

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕХОДА ПОДЗЕМНОГО РУБОПРОВОДА ЧЕРЕЗ СЕЙСМИЧЕСКИЙ РАЗЛОМ

© 2007 С. Н. Перов¹, Ю. В. Скворцов¹, С. И. Аграфенин²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²ОАО «Гипровостокнефть»

Вызывающие аварийные ситуации природные воздействия (такие, как землетрясения, ураганы, оползни, просадки грунта и т.д.) не поддаются контролю, и поэтому достаточный уровень безопасности по отношению к ним должен быть обеспечен на стадии проектирования. Следует отметить, что в расчетах на безопасность широко применяются вероятностные модели редких событий.

В настоящей работе для оценки показателей безопасности и риска рассматриваемой конструкции трубопровода используется теория, предложенная В. В. Болотиным [1]. При этом для решения задачи статистической динамики применяется метод интерполяционных полиномов.

Для подземных трубопроводов тектонические разломы, приводящие к образованию разрывов на поверхности земли, являются важным фактором, который необходимо учитывать при их проектировании. Это связано с тем, что трубопроводы, пересекающие зоны разломов, при сейсмических смещениях грунта могут подвергаться значительным продольным и изгибным деформациям. Очевидно, что чем жестче грунт, тем больше величина этих деформаций.

Безотказность работы подземного трубопровода при пересечении разломов обеспечивается относительно низкой жесткостью грунта, окружающего трубу в месте разлома. Обычно в критических зонах на пересечении разломов трубопровод засыпается рыхлым песком. Такой песчаный участок позволяет трубе деформироваться без превышения максимально допустимых значений деформаций. Однако в случае промерзания грунта данный подход требует применения системы теплоизоляции, например в виде плит из полистирола, располагаемых над траншеей вблизи поверхности земли.

Другой подход предполагает использование в месте разлома специальной конфигурации траншеи с материалом-заменителем (например, таким, как пенопласт), размещаемым вокруг трубы.

В данной работе рассматривается газопровод диаметром 48 дюймов, изготовленный из стали марки X70. Толщина стенки

трубы обычной секции принята равной 17,6 мм. На участке пересечения разлома толщина стенки увеличена до 25,3 мм. Длина этой специальной секции равна 72 м.

Для описания упругопластического поведения материала используется истинная диаграмма деформирования, представляющая собой зависимость действительного напряжения от логарифмической деформации.

На практике землетрясение может произойти зимой, когда естественный грунт полностью промерзает до глубины расположения трубопровода. Поэтому в расчетах должен приниматься наиболее неблагоприятный случай – промерзший жесткий грунт.

В месте пересечения разлома предусмотрена специальная траншея длиной 72 м с материалами-заменителями (рис. 1). Здесь жесткость «грунта» в поперечном горизонтальном направлении зависит от кривой сжимаемости и толщины пенопласта EM26, а также от поведения естественного грунта. Характеристики «грунта» при движении вверх определяются весом засыпки каменным материалом, кривой сжимаемости и толщиной пенопласта EM26. Следует отметить, что засыпка гравием необходима для предотвращения всплытия пенопласта в случае подъема грунтовых вод. Толщина геотекстиля должна быть достаточна для того, чтобы отделить слой гравия от грунта стенок траншеи. Геотекстиль предназначен для предотвращения образования крупного монолитно-

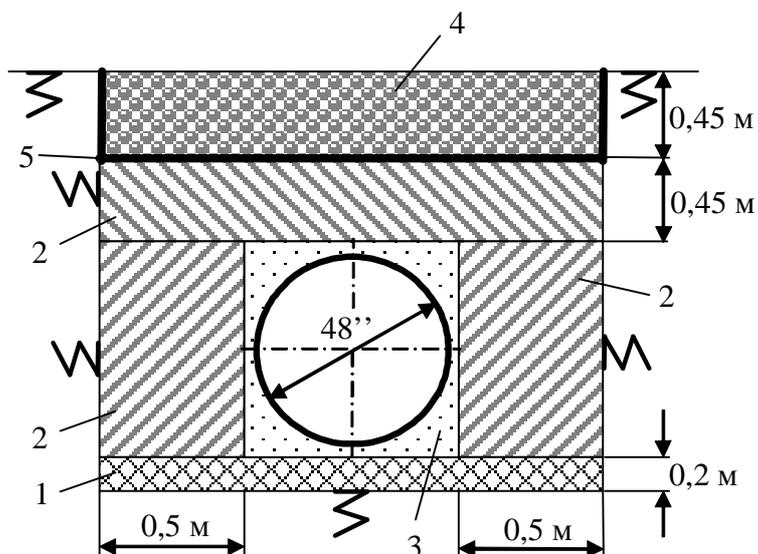


Рис. 1. Конфигурация специальной траншеи:
1 – компостирол, 2 – пенопласт EM26, 3 – песок, 4 – гравий, 5 – геотекстиль

го слоя грунта над трубопроводом, который способен помещать его поднятию во время землетрясения. В направлении вниз жесткость «грунта» зависит от кривой сжимаемости и толщины компостиrolа и, особенно, от поведения естественного грунта. И, наконец, реакция «грунта» в продольном направлении определяется свойствами песка, используемого в траншее в качестве электролита для катодной защиты трубопровода.

