

# Оценка сейсмической уязвимости магистральных трубопроводов в условиях дефицита информации

**А.А. Александров**, ректор, зав. каф. «Экология и промышленная безопасность», профессор, д-р техн. наук

**В.А. Котляревский**, главный научный сотрудник Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций, д-р тех. наук, профессор

**В.И. Ларионов**, заместитель директора по научной работе Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций, д-р техн. наук, профессор

**С.П. Суцев**, директор Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций, д-р техн. наук, профессор

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

e-mail: rector@bmstu.ru, kotlyarevsky22@mail.ru, lar@esrc.ru, esrc@esrc.ru

## Ключевые слова:

трубопровод,  
уязвимость,  
повреждение,  
сейсмическое воздействие,  
акселерограмма,  
динамический расчет.

*Эксплуатация в сложных природно-климатических условиях и большая протяженность магистральных газонефтепроводов обуславливает необходимость поиска новых решений для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации объектов трубопроводного транспорта. Предложенная в статье методика основана на построении функции сейсмической уязвимости заглубленного в грунт магистрального трубопровода расчетным динамическим анализом напряженно-деформированного состояния в условиях недостатка экспериментальной информации.*

## 1. Введение

Землетрясение — одна из немногих природных опасностей, для которых в России и других странах накоплен, обобщен и частично проанализирован значительный массив данных о разрушении различных строительных объектов при сейсмическом воздействии разной интенсивности. Основные результаты такого анализа представляют законы разрушения зданий и сооружений в виде зависимостей, получивших название функций сейсмической уязвимости.

Функции сейсмической уязвимости связывают вероятность наступления не менее определенной или определенной степени повреждения объекта с интенсивностью землетрясения. Известные функции уязвимости получены, как правило, на основе статистической обработки материалов последствий землетрясений.

Поражающее сейсмическое действие землетрясения на объекты обычно описывают случайной величиной, а функцию уязвимости аппроксимируют одномерной нормальной функцией. В связи с дефицитом сейсмической информации и недостатком объективных данных о последствиях опасного воздействия на магистральные трубопроводы (МТ) предлагается для

критериев повреждаемости (уязвимости) трубопроводов использовать расчетный аппарат — апробированные программные средства математического моделирования динамики МТ на сейсмические воздействия.

Объекты нефтегазового комплекса характеризуются высокой уязвимостью при сейсмическом воздействии с серьезными техническими, экономическими и экологическими последствиями. Поэтому предлагаемый новый метод оценки сейсмической уязвимости МТ в условиях дефицита информации является эффективным средством повышения сейсмической безопасности трубопроводного транспорта.

Рассмотрим в качестве элементов риска МТ, транспортирующие углеводородное сырье — нефть и газ. Повреждения линейной части (ЛЧ) МТ охарактеризуем тремя степенями: слабые, средние и полные. К слабым повреждениям отнесем упругую деформацию линейной части и пластическую деформацию отдельных участков без нарушения герметичности трубопровода. К средним — значительные пластические деформации линейной части, образование свищей на отдельных участках трубопровода. Полным повреждением (или разрушением) будем считать большие горизонтальные и вертикальные смещения линейной части, массовое

образование свищей и трещин, «гилютинный разрыв» трубопровода на отдельных участках.

Каждой степени уязвимости поставим в соответствие два граничных параметра (сейсмической интенсивности) интервала реализации допустимых повреждений с аппроксимацией по нормальному распределению. Указанные граничные значения сейсмичности будем устанавливать посредством динамического расчета МТ.

## 2. Определение параметров нормального закона распределения

Одномерная нормальная функция распределения случайной величины  $x$  на расчетном интервале  $\alpha \leq t \leq \beta$  определяется двумя параметрами — математическим ожиданием  $\mu$  случайной величины и средним квадратическим отклонением  $\sigma$ , задаваемыми соотношениями [1]

$$\mu = \frac{1}{2}(\beta + \alpha); \quad \sigma = \frac{1}{6}(\beta - \alpha).$$

С использованием аргумента  $x = \frac{t - \mu}{\sigma}$  со значением  $t$  на указанном выше интервале и функции распределения Лапласа

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

значения функции распределения случайной величины можно определить всего лишь по значениям двух параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , которые далее устанавливаются динамическим расчетом. На практике значения  $\Phi(x)$  определяются по таблице 1 [2].

Таблица 1

Табличные значения функции  $\Phi(x)$ <sup>1</sup>

$x$	$\Phi(x), \%$	$x$	$\Phi(x), \%$	$x$	$\Phi(x), \%$	$x$	$\Phi(x), \%$
-3,00	0,14	-1,00	15,87	1,00	84,13	2,00	97,72
-2,00	2,28	0	50	1,50	93,32	3,00	99,86

## 3. Построение функций уязвимости

Функция сейсмической уязвимости МТ связывает степень повреждения объекта с уровнем сейсмического воздействия и в условиях дефицита информации о сейсмостойкости определяется следующим образом.

1) На основании [3] и сертификата на трубы устанавливаются значения  $R_{\text{расч}}$ ,  $R_r$ ,  $R_b$  и  $R_{b+3\sigma}$ , соответствующие границам интервалов различных степеней повреждений трубопровода.

