свойствам определяется по формуле  $v_m = v_0 a(t) / g$ , где  $g$  – ускорение свободного падения, и для грунтов I категории  $v_0 = 0,91$  м/с, для грунтов II категории  $v_0 = 1,2$  м/с.

Продольная сила на трубопровод ограничена предельной силой взаимодействия  $N_\tau$  между грунтом и поверхностью трубопровода, определяемой длиной волны  $\lambda_0$  и погонной силой трения  $f_\tau$

$$N_\tau = \frac{1}{4} \lambda_0 f_\tau. \quad (2.3)$$

Длина волны принимается в зависимости от доминантного периода  $T_0$  амплитудного частотного сейсмического спектра, определяемого применением метода БПФ (быстрого преобразования Фурье) к стационарной части расчетной акселерограммы  $\lambda_0 \approx \frac{1}{2} T_0 V_k$ .

Сила трения определяется суммарным действием касательных напряжений по контуру трубы, зависящих от коэффициента трения  $K_T$  и удельного сцепления грунта  $C$

$$f_\tau = 2\pi r (K_T p_s + C) \operatorname{sgn} V, \quad K_T = \operatorname{tg} \varphi_B, \quad (2.4)$$

где  $\varphi_B$  – угол внутреннего трения грунта;  $p_s = \rho_T v_m V_1$  – сейсмическое давление;  $\operatorname{sgn} V$  – знак относительной скорости трения  $V$ .

Для локального значения осевого ускорения трубы  $\ddot{Z}_T$  можно дать оценку, отнесенную по массе к длине волны  $\lambda_0$ :

$$\ddot{Z}_T \approx (N_k - k_r f_\tau) / (\lambda_0 m_T), \quad (2.5)$$

где  $m_T$  – погонная масса МТ;  $k_r < 1$  – коэффициент учета реактивного отпора.

## 2.2. Поперечное нагружение МТ

При поперечной сейсмической нагрузке в оболочке трубы действуют переменные по окружности внутренние усилия, зависящие от угла угловой координаты  $\varphi$  с отсчетом от диаметра, ортогонального направлению действия сейсмической компоненты. Распределение давлений на оболочку радиуса  $R$  с учетом дифракции сейсмической волны, взаимодействующей с трубой в плоскости  $XV$ , нормальной оси трубы, принято в форме треугольника симметрично по осям вдоль компонент  $N_x$  и  $N_y$  вектора нагрузки  $N_{xy}$  с максимумами давлений  $P_x = N_x/R$  и  $P_y =$

$N_y/R$ . Мгновенные значения усилий определяются расчетными ускорениями  $\ddot{X}_T$  и  $\ddot{Y}_T$  центра погонной массы МТ с продуктом. Принятое переменное во времени распределение сейсмических давлений относится и к проекции вектора сейсмической нагрузки на плоскость нормального сечения оболочки с давлением  $P_m = N_{xy}/R$  (рис. 2.2):

$$N_{xy} = \sqrt{N_x^2 + N_y^2} = P_m R, \quad (2.6)$$

и для текущего момента времени учтен поворот исходной локальной системы координат  $XU$  относительно инерциальной системы (и вектора усилий  $N_{xy}$ ) в зависимости от отношения компонент на угол  $\lambda$ :

$$\lambda = \arctg(N_x/N_y) \quad (N_y \neq 0). \quad (2.7)$$

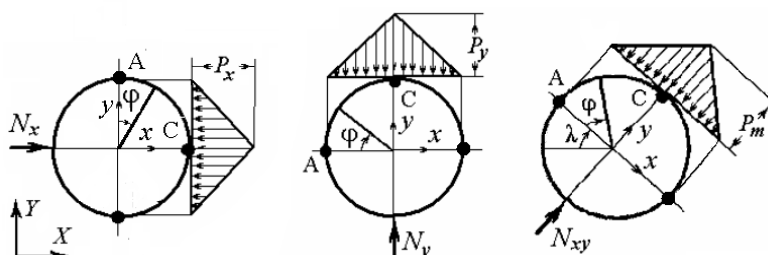


Рис. 2.2. Аппроксимирующие распределенные сейсмические нагрузки на трубу в проекциях на оси инерциальной системы координат  $XU$

Указанные сейсмические воздействия вызывают кольцевой изгиб и сжатие стенки оболочки трубопровода (рис. 2.3).

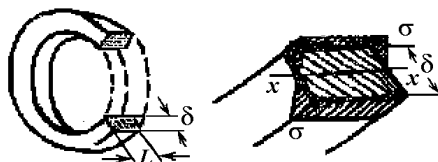


Рис. 2.3. Оболочка единичной длины ( $L = 1$  м) и сечение стенки при кольцевом изгибе и сжатии (показаны напряжения при изгибе)

При треугольной аппроксимации нагрузки с амплитудой сейсмического давления  $p$  нормальная сила  $N$  в стенке оболочки [4]:

$$N = \begin{cases} N_0 \cos \varphi - \frac{1}{2} pR \sin \varphi, & N_0 = -0,02653 pR \quad (0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2} \pi) \\ N_0 \cos \varphi - \frac{1}{2} pR \sin \varphi + \frac{1}{2} pR (1 - \sin \varphi)^2 \sin \varphi & (\frac{1}{2} \pi \leq \varphi \leq \pi) \end{cases}, \quad (2.8)$$