На рассматриваемый газопровод действует следующая система нагрузок: 1) гравитационные силы; 2) внутреннее давление в трубе; 3) тепловое расширение; 4) смещения по разлому.

Гравитационная нагрузка учитывается путем задания ускорения силы тяжести

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ и соответствующей массовой плотности материала трубы. Рабочее давление в трубе принято равным 10 МПа. Температура замыкания трубопровода равна минус 10°C. При этом температура продукта составляет 60°C.

Основными для данной трубопроводной системы являются нагрузки, обусловленные движением по разлому, вызванным сейсмическими толчками (рис. 2). Эти сейсмические смещения должны прикладываться к подвижной стороне разлома.

Следует отметить, что область деформированного грунта между подвижной и неподвижной сторонами разлома здесь можно моделировать путем задания переходного участка, на котором сейсмические смещения

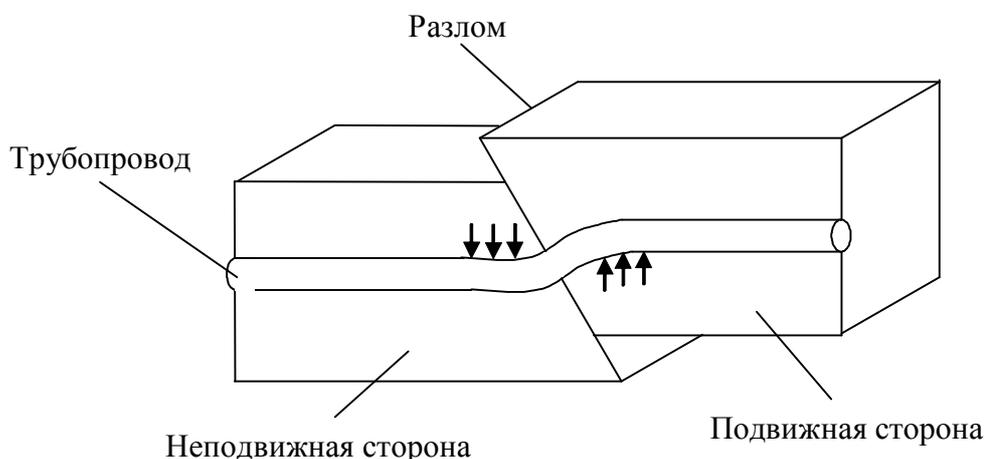


Рис. 2. Движение по разлому

изменяются по линейному закону от принятого значения на подвижной стороне до нуля на неподвижной. Для рассматриваемого разлома длина переходного участка взята равной 4 м.

Сейсмические смещения в системе координат трубы X_p, Y_p, Z_p (где X_p совпадает с продольной осью трубопровода, а Z_p направлена вертикально вверх) для периода повторяемости землетрясений в 1000 лет приняты равными: $u_{Xp} = -457,5$ мм; $u_{Yp} = u_{Zp} = 915$ мм.

В соответствии с мировой практикой проектирование трубопровода в случае сейсмической опасности должно проводиться на основе двухуровневого подхода с целью выполнения следующих требований [1, 2]:

- трубопровод должен выдерживать воздействие проектного землетрясения (SLE) без или с минимальными перерывами в нормальной эксплуатации без необходимости проведения значительных ремонтных работ;

- трубопровод должен выдерживать воздействие максимального расчетного землетрясения (DLE) без разрывов. В случае такого события трубопроводу могут быть нанесены значительные повреждения, в результате которых будет прервана эксплуатация и для устранения которых потребуется провести ремонтные работы в одном или нескольких местах.

Периоды повторяемости проектного землетрясения (SLE) и максимального расчетного землетрясения (DLE) приняты равными

соответственно 200 и 1000 годам. Таким образом, сейсмические смещения землетрясения SLE составляют 20 % от смещений землетрясения DLE .

В табл. 1 приведены критерии проектирования, представляющие интерес при анализе перехода трубопровода через разлом.

Предельная деформация e_{Mmax} определяется с помощью нелинейного МКЭ-анализа консольной трубы, нагруженной на свободном конце изгибающим моментом. Для рассматриваемой трубы диаметром 48 дюймов (толщина стенки 25,3 мм) $e_{Mmax} = 0,8$ %.