- 2) Определяется сейсмическое воздействие на трубопровод по данным сейсмометрических станций в виде базовой акселерограммы, отобранной из числа записей прошедших ранее землетрясений в районе трубопровода или зафиксированных в местностях с аналогичными сейсмическими условиями.
- 3) Генерируется ансамбль синтетических акселерограмм со спектральными свойствами базовой акселерограммы.
- 4) Проводится динамический расчет статически нагруженного трубопровода на сейсмические воздействия в соответствии с акселерограммами, нормированными на последовательные значения амплитуд ускорений грунта, вызывающих указанные выше граничные напряжения в трубопроводе. При этом переход от амплитуд ускорений к интенсивностям землетрясения в баллах осуществляется с учетом следующих рекомендаций [3]: амплитудам ускорений 1, 2, 4 и 8 м/с<sup>2</sup> соответствуют интенсивности землетрясений в 7, 8, 9 и 10 баллов.
- 5) Выполняется построение кривых вероятности наступления не менее заданных степеней повреждений. Здесь необходимо учитывать, что границами расчетного участка  $\alpha$  и  $\beta$  являются границы интенсивности степеней повреждения трубопровода: отсутствие повреждений на интервале  $[0; R_{\text{расч}}]$ ; возникновение не менее слабых повреждений при напряжении в стенке трубы на интервале  $[R_{\text{расч}}; R_b]$ , не менее средних повреждений на интервале  $[R_r; R_{b+3\sigma}]$  и не менее полных разрушений на интервале  $[R_b; R_{b+3\sigma}]$ .

Для построения кривых, аппроксимирующих вероятность наступления слабых, средних и полных повреждений, учитывается теорема о полной группе событий

$$\sum_{i=0}^n P_{B_i}(I) = 1.$$

Считается, что после сейсмического воздействия трубопровод может быть в одном из четырех несовместимых событий: быть целым или получить 1, 2 или 3-ю степень повреждения (события  $B_0, B_1, B_2, B_3$  соответственно).

Вероятность наступления определенной  $i$ -й степени повреждения (разрушения) сооружения  $P_{B_i}(I)$  определяется с использованием зависимостей [4]

$$P_{B_i}(I) = P_{A_i}(I) - P_{A_{i+1}}(I),$$

где  $P_{A_i}$  — вероятности наступления не менее  $i$ -й степени повреждения;  $P_{A_{i+1}}$  — вероятности наступления не менее  $(i + 1)$ -й степени повреждения.

<sup>1</sup> В статье представлен фрагмент таблицы.

Ожидаемые значения длины участков трубопровода с  $i$ -й степенью повреждения определяются по формуле

$$M(L_i) = \int_S \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P_{B_i} [I(x, y)] f [I(x, y)] S(x, y) dI dS, \quad (1)$$

где  $S(x, y)$  — длина трубы, приходящаяся на линейный участок с начальными координатами  $(x, y)$ ;  $P_{B_i} [I(x, y)]$  — вероятность повреждения трубы на рассматриваемом участке при землетрясении с интенсивностью  $I$ ;  $f [I(x, y)]$  — функция плотности вероятности интенсивности землетрясения для рассматриваемого региона;  $I_{\min}, I_{\max}$  — минимально и максимально возможная интенсивность землетрясения.

Проиллюстрируем процедуру построения функции уязвимости на примере. Пусть по результатам расчета установлен диапазон не менее средних повреждений на интервале сопротивлений  $[R_r; R_{v+3\sigma}]$  с границами сеймики  $\alpha = 80$  и  $\beta = 110$  см/с<sup>2</sup>. Вычислив параметры  $\mu = (80 + 110)/2 = 95$ ,  $\sigma = (110 - 80)/6 = 5$ , по

аргументу  $x = \frac{t - \mu}{\sigma}$  для текущих значений  $t$  в указан-

ных пределах ускорений определяем значение функции  $\Phi(x)$  (табл. 1) и строим искомую функцию уязвимости (табл. 2).

Таблица 2

Пример построения функции сейсмической уязвимости трубопровода в зависимости от ускорений грунта

$t, \text{см/с}^2$	80	85	90	95	100	105	110
$x$	-3	-2	-1	0	1	2	3
$P_{A_i}$	0,0014	0,0228	0,1587	0,5000	0,8413	0,9772	0,9986

#### 4. Динамический расчет трубопровода на сейсмические воздействия

Методика динамического прочностного расчета наполненной нефтью трубы, впаянной в сплошную среду — вмещающий грунтовый массив, на сейсмические воздействия с учетом начальных статических напряжений основана на методе дискретных элементов при аппроксимации систем дифференциальных уравнений квадратно-диагональной стержневой структурой на прямоугольной области решения рис. 1. Инерция системы сосредоточена в узлах сетки на пересечении стержней, а напряженно-деформированное состояние — в стержнях. Обоснование расчетной модели содержится в [5].

Анализируется волновая динамика процесса взаимодействия трубопровода в сечениях вдоль ЛЧ МТ в плоскостях  $xu$  инерциальной системы координат, нормальных оси трубопровода. С учетом продвижения волновых фронтов изменения параметров

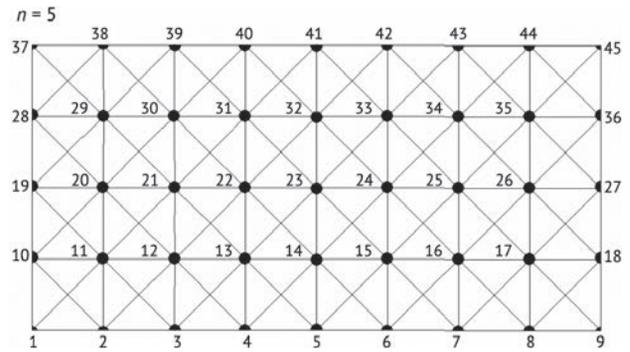


Рис. 1. Область решения для квадратно-диагональной системы, моделирующей грунтовый массив: исходное состояние области с числом  $N_k = (k - 1)(n - 1)$  квадратных элементов, ограниченным мощностью процессора конкретного персонального компьютера

движения напряженно-деформированное состояние (НДС) МТ аппроксимируется сплайн-функциями.