изгибающий момент:

$$M = \begin{cases} 0,305 pR^2 - N_0 R (1 - \cos \varphi) - \frac{1}{2} pR^2 \sin \varphi & (0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2} \pi) \\ 0,305 pR^2 - N_0 R (1 - \cos \varphi) - \frac{1}{2} pR^2 \sin \varphi - \frac{1}{6} pR^2 (1 - \sin \varphi)^3 & (\frac{1}{2} \pi \leq \varphi \leq \pi) \end{cases}. \quad (2.9)$$

Экстремальные значения усилий в опасных точках сечения  $A$  ( $\varphi = 0$  и  $+\pi$ ) и  $C$  ( $\varphi = \pm\pi/2$ ):

*нормальные силы*

$$N_A = -0,02653 pR, \quad N_C = -0,5 pR, \quad (2.10)$$

*изгибающие моменты*

$$M_A = 0,305 pR^2, \quad M_C = -0,16847 pR^2. \quad (2.11)$$

Абсолютные значения диаметральных деформаций расширения  $\delta_x$  и укорочения  $\delta_y$  оболочки

$$\delta_x = 0,1228 P_m R^4 / (EJ_\delta), \quad \delta_y = -0,1220 P_m R^4 / (EJ_\delta), \quad (2.12)$$

где  $J_\delta = \frac{1}{12} \delta^3$  – момент инерции стенки оболочки.

Для расчета заглубленного в грунт трубопровода контур трубы совмещают с элементами сетки (рис. 2.1), и корректируются значения соответствующих узловых масс по контуру трубы. Уменьшение массы узла в зоне объекта (по сравнению с массами узлов в зоне грунтовой среды) эквивалентно снижению плотности моделирующего материала соответствующих стержней, а увеличение масс узлов – повышению плотности. Поскольку шаг счета интегрирования уравнений зависит от размера ячейки сетки, в первом случае автоматически корректируется (в сторону уменьшения) шаг счета, а во втором (увеличения) – счетная вязкость (в методе сквозного счета).

Полагается, что внешнее давление  $P_m$  вызывает только формоизменение оболочки, и гидростатическое давление в жидком продукте, заполняющем оболочку на все сечение, не снижает изгибающих моментов.

### 3. Система уравнений и расчетные соотношения

Система уравнений динамики МТ состоит из уравнений движения и геометрических соотношений, определяющих соотношений для материалов МТ и грунтов, граничных и начальных условий. Начальные условия фиксируются литостатическими давлениями, а граничные – сейсмическими воздействиями. Геометрические соотношения (совместно с выражениями для деформаций, перемещений и скоростей) обеспечивают выполнение условий совместности для компонентов на области решения.

Система уравнений движения  $N$  узлов дискретной топологически регулярной системы для единичной длины трубопровода

$$\ddot{X} = P_x / m, \quad \ddot{Y} = P_y / m \quad (3.1)$$

приводится к системе  $4N$  уравнений первого порядка

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= P_x / m, \quad \dot{V}_y = P_y / m, \\ \dot{X} &= V_x, \quad \dot{Y} = V_y, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $P_x, P_y$  – компоненты усилий на узел массы  $m$  в проекциях на оси инерциальной

системы координат  $XU$ ;  $V_x$  и  $V_y$  – скорости;  $\dot{V}_x$ ,  $\dot{V}_y$  – ускорения узлов.

Усилия  $P_x$ ,  $P_y$  на узлы определяются по напряжениям деформируемых от смещения узлов примыкающих стержней. Усилия на узлы контура трубы представляют дифракционное взаимодействие сейсмических волн в грунте с трубой.

Масса узла равна полусумме масс сходящихся стержней. Текущие координаты узлов  $X_j$  и  $Y_j$  определяются интегрированием уравнений движения при начальных условиях: нулевых скоростях и начальных координатах узлов  $X_{j0}$  и  $Y_{j0}$  с вписанным в расчетную сетку контуром трубы.

В цикле по всем  $N_k$  узлам системы проекции на оси  $XU$  вектора сил на  $J$ -й узел определяются суммированием проекций усилий  $N_i$  в примыкающих стержнях с учетом текущих значений углов наклона  $\psi_i$  стержней к оси  $X$  и массовых сил  $P_{jg}$  от собственного веса грунта и трубы с продуктом и выталкивания от водоизмещения (для обводненной среды)

$$P_{jx} = \sum_{i=1}^8 N_i \cos \psi_i, \quad P_{jy} = \sum_{i=1}^8 N_i \sin \psi_i + P_{jg}. \quad (3.3)$$

Усилия  $N_i$  по напряжениям  $\sigma_i = f(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$  в примыкающих к  $J$ -му узлу стержнях 1 -  $J \dots 8$  -  $J$  с сечениями  $F_i$  определяются их относительными (логарифмическими) деформациями  $\varepsilon$  и скоростями деформаций  $\dot{\varepsilon}$ , вычисляемыми совместно с углами  $\psi_i$  по узловым координатам и их скоростям

$$N_i = f(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i) \cdot F_i, \quad (3.4)$$

где  $f$  – оператор связи напряжений с деформациями и их скоростями с учетом демпфирующих добавок к напряжениям, применяемых в методах сквозного счета в задачах с сильными разрывами на волновых фронтах.