Деформация гофрообразования e_w может быть рассчитана по формулам, приведенным в работе [2]. В нашем случае $e_w = -1,87$ %.

Решение рассматриваемой задачи должно проводиться в геометрически и физически нелинейной статической постановке, т.е. с учетом больших перемещений, пластических деформаций и нелинейности поведения окружающего трубу грунта.

В настоящей работе используется МКЭ-пакет ANSYS, в котором для моделирования упругопластического деформирования трубопровода предусмотрен специальный элемент трубы PIPE20, а для дискретного представления точек грунта можно воспользоваться элементом нелинейной пружины COMBIN39. При этом каждый узел трубы, находящейся в грунте, необходимо связать с неподвижной опорой с помощью трех элементов-пружин,

Таблица 1. Критерии сейсмического проектирования для заглубленных трубопроводов

Тип разрушения	Критерий проектного землетрясения (SLE)	Критерий максимального расчетного землетрясения (DLE)
Предельные растягивающие деформации (при изгибе)	$\varepsilon_b / \varepsilon_{Mmax} \leq 0,9$	$\varepsilon_b \leq 0,04$ (4,0%)
Разрушение при сжатии / гофрообразование	$\varepsilon_{ac} / \varepsilon_w \leq 0,8$	$\varepsilon_{ac} / \varepsilon_w \leq 1,0$
Разрушение сварных швов	$\varepsilon_{at} \leq 0,02$ (2,0%)	$\varepsilon_{at} \leq 0,04$ (4,0%)

Примечания:

ε_b – деформация изгиба трубы;

ε_{Mmax} – деформация, соответствующая максимуму на кривой «момент – деформация»;

ε_{ac} – осевая (фибровая) деформация сжатия;

ε_w – деформация сжатия, при которой начинается гофрообразование;

ε_{at} – осевая (фибровая) деформация растяжения.

представляющих жесткости грунта в продольном, поперечных горизонтальном и вертикальном направлениях.

Моделируемая часть трубопровода должна быть достаточно большой для того, чтобы граничные условия не имели значительного влияния на критическую область вблизи разлома. Учитывая это, длина модели выбрана равной 1000 м. Причем она располагается симметрично относительно разлома, т.е. одна половина модели находится на стационарной стороне, а другая – на движущейся.

Обычно в местах резкого изменения напряженно-деформированного состояния конструкции для получения приемлемой точности требуется более мелкая сетка конечных элементов. Установлено, что для хорошей аппроксимации геометрии сильно искривленного трубопровода длина элементов трубы не должна более, чем в 2,5 раза превышать его диаметр. Исходя из этого, на участке пересечения разлома выбраны элементы PIPE20 длиной 1 м. С целью сокращения вычислительных затрат на некотором удалении от критической области длина элементов увеличена до 4 м (рис. 3).

Следует отметить, что использование элементов-пружин в геометрически нелинейном анализе связано с определенными трудностями. В результате больших перемещений они могут испытывать значительные отклонения от их правильной ориентации, что может привести к появлению несуществующих в действительности компонентов сил. Длина элементов-пружин должна быть такой, что-

бы эти нежелательные компоненты оставались в приемлемых с точки зрения точности пределах. В рассматриваемом примере длина элементов COMBIN39 выбрана равной 25 м.

Каждый узел трубы, расположенный на стационарной стороне разлома, соединяется с неподвижной опорой с помощью трех элементов-пружин, представляющих жесткости грунта в разных направлениях. На подвижной стороне заданные сейсмические смещения по разлому прикладываются к свободным концам элементов-пружин, имитирующих действие грунта.

В качестве граничных условий приняты следующие. На левом конце модели, расположенном на неподвижной стороне, устанавливается заделка (т.е. в данной точке все линейные и угловые перемещения полагаются равными нулю). На правом конце, который находится на подвижной стороне, угловые перемещения также считаются нулевыми, а за линейные перемещения приняты заданные смещения по разлому.

Для описания пластического поведения материала трубы используются условие текучести Мизеса и полилинейная модель с изотропным упрочнением, которая рекомендуется для проведения анализа при больших деформациях. В качестве исходных данных здесь требуется диаграмма деформирования материала, которая вводится по точкам.