Инерционные свойства сплошной среды определяются ее плотностью  $\rho$ . Массам узлов  $M_j = \delta \rho A_j$  соответствуют площади  $A_j$  примыкающих участков поверхности среды (рис. 2 а).

Внутренний узел контролирует площадь  $a^2$ , граничный узел —  $\frac{1}{2}a^2$ , а угловой —  $\frac{1}{4}a^2$ , где  $a$  — размер стороны квадратной ячейки среды (рис. 2). Соответствующие значения масс ячеек единичной толщины  $\delta = 1$

$$M_{\text{вн}} = \delta \rho a^2; M_{\text{гр}} = \frac{1}{2} \delta \rho a^2; M_{\text{уг}} = \frac{1}{4} \delta \rho a^2.$$

К каждому внутреннему узлу сходятся восемь стержней с половинным объемом  $2a(F_1 + \sqrt{2}F_2)$  и массой  $2a(F_1\rho_1 + \sqrt{2}F_2\rho_2)$ , где  $\rho_1$  и  $F_1$  — плотность и площадь поперечного сечения стержней сторон квадратов,  $\rho_2$  и  $F_2$  — диагональных стержней.

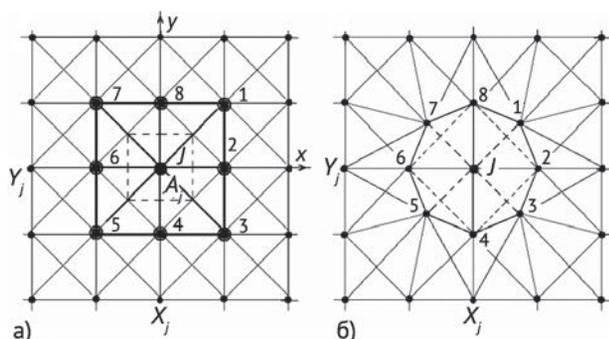
Параметры квадратно-диагональной стержневой структуры, моделирующей сплошную упругую среду, представлены в табл. 3.

В прямоугольной инерциальной системе координат  $xu$  фиксируется начальная геометрия объекта на регулярной сетке как система узлов и стержней. Узлы

Таблица 3

Параметры квадратно-диагональной структуры

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



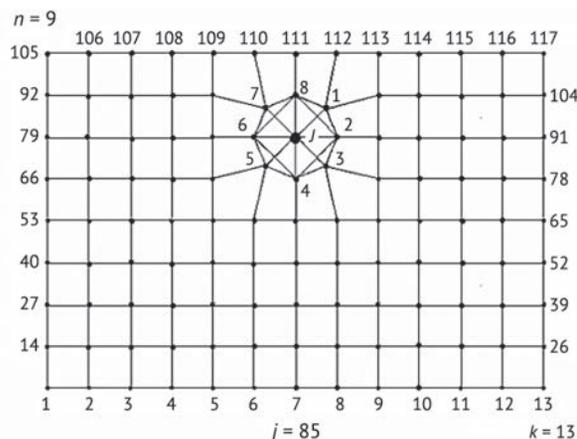
**Рис. 2.** а) Зона  $J$ -го (внутреннего) узла на расчетной сетке, контролирующей по массе площадь  $A_j$  ячейки грунтовой среды; узел нагружен усилиями 8 стержней, соединенных с соседними узлами с номерами 1–8 в локальной системе координат  $xu$ ; б) схема контура трубы (вариант – с минимальным числом узлов 1–8), впаянной в среду; масса  $J$ -го узла соответствует массе нефти, наполненной на все сечение трубы

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.

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 расположение слоев грунта может различаться, что позволяет анализировать поведение трубопровода под нагрузками в достаточно сложных геологических условиях.

Полагается, что стержневая система в сечении  $xu$  обладает плоскостью материальной симметрии, в которой действуют волновые (сейсмические) нагрузки. Масса системы сосредоточена по концам стержней — в узлах, инерцией вращения которых пренебрегают. Расчетная схема объекта представляет кольцевую конструкцию трубы, сопряженную с грунтовым массивом: криволинейная кольцевая форма аппроксимирована многоугольником (рис. 2 б). Область решения при начальном состоянии среды с впаянной трубой (с вариантом минимально возможного числа элементов для оболочки) представлена на рисунке 3.

Параметры системы, моделирующей сплошную грунтовую среду с впаянной 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



**Рис. 3.** Схема начального состояния области решения на сетке в сечении  $xu$  с впаянным нефтепроводом (диагональные элементы вмещающего массива условно не показаны)

трубу представлена тремя компонентами силового вектора в проекциях на оси  $xuz^2$ .

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.

Продольные силы  $N_k$  от набегающей волны  $k$ -го типа определяются по формуле, приведенной в [6]:

$$N_k = \frac{EFv_m}{\alpha_k V_k} \leq N_\tau, \quad (2)$$

изгибающие моменты  $M_k$

$$M_k = \frac{EJa(t)}{(\beta_k V_k)^2}. \quad (3)$$

Здесь  $E$  — модуль упругости материала трубы;  $F$  и  $J$  — площадь и момент инерции сечения трубы;  $v_m$  — максимальная скорость 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, принимаемые равными: 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

$$v_m = \frac{v_0 a(t)}{g},$$

<sup>2</sup> Нормативная оценка сейсмостойкости заглубленных в грунт нефтепроводов [3] регламентирует расчет только на действие продольной сейсмической нагрузки с указанием ускорения по значению балльности землетрясения.