Деформации и скорости деформаций вычисляются по формулам

$$l_i = \sqrt{\bar{X}_i^2 + \bar{Y}_i^2}, \quad \dot{l}_i = (\bar{X}_i \dot{\bar{X}}_i + \bar{Y}_i \dot{\bar{Y}}_i) / l_i, \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_i = \ln(l_i / l_{i0}), \quad \dot{\varepsilon}_i = \dot{l}_i / l_i.$$

Углы наклона стержней

$$\psi_i = \arctg[(Y_i - Y_j) / (X_i - X_j)]. \quad (3.6)$$

Проекции стержней длиной  $l_i$

$$\bar{X}_i = l_i \cos \psi_i, \quad \bar{Y}_i = l_i \sin \psi_i, \quad (3.7)$$

и после дифференцирования по  $t$  получим формулы для угловых скоростей

$$\dot{\psi}_j = \dot{\bar{Y}}_j / \bar{X}_j - \dot{\varepsilon}_j \operatorname{tg} \psi_j = -\dot{\bar{X}}_j / \bar{Y}_j + \dot{\varepsilon}_j \operatorname{tg} \psi_j, \quad (3.8)$$

в которых первый член соответствует угловой скорости элемента как твердого тела, а вторым учитывается влияние скорости осевой деформации. Первая из формул используется при  $|\operatorname{tg} \psi_i| < 1$ , а вторая – при  $|\operatorname{tg} \psi_j| \geq 1$ ,  $|\psi_j| \neq \frac{1}{2}\pi$ . При

$$|\psi_j| = \frac{1}{2}\pi \quad \dot{\psi}_j = -\Delta \dot{\bar{X}}_j / \Delta \bar{Y}_j.$$

Последовательность вычислений такова: определяются параметры движения узлов; уточняются деформации и усилия в стержнях от движения узлов, и значения усилий передаются на узлы; смещения узлов определяются решением системы уравнений движения этих узлов.

#### 4. Граничные условия. Сейсмическая информация

Полагается, что направление вектора сейсмической волны является заданным по результатам наблюдений [5]. При действии на трубопровод волны узловые нагрузки определяются через погонные нагрузки, приложенные по нормали и вдоль оси трубы. В общем случае компоненты сейсмической нагрузки в прямоугольной системе координат будут действовать под некоторыми углами к оси (рис. 4.1).

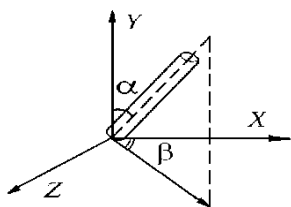


Рис. 4.1. Схема произвольной ориентации оси трубы относительно сейсмического вектора, реализуемого при нагружении трубопровода сейсмическими волнами тремя компонентами сейсмике в инерциальной системе координат  $XYZ$

Суммарные погонные поперечные и продольные нагрузки на трубопровод по компонентам усилий по осям вырабатываются автоматически при интегрировании уравнений движения узловых масс среды при взаимодействии волн с трубой. Это обеспечивается назначением граничных условий на внешнем контуре области решения вводом для контурных узлов нижней границы области вертикальных и горизонтальных ускорений, а также ускорений вдоль оси МТ числовыми массивами сбалансированных и (при необходимости) нормированных на задаваемую сейсмичность трех акселерограмм, возбуждающих во вмещающем массиве продольные и поперечные волны.

Исходные (записанные на сейсмостанциях) акселерограммы обычно нуждаются в обработке: восстановлении нулевой линии, удалении трендов, балансировке и нормировании, а также в отсечении участков записей, не несущих значимой информации. Указанные операции осуществляются программой «NORMAS». Для примера на рис. 4.2 показана исходная запись, а на рис. 4.3 – одна из трех акселерограмм, подготовленных этой программой для расчета МТ пространственным нагружением сейсмикой (по трем осям).

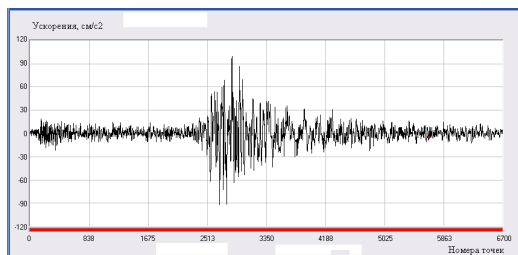


Рис. 4.2. Акселерограмма.  
Исходная запись

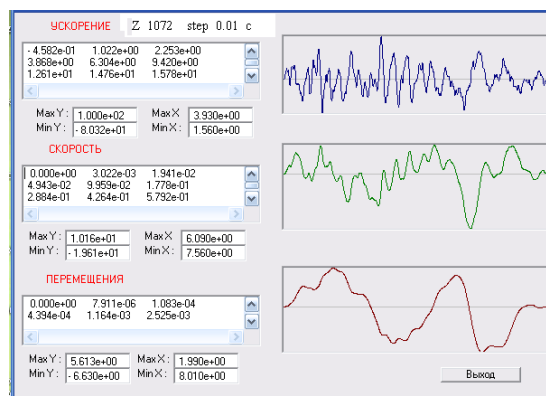


Рис. 4.3. Информативный участок акселерограммы, сбалансированной и нормированной на 7 баллов, и велосигграмма и сейсмограмма, полученные интегрированием акселерограммы

## 5. Начальные условия. Статика МТ

Динамический анализ МТ на сейсмические воздействия предполагает предварительный расчет на действие начальных статических нагрузок для учета начальных напряжений при формировании полного тензора напряжений в оболочке МТ для допредельной упругой фазы деформаций суммированием с динамическими напряжениями.

Начальные условия, вызывающие статическое нагружение МТ и напряжения вмещающей среды с МТ, составляют:

1. литостатические давления;
2. выталкивающие силы водоизмещения и внешнее градиентное гидростатическое давление (для случая обводненной среды);
3. кривизну МТ согласно местной геологии;
4. температурный перепад (разность температур текущей и при прокладке МТ);
5. внутреннее гидростатическое давление транспортируемого продукта.