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $v_0$  — начальная скорость частиц грунта, равная  $v_0 = 0,91$  м/с — для грунтов I категории,  $v_0 = 1,2$  м/с — для грунтов II категории.

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

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

Длина волны принимается в зависимости от доминантного периода  $T_0$  амплитудного частотного сейсмического спектра, который определяют методом быстрого преобразования Фурье к стационарной части расчетной акселерограммы

$$\lambda_0 \approx \frac{1}{2} T_0 V_k \cdot$$

Сила трения определяется суммарным действием касательных напряжений по контуру трубы, зависящих от коэффициента трения  $K_{тр}$  и удельного сцепления грунта  $C$ :

$$f_\tau = 2\pi r(K_{тр} p_s + C) \operatorname{sgn} V, \quad K_{тр} = \operatorname{tg} \varphi_{вн},$$

где  $\varphi_{вн}$  — угол внутреннего трения грунта;  $p_s = \rho v_m V$  — сейсмическое давление;  $\operatorname{sgn} V$  — знак относительной скорости трения  $V$ .

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

$$\ddot{Z}_\tau \cong \frac{N_k}{\lambda_0 m_\tau}, \quad (5)$$

где  $m_\tau$  — погонная масса МТ.

При поперечной сейсмической нагрузке в оболочке трубы действуют переменные по окружности внутренние усилия, зависящие от угловой координаты  $\varphi$  с отсчетом от диаметра, ортогонального направлению действия сейсмической компоненты. Распределение давлений на оболочку внешнего радиуса  $R$  с учетом дифракции сейсмической волны, взаимодействующей с трубой в плоскости  $xu$ , нормальной оси трубы, принято в форме треугольника симметрично по осям вдоль компонент  $N_x$  и  $N_y$  вектора нагрузки  $N_{xy}$  с максимумами давления  $P_x = N_x/R$  и  $P_y = N_y/R$ . Мгновенные значения усилий определяются расчетными ускорениями  $\ddot{X}_\tau$  и  $\ddot{Y}_\tau$  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. 4)

$$N_{xy} = \sqrt{N_x^2 + N_y^2} = P_m R, \quad (6)$$

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  $\lambda$

$$\lambda = \operatorname{arctg} \frac{N_x}{N_y} \quad (N_y \neq 0).$$

При треугольной аппроксимации нагрузки с максимумом сейсмического давления  $p = p_m$  нормальная сила  $N$  и изгибающий момент  $M$  в стенке оболочки принимаются равными [7]:

$$N = \begin{cases} N^0 \cos \varphi - \frac{1}{2} pR \sin \varphi, & N^0 = -0,02653 pR \\ & (0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2} \pi) \\ N^0 \cos \varphi - \frac{1}{2} pR \sin \varphi + \frac{1}{2} pR (1 - \sin \varphi)^2 \sin \varphi & (\frac{1}{2} \pi \leq \varphi \leq \pi), \end{cases} \quad (7)$$

$$M = \begin{cases} 0,305 pR^2 - N^0 R (1 - \cos \varphi) - \frac{1}{2} pR^2 \sin \varphi & (0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2} \pi) \\ 0,305 pR^2 - N^0 R (1 - \cos \varphi) - \frac{1}{2} pR^2 \sin \varphi - \frac{1}{2} pR^2 \times \\ \times (1 - \sin \varphi)^3 & (\frac{1}{2} \pi \leq \varphi \leq \pi). \end{cases} \quad (8)$$

Экстремальные значения нормальных сил и изгибающих моментов отмечаются в опасных точках сечения  $A$  — на горизонтальном диаметре и  $C$  — на вертикальном диаметре:

$$N_A = -0,02653 pR, \quad N_C = -0,5 pR; \quad (9)$$

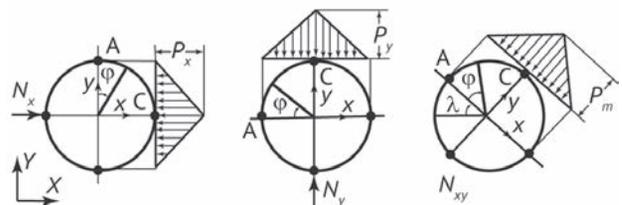


Рис. 4. Аппроксимирующие распределенные сейсмические нагрузки на трубу в проекциях на оси инерциальной системы координат  $xu$

$$M_A = 0,305 p R^2, \quad M_C = -0,16847 p R^2. \quad (10)$$

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

$$\delta_x = \frac{0,1228 p_m R^4}{E J_\delta}, \quad \delta_y = -\frac{0,1220 p_m R^4}{E J_\delta}, \quad (11)$$

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

Для расчета заглубленного в грунт трубопровода контур трубы совмещают с элементами сетки, а значения соответствующих узловых масс корректируются. Уменьшение массы узла в зоне объекта (по сравнению с массами узлов в зоне грунтовой среды) эквивалентно снижению плотности моделирующего материала соответствующих стержней, а увеличение — 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 корректируется (в сторону увеличения) счетная вязкость (в методе сквозного счета).

Полагается, что внешнее давление вызывает только формоизменение трубы, а гидростатическое давление в жидком продукте, заполняющем оболочку на все сечение, не снижает изгибающие моменты.

Система уравнений динамики МТ состоит из уравнений движения и геометрических соотношений, определяющих соотношений для материалов МТ и грунтов, а также 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.

Систему уравнений движения  $n$  узлов дискретной топологически регулярной системы для единичной длины трубопровода

$$\ddot{X} = \frac{P_x}{m}, \quad \ddot{Y} = \frac{P_y}{m} \quad (12)$$

приводится к системе  $4n$  уравнений первого порядка

$$\dot{V}_x = \frac{P_x}{m}, \quad \dot{V}_y = \frac{P_y}{m}, \quad \dot{X} = V_x, \quad \dot{Y} = V_y, \quad (13)$$

где  $P_x, P_y$  — компоненты усилий на узел в проекциях на оси инерциальной системы координат  $xu$ ;  $V_x$  и  $V_y$  — скорости;  $\dot{V}_x, \dot{V}_y$  — ускорения узлов,  $m$  — последовательные значения внутренних и контурных узловых масс.

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)

$$P_{jx} = \sum_{i=1}^8 N_i \cos \psi_i, \quad P_{jy} = \sum_{i=1}^8 N_i \sin \psi_i + P_{jg}. \quad (14)$$

Усилия  $N_i$  по напряжениям  $\sigma_i = f_\sigma(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$  в примыкающих к  $j$ -му узлу стержнях с сечениями  $F_i$  определяются их относительными (логарифмическими) деформациями  $\varepsilon_i$  и скоростями деформаций  $\dot{\varepsilon}_i$ , которые вычисляются совместно с углами  $\psi_i$  по узловым координатам и их скоростям

$$N_i = f_\sigma(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i) F_i, \quad (15)$$

где  $f_\sigma$  — 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.

Последовательность расчета МТ на сейсмике следующая: определяются параметры движения узлов; уточняются деформации и усилия в стержнях от движения узлов, затем значения усилий передаются на узлы; смещения узлов определяются решением системы уравнений движения этих узлов.

Для граничных условий задается сейсмическая информация. Полагается, что направление вектора сейсмической волны задано по результатам наблюдений. При действии волны на трубопровод 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. 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.

Граничные условия вводятся на внешнем контуре области решения вертикальными и горизонтальными ускорениями контурных узлов нижней границы области, а также ускорениями вдоль оси МТ числовыми массивами сбалансированных и (при необходимости) нормированных на задаваемую сейсмичность 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 «BALANS» [8].

При назначении начальных условий предполагается предварительный расчет на действие статических нагрузок для формирования начального тензора напряжений в оболочке МТ для допредельной упругой фазы деформаций. Начальные условия, вызывающие статическое нагружение МТ и напряжения вмещающей среды с МТ, составляют: литостатические давления, выталкивающие силы водоизмещения и внешнее градиентное гидростатическое давление (для обводненной среды), кривизна МТ согласно местной геологии, температурный перепад (разность температур: текущей и при прокладке МТ) и внутреннее гидростатическое давление транспортируемого продукта.

Статический расчет по набору веса грунтового массива с МТ до равновесного состояния под действием литостатических давлений к моменту  $t_k$  в программной реализации алгоритма осуществляется автоматически. Порядок значения  $t_k$  соответствует времени пробега упругой волны в грунте на дистанции, равной 10 размерам вертикального габарита области решения. Статическая погонная нагрузка на трубу от веса грунта  $G_1$  определяется по формуле

$$G_1 = 2\rho ghR, \quad (16)$$

а выталкивающая сила водоизмещения  $G_2$  — из выражения

$$G_2 = \pi r_b g R^2, \quad (17)$$

где  $\rho$  и  $\rho_b$  — плотности 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  $p_y = \rho_b g y$  с градиентом 10 кПа/м (при плотности воды  $\rho_b = 1000 \text{ кг/м}^3$ ). Среднее внешнее гидростатическое давление на реальных заглублениях МТ крайне слабо разгружает внутреннее гидростатическое да-

вление 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

$$M_{kr} = K_R EJ. \quad (18)$$

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 температурного расширения материала  $\alpha$  (для стали  $\alpha = 1,2 \times 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ )

$$N_T = -\alpha \Delta T E F, \quad (19)$$

причем 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

$$N_p = P_g R, \quad (20)$$

и осевые усилия  $N_\mu = \mu_0 N_p$ , зависящие от коэффициента Пуассона  $\mu_0$ , а также осевые усилия  $N_{gos} = (1 - K_z) F_0 P_g$  от давления  $P_g$  на торцевую площадь трубы  $F_0$  с учетом коэффициента защемления  $K_z$  трубопровода в грунте

$$N_{pz} = N_\mu + N_{gos}. \quad (21)$$

Эквивалентные напряжения в МТ определяются НДС от полной системы статических и динамических нагрузок. Эквивалентное напряжение  $\sigma_3$  определим по энергетической теории прочности в главных напряжениях

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

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 А и С, рис. 5).

При совместном действии веса засыпки грунта (16) и возможного водоизмещения (17) оболочка сжимается по вертикали от усилия (отпором бокового давления пренебрегается в запас расчета):

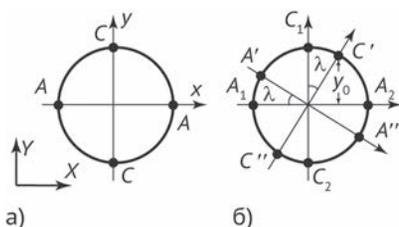


Рис. 5. Опасные точки в нормальном сечении МТ:

а) в статике (начальные условия ( $\lambda = 0$ )); б) при сейсмических воздействиях с учетом статических напряжений

$$G = G_1 + G_2 = Rg(2\rho h + \pi r_b R).$$

От обжимающего давления с максимумом  $P = G/R$  при возникающих сжимающих усилиях  $N_{A/C}$  (9) и моментах  $M_{A/C}$  (10) в опасных точках кольцевого сечения оболочки действуют: нормальные напряжения  $\sigma_{NA/NC} = N_{A/C} / F_\delta$  и фибровые нормальные изгибные напряжения  $\sigma_{MA/MC} = \pm M_{A/C} / W_\delta$ , где  $F_\delta = \delta$  и  $W_\delta = \frac{1}{6}\delta^2$  —

площадь поперечного сечения и момент сопротивления стенки трубы толщиной  $\delta$  на единицу ее длины.