Статический расчет объекта по набору веса элементами конструкции до номинала к моменту  $t_k$  осуществляется автоматически с использованием релаксационной зависимости для ускорения свободного падения  $g(t)$  при вычислении  $P_{Jg}$  в формуле (3.3): при  $0 < \alpha \equiv t/t_k \leq 1$   $g(t) = g_0 \alpha^3 (6\alpha^2 - 15\alpha + 10)$ , удовлетворяющей условиям  $g(0) = \dot{g}(0) = \ddot{g}(0) = \dot{g}(t_k) = \ddot{g}(t_k) = 0$  и  $g(t_k) = g_0$  при повышенных параметрах демпфирования, уменьшающих динамические эффекты и минимизирующих время  $t_k$ . Порядок значения  $t_k$  соответствует времени 5 - 10 пробегов упругой волны вдоль вертикального габарита области решения. Данный алгоритм применен и для расчета волновых полей для всей области решения с учетом значений (полных и неполных – граничных) масс узлов вмещающего массива.

Действие погонной силы от веса грунта над трубой  $G_1$  определяется по формуле

$$G_1 = 2\rho ghR, \quad (5.1)$$

а выталкивающей силы водоизмещения  $G_2$  – из выражения

$$G_2 = \pi\rho_B gR^2, \quad (5.2)$$

где  $\rho$  и  $\rho_B$  – плотность грунта и воды;  $h$  – толщина грунтовой засыпки.

В случае обводненной среды кроме выталкивающей силы на трубопровод будет действовать гидростатическое давление, изменяющееся с глубиной  $y$  как  $p_y = \rho_B gy$  с градиентом 10 кПа/м (при плотности для воды  $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$ ). Среднее внешнее гидростатическое давление на реальных заглублениях МТ может крайне слабо разгружать внутреннее гидростатическое давление транспортируемого продукта, и в запас расчета внешнее давление воды  $p_y$  далее не принимается во внимание.

Возможное искривление МТ при укладке в условиях местного рельефа вызывает статический изгиб трубопровода в вертикальной плоскости, и значение изгибающего момента  $M_{kr}$  в зависимости от кривизны  $K_R$  и изгибной жесткости  $EJ$  трубы

$$M_{kr} = K_R EJ. \quad (5.3)$$

Текущая температура трубопровода ( $T_2$ ) при эксплуатации обычно отличается от начальной температуры ( $T_1$ ) при строительстве, и температурный перепад  $\Delta T = T_2 - T_1$  вызывает в оболочке продольные усилия  $N_T$ , зависящие от продольной жесткости  $EF$  сечения трубы и коэффициента  $\alpha$  температурного расширения материала, (для стали  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ )

$$N_T = -\alpha \Delta T EF, \quad (5.4)$$

усилие  $N_T$  вызывает осевое сжатие МТ при  $\Delta T > 0$  и растяжение при  $\Delta T < 0$ .

Гидростатическое давление  $P_g$  транспортируемого продукта вызывает кольцевые растягивающие усилия  $N_p$  в стенке трубы

$$N_p = P_g R, \quad (5.5)$$

и осевые усилия  $N_\mu = \mu N_p$ , зависящие от коэффициента Пуассона  $\mu$ , и  $N_{gos} = (1 - K_z) F_0 P_g$  с коэффициентом защемления  $K_z$  трубопровода в грунте при давлении  $P_g$  на торцевую площадь трубы  $F_0 = \pi R^2$

$$N_{pz} = N_\mu + N_{gos}. \quad (5.6)$$

## 6. Выбор теории прочности для определения эквивалентных напряжений

Эквивалентные напряжения в МТ определяются НДС от полной системы статических и динамических нагрузок. Трубопровод нагружен статически (см. начальные условия), а также динамически - сейсмическими воздействиями. В об-

щем случае сейсмическая нагрузка на трубу определяется вектором сил от продольной и поперечной сейсмических волн, распространяющихся под некоторыми углами к оси трубы.

Оценка ресурса прочности трубопровода дается по экстремумам изменяющихся во времени расчетных и эквивалентных напряжений от сейсмике с учетом начальных статических напряжений в опасных сечениях и точках стенки оболочки трубы заглубленного в грунт МТ.

Эквивалентное напряжение  $\sigma_3$  определим по энергетической теории прочности в главных напряжениях

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)}.$$

### 7. НДС и эквивалентные напряжения в начальных условиях

В условиях статики оболочка напряжена вдоль оси  $Z$ , а в плоскости  $XU$  находится в симметричном деформированном состоянии (поскольку  $\lambda = 0$ ), и напряжения рассматриваются в двух опасных сечениях стенки трубы (в точках:  $A$  и  $C$ , рис. 7.1).

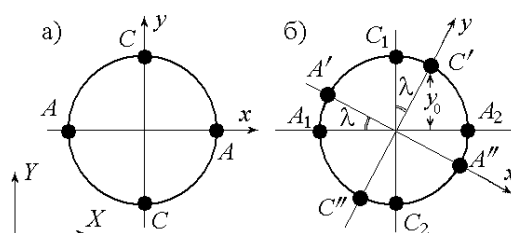


Рис. 7.1. Опасные точки в нормальном сечении МТ:

- а) в статике (начальные условия);  
б) при сейсмических воздействиях с учетом статических напряжений

При совместном действии веса засыпки грунта и возможного водоизмещения оболочка сжимается по вертикали от усилия  $G$  по (5.1) и (5.2)  $G = G_1 + G_2$  (отпором бокового давления пренебрегается в запас расчета):

$$G = Rg(2\rho h + \pi\rho_B R). \quad (7.1)$$

От обжимающего давления с максимумом  $P = G/R$  при возникающих сжимающих усилиях  $N_{A/C}$  (1.11) и моментах  $M_{A/C}$  (1.12) в опасных точках кольцевого сечения оболочки действуют

нормальные напряжения:

$$\sigma_{NA/NC} = N_{A/C} / F_\delta, \quad (7.2)$$

фибровые нормальные изгибные напряжения:

$$\sigma_{MA/MC} = \pm M_{A/C} / W_\delta, \quad (7.3)$$

где  $F_\delta = \delta$  и  $W_\delta = \frac{1}{6}\delta^2$  – площадь поперечного сечения и момент сопротивления



стенки оболочки на единицу ее длины.

При наличии начальной кривизны  $K_R \neq 0$  (5.3) возникают фибровые нормальные изгибные напряжения в вертикальной плоскости, которые в точках  $C$  нормального сечения определяются по формуле (в точках  $A$  на нейтральной оси напряжения отсутствуют)

$$\sigma_{C,kr} = \pm M_{kr} R / J = \pm K_R ER, \quad (7.4)$$

где  $J$  – момент инерции поперечного сечения оболочки радиуса  $R$  с модулем упругости  $E$ .

При наличии температурного перепада  $\Delta T \neq 0$  (1.5) осевые равномерные по сечению (и в точках  $A$  и  $C$ ) напряжения определяются из выражения

$$\sigma_{\Delta T} = N_T / F = \alpha \cdot \Delta T E. \quad (7.5)$$

От гидростатического давления продукта  $P_g$  (5.5) кольцевые растягивающие равномерные по сечению (и в точках  $A$  и  $C$ ) напряжения равны

$$\sigma_g = N_p / F_\delta = P_g R / \delta, \quad (7.6)$$

вызывая от усилия  $N_{pz}$  (1.7) осевые напряжения

$$\sigma_\mu = N_\mu / F, \quad \sigma_{gos} = N_{gos} / F. \quad (7.7)$$

Суммируя напряжения на ортогональных площадках опасных сечений стенки трубы, запишем формулы для главных напряжений при определении эквивалентных напряжений:

*в опасной точке A*

$$\sigma_1 = \sigma_{NA} + \sigma_{MA} + \sigma_g, \quad \sigma_2 = \sigma_{\Delta T} + \sigma_\mu + \sigma_{gos}; \quad (7.8)$$

*в опасной точке C*

$$\sigma_1 = \sigma_{NC} + \sigma_{MC} + \sigma_g, \quad \sigma_2 = \sigma_{C,kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_\mu + \sigma_{gos}. \quad (7.9)$$

При определении тензора напряжений и эквивалентных напряжений от совместного действия статических и сейсмических нагрузок будут использованы статические компоненты для опасных точек сечений от сеймики.

## 8. НДС и эквивалентные напряжения при сейсмических воздействиях

Возникающие при сейсмических воздействиях (сейсме) динамические напряжения в пределах линейного поведения металла суммируются со статическими напряжениями. При сейсме МТ догружается переменными во времени продольным усилием  $N_k$  (2.1), волновым изгибающим моментом  $M_k$  (2.2) и динамическим обжатием с вектором  $N_{xy}$  (2.6) переменного наклона  $\lambda$  (2.7). При этом форма деформирования оболочки МТ теряет симметрию, и появляются дополнительные опасные точки общим числом 8 (рис. 7.1б).

Рассмотрим сначала динамические напряжения от сейсмических воздействий, а затем суммарные напряжения (с учетом статических напряжений) для расчета по ним эквивалентных напряжений.

### 8.1. Динамические напряжения от сеймики

Продольная компонента сейсмической нагрузки  $N_k$  (2.1) вызывает равномерно распределенные на площади сечения  $F$  (то есть во всех опасных точках), изменяющиеся со временем знакопеременные нормальные напряжения

$$\sigma_z = \pm N_k/F. \quad (8.1)$$

При волновом изгибе МТ в вертикальной плоскости  $YZ$  от изгибающего момента  $M_k$  (2.2) нормальные осевые напряжения  $\sigma_{zm}$  в опасных точках в плоскости  $XU$  зависят от ординаты  $y_0$ , которую можно связать с угловой координатой  $\eta$

$$\sigma_{zm} = M_k y_0(\eta)/J, \quad y_0 = \pm R \sin \eta \quad (y_0 \neq 0). \quad (8.2)$$

Наиболее напряженные сечения от момента  $M_k$  при  $\eta = \pm \pi/2$  – в точках  $C_1$  и  $C_2$ .

При обжатию трубы вектор сейсмической силы  $N_{xy}$  в плоскости  $XU$  имеет наклон  $\lambda$  (2.7), и от внутренних динамических усилий  $N^\delta$  и  $M^\delta$  в стенке трубы кольцевые нормальные и изгибные напряжения определяются по формулам, в которых усилия даются по (2.8) и (2.9) с сейсмическим давлением  $P_m = N_{xy}/R$ , зависящим от мгновенного значения вектора  $N_{xy}$ . Для опасной точки в системе  $XU$  с угловой координатой  $\eta$  формулы для усилий и напряжений в стенке трубы (при  $\varphi = \eta - \lambda$ ) следующие<sup>2</sup>:

*нормальная сила*

$$N^\delta = -P_m R (0,02653 \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi), \quad (8.3)$$

*изгибающий момент*

$$M^\delta = P_m R^2 (0,305 + 0,02653 (1 - \cos \varphi) - \frac{1}{2} \sin \varphi), \quad (8.4)$$

*нормальные сжимающие напряжения*

$$\sigma_{Nd}^\eta = N^\delta(\varphi)/F_\delta, \quad (8.5)$$

*нормальные фибровые изгибные напряжения*

$$\sigma_{Md}^\eta = \pm M^\delta(\varphi)/W_\delta. \quad (8.6)$$

Для опасных точек  $A'$  и  $A''$   $\varphi = 0$  и  $\varphi = \pi$ , для точек  $C'$  и  $C''$   $\varphi = \pm \pi/2$ .