При наличии начальной кривизны  $K_R \neq 0$  (18) возникают фибровые нормальные изгибные напряжения в вертикальной плоскости, которые в точках С нормального сечения определяются по формуле (в точках А на нейтральной оси напряжения отсутствуют)

$$\sigma_{C,kr} = \pm \frac{M_{kr} R}{J} = \pm K_R ER.$$

При наличии температурного перепада  $\Delta T \neq 0$  (19) осевые равномерные по сечению (и в точках А и С) напряжения определяются из выражения

$$\sigma_{\Delta T} = \frac{N_T}{F} = \alpha \Delta T E.$$

От гидростатического давления продукта  $P_g$  (20) кольцевые растягивающие равномерные по сечению (и в точках А и С) напряжения равны

$$\sigma_g = \frac{N_p}{F_\delta} = \frac{P_g R}{\delta},$$

осевые напряжения

$$\sigma_\mu = \frac{N_\mu}{F}, \quad \sigma_{gos} = \frac{N_{gos}}{F}.$$

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

в опасной точке А

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

в опасной точке С

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

При определении тензора напряжений и эквивалентных напряжений от совместного действия статических и сейсмических нагрузок будем использовать статические компоненты для опасных точек сечений от сейсмике.

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  $N_k$ , волновым изгибающим моментом  $M_k$  и динамическим обжатием с вектором  $N_{xy}$  переменного наклона  $\lambda$ . При этом форма деформирования оболочки МТ теряет симметрию, появляются дополнительные опасные точки, общим числом 8 (рис. 5, б).

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

$$\sigma_z = \frac{N_k}{F}. \quad (22)$$

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

$$\sigma_{zm} = \frac{M_k y_0(\eta)}{J} \quad y_0 = \pm R \sin \eta \quad (y_0 \neq 0). \quad (23)$$

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

При обжатии трубы вектор сейсмической силы  $N_{xy}$  в плоскости  $xu$  имеет наклон  $\lambda$  и кольцевые нормальные и изгибные напряжения в стенке трубы от внутренних динамических усилий  $N^\delta$  и  $M^\delta$  определяются по формулам, в которых усилия даются по формулам (7) и (8) 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>3</sup>:

нормальная сила

$$N^\delta = -P_m R(0,02653 \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi); \quad (24)$$

<sup>3</sup> Для краткости приведены формулы диапазона  $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ . Для полного диапазона см. (9) и (10).

изгибающий момент

$$M^{\hat{c}} = P_m R^2 (0,305 + 0,02653(1 - \cos \varphi) - \frac{1}{2} \sin \varphi); \quad (25)$$

нормальные сжимающие напряжения

$$\sigma_{Nd}^{\eta} = \frac{N^{\hat{c}}(\varphi)}{F_{\delta}}; \quad (26)$$

нормальные фибровые изгибные напряжения

$$\sigma_{Md}^{\eta} = \pm \frac{M^{\hat{c}}(\varphi)}{W_{\delta}}. \quad (27)$$

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

Приведенные выше соотношения позволяют определить тензор расчетных (суммарных) напряжений в произвольном сечении МТ, в частности, в наиболее напряженных в статике и динамике опасных точках, отмеченных на схеме (рис. 5).

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

$$(\sigma_i^s)_1 = \sigma_{Ns,i}^{\eta} + \sigma_{Ms,i}^{\eta} + \sigma_g, (\sigma_i^s)_2 = \sigma_{kr,i}^{\eta} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos}, \quad (28)$$

где в зависимости от усилий  $N$  (7) и  $M$  (8) и кривизны рельефа (18)

$$\sigma_{Ns,i}^{\eta} = \frac{N_i(\eta)}{F_{\delta}}, \sigma_{Ms,i}^{\eta} = \pm \frac{M_i(\eta)}{W_{\delta}}, \sigma_{kr,i}^{\eta} = \pm \frac{M_{kr} R \sin \eta}{J}. \quad (29)$$

Динамические напряжения от осевой силы  $N_k$  и волнового момента  $M_k$  с учетом (26) и (27) определяются следующим образом:

$$(\sigma_i^d)_1 = \sigma_{Nd,i}^{\eta} + \sigma_{Md,i}^{\eta}, (\sigma_i^d)_2 = \sigma_z + \sigma_{zm}^{\eta}$$

$$\sigma_{zm}^{\eta} = \pm \frac{M_k R \sin \eta}{J}. \quad (30)$$

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

$$\sigma_1 = \sigma_{Ns,i}^{\eta} + \sigma_{Ms,i}^{\eta} + \sigma_g + \sigma_{Nd,i}^{\eta} + \sigma_{Md,i}^{\eta}, \quad (31)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{kr,i}^{\eta} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} + \sigma_z + \sigma_{zm}^{\eta}. \quad (32)$$