### 8.2. Расчетные и эквивалентные напряжения от сеймики с учетом статических напряжений

Приведенные выше соотношения позволяют определить тензор расчетных (суммарных) напряжений в произвольном сечении МТ, в частности, – в наиболее напряженных в статике и в динамике опасных точках, отмеченных на рис. 7.1.

<sup>2</sup> Для краткости приведены формулы диапазона  $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ . Для полного диапазона см. (2.8) и (2.9).

### 8.2.1. Общий случай

Для  $i$ -й точки произвольного сечения с координатой  $\eta_i$ , группируя напряжения на ортогональных площадках и помечая верхним индексом  $\eta$  напряжения, зависящие от наклона вектора  $N_{xy}$ :

главные статические напряжения

$$(\sigma_i^s)_1 = \sigma_{Ns,i}^\eta + \sigma_{Ms,i}^\eta + \sigma_g, \quad (\sigma_i^s)_2 = \sigma_{kr,i}^\eta + \sigma_{\Delta T} + \sigma_\mu + \sigma_{gos}, \quad (8.7)$$

в которых от усилий  $N$  и  $M$  по (2.8) и (2.9) и от кривизны рельефа по (5.3)

$$\sigma_{Ns,i}^\eta = N_i(\eta)/F_\delta, \quad \sigma_{Ms,i}^\eta = \pm M_i(\eta)/W_\delta, \quad \sigma_{kr,i}^\eta = \pm M_{kr} R \sin \eta / J. \quad (8.8)$$

Динамические напряжения по (8.5) и (8.6), от осевой силы  $N_k$  и волнового момента  $M_k$

$$(\sigma_i^d)_1 = \sigma_{Nd,i}^\eta + \sigma_{Md,i}^\eta, \quad (\sigma_i^d)_2 = \sigma_Z + \sigma_{Zm}^\eta, \quad \sigma_{Zm}^\eta = \pm M_k R \sin \eta / J. \quad (8.9)$$

Расчетные главные напряжения в  $i$ -й опасной точке для определения эквивалентных напряжений следующие:

$$\sigma_1 = \sigma_{Ns,i}^\eta + \sigma_{Ms,i}^\eta + \sigma_g + \sigma_{Nd,i}^\eta + \sigma_{Md,i}^\eta, \quad (8.10)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{kr,i}^\eta + \sigma_{\Delta T} + \sigma_\mu + \sigma_{gos} + \sigma_Z + \sigma_{Zm}^\eta. \quad (8.11)$$

### 8.2.2. Опасные сечения трубы и опасные точки $A$ и $C$

Как показал анализ практического нагружения МТ, наиболее напряженными точками сечений оболочки трубопровода являются точки  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $C_1$  и  $C_2$  (далее обозначенных  $A$  – верхняя точка и  $C$  – боковая точка). Поэтому осуществляется также контроль ресурса прочности МТ по эквивалентным напряжениям в этих точках. Система напряжений в точках  $A$  и  $C$  приведена в таблицах 2 и 3, в которой динамические напряжения от обжатия оболочки в плоскости  $XU$  определяются совместным действием компонентов сейсмических усилий  $N_x$ ,  $N_y$  и давлений  $P_x = N_x/R$ ,  $P_y = N_y/R$ :

$$\sigma_{SMA} = -(0,02653 P_y + 0,5 P_x) R / \delta; \quad \sigma_{SMA} = 6(0,305 P_y - 0,16847 P_x) R^2 / \delta^2; \quad (8.12)$$

$$\sigma_{SNC} = -(0,02653 P_x + 0,5 P_y) R / \delta; \quad \sigma_{SNC} = 6(-0,16847 P_x + 0,305 P_y) R^2 / \delta^2. \quad (8.13)$$

Формулы для напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в таблицах, а также (8.10) и (8.11) – символические, поскольку экстремумы динамических напряжений достигаются в различные моменты времени, то есть не суммируются, и ресурс прочности необходимо оценивать по мгновенному значению в момент  $t_m$  глобального экстремума  $\sigma_{EG}$  из числа экстремумов эквивалентных напряжений, вычисленных для всех сочетаний знакопеременных компонентов тензора напряжений. При этом возможны случаи, когда в момент  $t_m$  значения компонентов тензора напряжений не экстремальны.

Таблица 2. Система напряжений в опасной точке *A*

<b>Статические напряжения</b>		<b>Динамические напряжения</b>	
Сжатие стенки	$\sigma_{NA}$	Сжатие стенки	$\sigma_{SNA}$
Изгибные в стенке	$\pm\sigma_{MA}$	Изгибные в стенке	$\pm\sigma_{SMA}$
Изгибные от кривизны рельефа	$\pm\sigma_{kr}$	Осевые продольные	$\pm\sigma_Z$
Основные от температурного перепада	$\sigma_{\Delta T}$	Осевые изгибные	$\pm\sigma_{Zm}$
Кольцевые растяжения от давления продукта	$\sigma_g$		
Осевые от давления продукта («Пуассона»)	$\sigma_{\mu}$		
Осевые от давления продукта на торец	$\sigma_{gos}$		
<b>Главные напряжения</b>		<b>Главные полные напряжения</b>	
$\sigma_1 = \sigma_{NA} \pm \sigma_{MA} + \sigma_g$		$\sigma_1 = \sigma_{NA} \pm \sigma_{MA} + \sigma_g + \sigma_{SNA} \pm \sigma_{SMA}$	
$\sigma_2 = \pm \sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos}$		$\sigma_2 = \pm \sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} \pm \sigma_Z \pm \sigma_{Zm}$	

Таблица 3. Система напряжений в опасной точке *C*

<b>Статические напряжения</b>		<b>Динамические напряжения</b>	
Сжатие стенки	$\sigma_{NC}$	Сжатие стенки	$\sigma_{SNC}$
Изгибные в стенке	$\pm\sigma_{MC}$	Изгибные в стенке	$\pm\sigma_{SMC}$
Изгибные от кривизны рельефа	$\pm\sigma_{kr}$	Осевые продольные	$\pm\sigma_Z$
Основные от температурного перепада	$\sigma_{\Delta T}$	Осевые изгибные	$\pm\sigma_{Zm}$
Кольцевые растяжения от давления продукта	$\sigma_g$		
Осевые от давления продукта («Пуассона»)	$\sigma_{\mu}$		
Осевые от давления продукта на торец	$\sigma_{gos}$		
<b>Главные напряжения</b>		<b>Главные полные напряжения</b>	
$\sigma_1 = \sigma_{NC} \pm \sigma_{MC} + \sigma_g$		$\sigma_1 = \sigma_{NC} \pm \sigma_{MC} + \sigma_g + \sigma_{SNC} \pm \sigma_{SMC}$	
$\sigma_2 = \pm \sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos}$		$\sigma_2 = \pm \sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} \pm \sigma_Z \pm \sigma_{Zm}$	

## 9. Определение ресурса прочности МТ

Рассмотренные системы нагрузок на МТ, внутренних усилий и напряжений приводят к анализу плоского напряженного состояния с эквивалентным напряжением

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}. \quad (9.1)$$

В динамических условиях  $\sigma_s$  – функция времени, и при  $i$ -м сочетании изменяющихся со временем динамических главных напряжений ее экстремум – частное значение эквивалентного напряжения  $\sigma_{si}$ . Наибольшее из  $\sigma_{si}$  представляет расчетное напряжение  $\sigma_{ЭГ}$ .

Условие обеспеченной прочности дается сравнением экстремумов компонентов тензора напряжений  $\sigma_i$  и эквивалентного напряжения  $\sigma_{ЭГ}$  в опасных точках с предельно допустимым напряжением  $[\sigma_d]$

$$\sigma_i \leq [\sigma_d], \quad \sigma_{ЭГ} \leq [\sigma_d], \quad (9.2)$$

и при удовлетворении неравенств ресурс прочности  $R_{пр}$  определяется по максимальному ( $\sigma_m$ ) из этих напряжений

$$R_{пр} = 1 - \sigma_m / [\sigma_d]. \quad (9.3)$$

Напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  с возможными вариациями знакопеременных параметров при оценке ресурса контролем в опасных точках  $A$  и  $C$  определяются с использованием следующих соотношений.

Для точки  $A$  и напряжения  $\sigma_1$  – двузначные компоненты изгибных напряжений  $\pm\sigma_{MA}$  и  $\pm\sigma_{SMA}$  могут также менять знак от полигармонической функции (акселерограммы) сейсмического воздействия. Принимая в запас расчета одинаковыми знаками для статического и динамического изгибных напряжений, запишем возможные сочетания напряжений в новых обозначениях:

$$X_{11} = \sigma_{NA} + \sigma_{MA} + \sigma_g + \sigma_{SNA} + \sigma_{SMA}; \quad (9.4)$$

$$X_{12} = \sigma_{NA} - \sigma_{MA} + \sigma_g + \sigma_{SNA} - \sigma_{SMA}. \quad (9.5)$$

Для точки  $A$  и напряжения  $\sigma_2$ :

$$X_{21} = +\sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} + \sigma_Z + \sigma_{Zm}, \quad (9.6)$$

$$X_{22} = -\sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} + \sigma_Z + \sigma_{Zm}, \quad (9.7)$$

$$X_{23} = +\sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} + \sigma_Z - \sigma_{Zm}, \quad (9.8)$$

$$X_{24} = -\sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} + \sigma_Z - \sigma_{Zm}, \quad (9.9)$$

$$X_{25} = +\sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} - \sigma_Z + \sigma_{Zm}, \quad (9.10)$$

$$X_{26} = -\sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} - \sigma_Z + \sigma_{Zm}, \quad (9.11)$$

$$X_{27} = +\sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} - \sigma_Z - \sigma_{Zm}, \quad (9.12)$$

$$X_{28} = -\sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} - \sigma_Z - \sigma_{Zm}. \quad (9.13)$$

Для точки  $C$  применены те же соотношения, в которых параметры  $\sigma_{NA}, \sigma_{MA}, \sigma_{SNA}, \sigma_{SMA}$  заменяются на  $\sigma_{NC}, \sigma_{MC}, \sigma_{SNC}, \sigma_{SMC}$ , то есть  $X_{11}$  заменяется на  $X_{13}, X_{12}$  на  $X_{14}$ :

$$X_{13} = \sigma_{NC} + \sigma_{MC} + \sigma_g + \sigma_{SNC} + \sigma_{SMC}, \quad (9.14)$$

$$X_{14} = \sigma_{NC} - \sigma_{MC} + \sigma_g + \sigma_{SNC} - \sigma_{SMC}. \quad (9.15)$$