Как показал анализ практического нагружения МТ, наиболее напряженными точками сечений оболочки трубопровода являются точки  $A_1, A_2, C_1$  и  $C_2$  (далее  $A$  и  $C$  — верхняя и боковая точки соответственно). Поэтому осуществляется также контроль ресурса прочности МТ по эквивалентным напряжениям в этих точках. Система напряжений в точках  $A$  и  $C$  приведена в табл. 4 и 5, в которых динамические напряжения от обжатия оболочки в плоскости  $xu$  определяются совместным действием компонент сейсмических усилий  $N_x, N_y$  и давлений  $P_x = N_x/R, P_y = N_y/R$ :

$$\sigma_{SNA} = -(0,02653P_y + 0,5P_x)R / \delta;$$

$$\sigma_{SMA} = 6(0,305P_y - 0,16847P_x)R^2 / \delta^2; \quad (33)$$

$$\sigma_{SNC} = -(0,02653P_x + 0,5P_y)R / \delta;$$

$$\sigma_{SMC} = 6(-0,16847P_x + 0,305P_y)R^2 / \delta^2. \quad (34)$$

Формулы для напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в таблицах — 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  $\sigma_{\sigma G}$  из числа экстремумов эквивалентных напряжений, вычисленных

Таблица 4

Система напряжений в опасной точке А

Статические напряжения		Динамические напряжения	
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	$\sigma_{gos}$		
Главные напряжения		Главные полные напряжения	
$\sigma_1 = \sigma_{NA} \pm \sigma_{MA} + \sigma_g$		$\sigma_1 = \sigma_{NA} \pm \sigma_{MA} + \sigma_g + \sigma_{SNA} \pm \sigma_{SMA}$	
$\sigma_2 = \pm \sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos}$		$\sigma_2 = \pm \sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} \pm \sigma_z \pm \sigma_{Zm}$	

Таблица 5

Система напряжений в опасной точке С

Статические напряжения		Динамические напряжения	
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	$\sigma_{gos}$		
Главные напряжения		Главные полные напряжения	
$\sigma_1 = \sigma_{NC} \pm \sigma_{MC} + \sigma_g$		$\sigma_1 = \sigma_{NC} \pm \sigma_{MC} + \sigma_g + \sigma_{SNC} \pm \sigma_{SMC}$	
$\sigma_2 = \pm \sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos}$		$\sigma_2 = \pm \sigma_{kr} + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\mu} + \sigma_{gos} \pm \sigma_z \pm \sigma_{Zm}$	

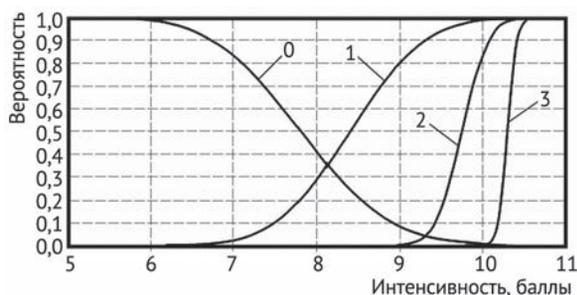


Рис. 6. Функции уязвимости магистрального нефтепровода при землетрясениях не менее определенной степени повреждения  
Условные обозначения: 0 – нет повреждений; 1, 2, 3 – степени повреждения

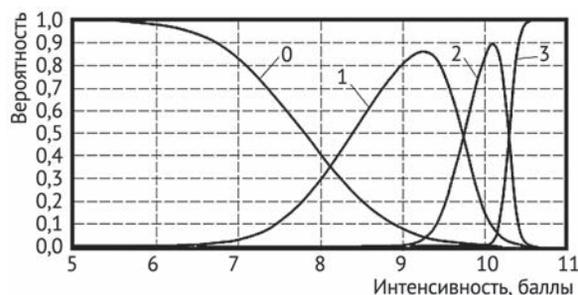


Рис. 7. Функции уязвимости магистрального нефтепровода при землетрясениях определенной степени повреждения  
Условные обозначения: 0 – нет повреждений; 1, 2, 3 – степени повреждения

для всех сочетаний знакопеременных компонентов тензора напряжений. При этом возможны случаи, когда в момент  $t_m$  значения компонентов тензора напряжений не экстремальны.

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

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

В динамических условиях  $\sigma_3$  — функция времени, и при  $i$ -м сочетании изменяющихся со временем динамических главных напряжений ее экстремум — частное значение эквивалентного напряжения  $\sigma_{3i}$ . Наибольшее из  $\sigma_{3i}$  представляет расчетное напряжение  $\sigma_{3G}$ .

Условие обеспеченной прочности дается сравнением экстремумов компонентов тензора напряжений  $\sigma_i$  и эквивалентного напряжения  $\sigma_{3G}$  в опасных точках с предельно допустимым напряжением  $[\sigma_d]$

$$\sigma_{3i} \leq [\sigma_d], \sigma_{3G} \leq [\sigma_d]$$

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

$$R_{np} = 1 - \sigma_m / [\sigma_d].$$

Напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  с возможными вариациями знакопеременных параметров при оценке ресурса контролем в опасных точках А и С определяются автоматическим перебором всех возможных вариантов сочетаний статических и динамических напряжений. Общее число сочетаний равно 32.

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

$$\sigma_{3G} = \left| \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2 - \sigma_i \sigma_j} \right|_k^{\max}.$$

Рассмотренный алгоритм реализован в программном комплексе DYNAMIC-T.