Имеем 32 сочетания напряжений для  $\sigma_1 - \sigma_2$ :

для точки  $A$ :

- 1)  $X_{11} - X_{21}$ , 2)  $X_{11} - X_{22}$ , 3)  $X_{11} - X_{23}$ , 4)  $X_{11} - X_{24}$ , 5)  $X_{11} - X_{25}$ , 6)  $X_{11} - X_{26}$ ,  
7)  $X_{11} - X_{27}$ , 8)  $X_{11} - X_{28}$ , 9)  $X_{12} - X_{21}$ , 10)  $X_{12} - X_{22}$ , 11)  $X_{12} - X_{23}$ , 12)  $X_{12} - X_{24}$ ,  
13)  $X_{12} - X_{25}$ , 14)  $X_{12} - X_{26}$ , 15)  $X_{12} - X_{27}$ , 16)  $X_{12} - X_{28}$ ;

для точки  $C$ :

- 17)  $X_{13} - X_{21}$ , 18)  $X_{13} - X_{22}$ , 19)  $X_{13} - X_{23}$ , 20)  $X_{13} - X_{24}$ , 21)  $X_{13} - X_{25}$ , 22)  $X_{13} - X_{26}$ ,  
23)  $X_{13} - X_{27}$ , 24)  $X_{13} - X_{28}$ , 25)  $X_{14} - X_{21}$ , 26)  $X_{14} - X_{22}$ , 27)  $X_{14} - X_{23}$ , 28)  $X_{14} - X_{24}$ ,  
29)  $X_{14} - X_{25}$ , 30)  $X_{14} - X_{26}$ , 31)  $X_{14} - X_{27}$ , 32)  $X_{14} - X_{28}$ .

Глобальное значение эквивалентного напряжения определяется поиском экстремума в цикле  $k = 1 \dots 32$ ,  $i = 11 \dots 14$ ,  $j = 21 \dots 28$ :

$$\sigma_{\text{эГ}} = \left| \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2 - \sigma_i \sigma_j} \right|_k^{\max} \quad (9.16)$$

Напомним, что динамические напряжения в формулах (9.4) - (9.15) – не экстремумы, а изменяющиеся со временем функции сейсмических воздействий.

### Выводы

1. Разработана модель расчета нефтепровода на прочность, учитывающая действующие на нефтепровод не только статические, но и динамические нагрузки, возникающие в процессе взаимодействия с сейсмическими волнами.

2. Представленная динамическая модель обеспечивает комплексный анализ прочности магистрального трубопровода при сейсмических воздействиях, что позволяет существенно повысить точность оценки напряженного состояния заглубленного в грунт трубопровода.

3. На основе модели динамического анализа прочности магистральных нефтепроводов на сейсмические воздействия созданы алгоритмы и программные средства прочностных расчетов нефтепроводов, проложенных в сложных геологических условиях.

*Работа, результаты которой использованы в данной научной публикации, выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.*

### Литература

1. Котляревский В.А., Ларионов В.И., Сущев С.П. Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология. Т. 2. М.: Изд-во АСВ, 2008. 632 с.
2. СНиП III-42-80. Магистральные трубопроводы / Госстрой СССР. Введ. 01.01.81. М., 2001. 38 с.
3. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций / Госатомнадзор РФ. Введ. 01.01.2002. М., 2002. 25 с.
4. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Т. 1. М.: Машиностроение, 1968. 829 с.
5. Котляревский В.А., Ларионов В.И., Сущев С.П. Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология. Т. 3. М.: Изд-во АСВ, 2010. 633 с.

## THE MODEL OF DYNAMIC ANALYSIS OF SEISMIC EFFECTS STRENGTH OF MAIN PIPELINES

A.A. Aleksandrov

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
e-mail: rector@bmstu.ru*

V.A. Kotlyarevskiy, V.I. Larionov

*Extreme Situations Research Center of Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, Russia, e-mail: kotlyarevsky22@mail.ru, lar@esrc.ru*

Yu.V. Lisin

*Transneft JSC, Moscow, Russia  
e-mail: transneft@ak.transneft.ru*

**Abstract.** *The model which is the method of dynamic analysis of stressed-deformed state (SDS) and parameters of the dynamics of the linear part of the main pipeline buried into the soil on seismic loads with optional orientation of the pipeline line towards wave vector was studied. Models of materials and soil are offered. The algorithm of the decision of a problem is developed. The stress on the pipeline by the seismic waves is considered on three components in rectangular system of coordinates.*

**Keywords:** *main oil pipeline, soil, load, internal forces, temperature drop, accelerogram, Fourier transform*

### References

1. Kotlyarevskii V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. Entsiklopediya bezopasnosti. Stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. Tom 2 (Safety encyclopedia. Construction, industry, and ecology. Vol. 2). Moscow: ASV, 2008. 632 p.
2. SNiP III-42-80. Magistral'nye truboprovody (Main pipelines) / Gosstroy USSR. Moscow, 2001. 38 p.
3. NP-031-01. Normy proektirovaniya seismostoikikh atomnykh stantsii (Norms for seismic-resistant design of nuclear power plants (NPP)) / Gosatomnadzor. Moscow, 2002. 25 p.
4. Birger I.A., Panovko Ya.G. Prochnost, ustoichivost, kolebaniya. Tom 1 (Strength, stability, oscillations. Vol. 1). Moscow: Mashinostroenie, 1968. 829 p.
5. Kotlyarevskii V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. Entsiklopediya bezopasnosti. Stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. Tom 3 (Safety encyclopedia. Construction, industry, and ecology. Vol. 3). Moscow: ASV, 2008. 633 p.