### 5. Пример построения функций уязвимости для МТ

По результатам вариантных расчетов по рассмотренному алгоритму магистрального нефтепровода диаметром 1220 мм с толщиной стенки 19 мм, заглубленного в песчаный грунт средней крупности, при рабочем давлении в нефти 8 МПа и температурном перепаде 20 градусов построены функции сейсмической уязвимости (рис. 6, 7).

### 6. Заключение

Представленные в статье методы позволяют оценивать уязвимость трубопроводов в условиях дефицита статистической информации по сейсмостойкости трубопроводного транспорта. Построение функций уязвимости выполняется на основе компьютерного детерминистического расчета прочности трубопровода без привлечения опытных данных. Получаемые функции уязвимости дают возможность установить ожидаемые повреждения трубопроводов в сейсмоопасных районах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 13.G25.31.0053 от 7 сентября 2010 г.

### Обозначения:

- $a$  — размер стороны квадратной ячейки среды, м;
- $a(t)$  — ускорение грунта, м/с<sup>2</sup>;
- $A_j$  — площадь примыкающих участков поверхности пластинки, м<sup>2</sup>;
- $C$  — удельное сцепление грунта, Па/м;
- $E$  — модуль упругости материала трубы, Па;
- $F$  — площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>;
- $f_\tau$  — погонная сила трения, Н/м;
- $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;
- $h$  — толщина грунтовой засыпки, м;

$I$ – интенсивность землетрясения, балл;	$R_{\text{расч}}$ – расчетное сопротивление металла трубы, Па;
$J$ – момент инерции сечения трубы, м <sup>4</sup> ;	$R_T$ – предел текучести, Па;
$J_\delta$ – момент инерции стенки оболочки, м <sup>4</sup> ;	$R_{T+3\sigma}$ – значение максимального временного сопротивления металла трубы (с учетом дисперсии), Па;
$K_R$ – радиус кривизны, м;	$T_0$ – доминантный период, с;
$K_{\text{тр}}$ – коэффициент трения, безразмерная величина;	$V_k$ – скорость волны $k$ -го тип, м/с;
$M_j$ – масса узла с номером $j$ , кг;	$v_m$ – максимальная скорость частиц грунта, м/с;
$M$ – изгибающий момент, Н*м;	$\Phi(x)$ – функции распределения случайной величины;
$m_T$ – погонная масса трубопровода, кг/м;	$\Delta T$ – температурный перепад, градус;
$N$ – продольная сила, Н;	$\delta$ – толщина стенки трубы, м;
$N_T$ – предельная сила взаимодействия между грунтом и поверхностью трубопровода, Н;	$\lambda_0$ – длина сейсмической волны, м;
$P_{A_i}(I)$ – вероятность наступления не менее $i$ -й степени повреждения на рассматриваемом участке при землетрясении с интенсивностью $I$ ;	$\mu$ – математическое ожидание случайной величины, размерность совпадает с размерностью случайной величины;
$P_{B_i}(I)$ – вероятность наступления $i$ -й степени повреждения трубы на рассматриваемом участке при землетрясении с интенсивностью $I$ ;	$\mu_0$ – коэффициент Пуассона;
$P$ – давление, Па;	$\rho$ – плотность грунтовой среды, кг/м <sup>3</sup> ;
$R$ – радиус трубопровода, м;	$\sigma$ – среднее квадратическое отклонение случайной величины, размерность совпадает с размерностью случайной величины;
$R_B$ – временное сопротивление металла трубы, Па;	$\sigma_3$ – эквивалентное напряжение, Па.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П. Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология. — Т. 2. — М.: Изд-во «АСВ», 2010.
2. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. — М.: Высшая школа, 2000.
3. СНиП III-42-80. Магистральные трубопроводы (введ. 01.01.1981) / Госстрой СССР. — М., 2001.
4. Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П. Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология. — Т. 1. — М.: Изд-во «Наука», 2005.
5. Александров А.А., Котляревский В.А., Ларионов В.И., Лисин Ю.В. Модель динамического анализа прочностных магистральных нефтепроводов на сейсмические воздействия // Нефтегазовое дело. — 2011. — № 5. — С. 66–88. URL:[http://www.ogbus.ru/authors/Aleksandrov/Aleksandrov\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Aleksandrov/Aleksandrov_1.pdf)
6. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций (введ. 01.01.2002) / Госатомнадзор РФ. М., 2002.
7. Биргер И.А. Прочность, устойчивость, колебания. — Т. 1. — М.: Машиностроение, 1968.
8. Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П. Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология. — Т. 3. — М.: Изд-во АСВ, 2010.

## Assessment of Seismic Vulnerability of the Main Pipelines in Information Deficiency Conditions

**A.A. Aleksandrov**, Rector, Head of Chair «Ecology and Industrial Safety», Doctor of Engineering, Professor, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)

**V.A. Kotlyarevsky**, Chief Research Associate of Scientific and Educational Center of Extreme Situation Researches, Doctor of Engineering, Professor, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)

**V.I. Larionov**, Deputy Director for Scientific Work of Scientific and Educational Center of Extreme Situation Researches, Doctor of Engineering, Professor, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)

**S.P. Sushchev**, Director of Scientific and Educational Center of Extreme Situation Researches, Doctor of Engineering, Professor, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)

*Operation in difficult climatic conditions and the large extent of the main gas and oil pipelines causes the need of search of new decisions for ensuring the reliable and safe operation of pipeline transport objects. The technique offered in this article is based on the plotting of seismic vulnerability function of the main pipeline embedded in soil by calculated dynamic analysis of stressed-deformed state in conditions of experimental information lack.*

Keywords: pipeline, vulnerability, damage, seismic load, accelerogram, dynamic calculation