Необходимо подчеркнуть, что пластичность представляет собой неконсервативный процесс, при котором последовательность

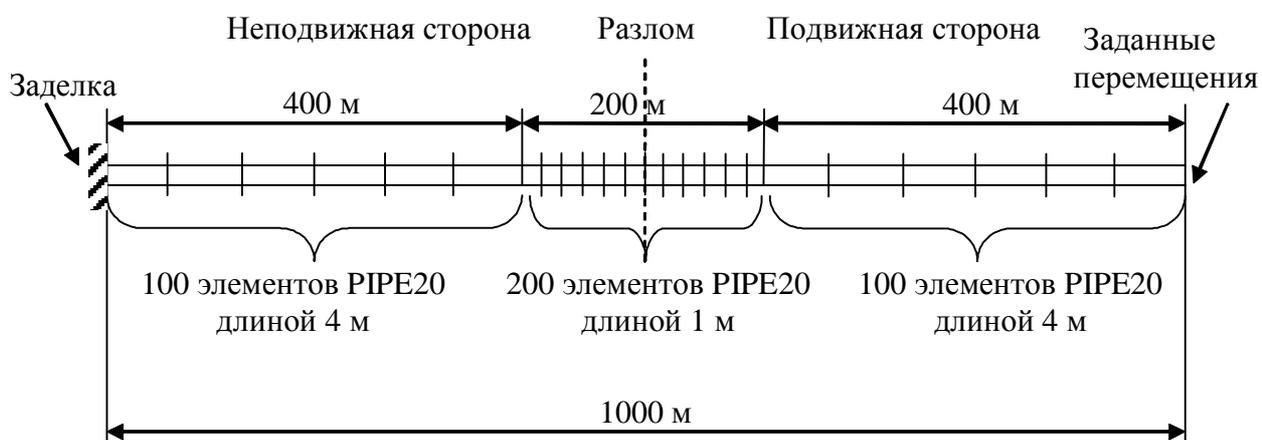


Рис. 3. Принятая сетка конечных элементов

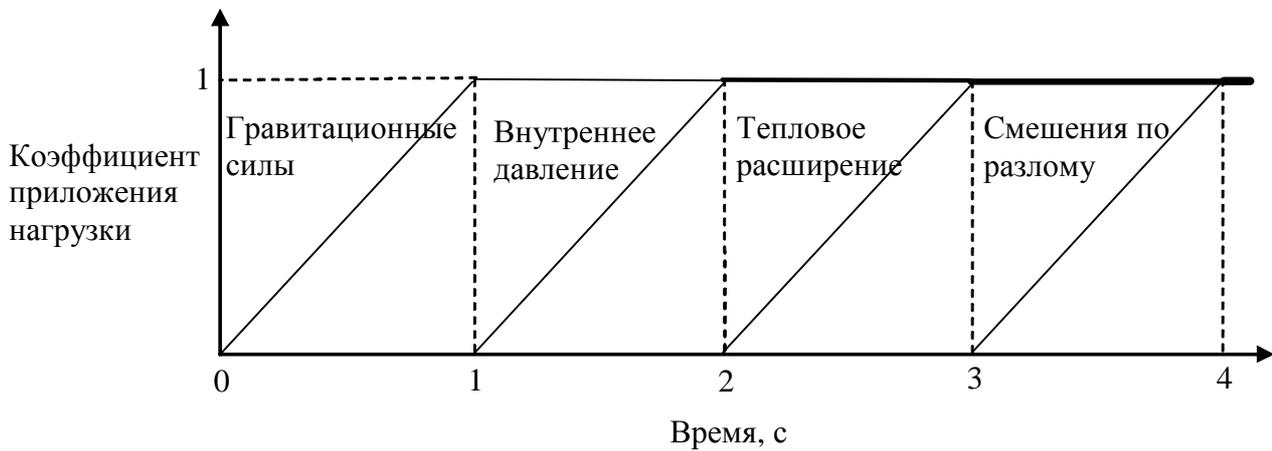


Рис. 4. Порядок приложения нагрузки

приложения нагрузки влияет на конечный результат. Поэтому нагрузку в нашем случае следует прикладывать в правильной последовательности, соблюдая реальную историю нагружения. Принятый в соответствии с этапами прокладки и эксплуатации трубопровода порядок приложения нагрузки представлен на рис. 4. Таким образом, рассматриваемый анализ включает в себя четыре шага нагружения. При этом последний шаг нагружения, где имеют место большие пластические деформации, для повышения точности решения и улучшения его сходимости необходимо разбить на достаточно большое число подшагов (400 и более), в которых будут вычисляться промежуточные решения. Отметим также, что в МКЭ-пакетах при выполнении нелинейного статического анализа время не имеет физического смысла, а является просто удобной переменной для обозначения различных уровней нагружения и играет роль счетчика для идентификации подшагов по нагрузке.

Сначала решение настоящей задачи осуществляется в детерминированной постановке. При этом вычисляются осевые деформации в нескольких (расположенных в середине толщины стенки через 45°) точках конечных сечений каждого конечного элемента трубы. Затем определяется наиболее опасное сечение трубопровода, в диаметрально противоположных точках которого имеют место максимальное e_{max} и минимальное e_{min} значения. Зависимости осевых деформаций в

этих точках от времени и периода повторяемости землетрясений изображены на рис. 5 и 6.

Как показывают результаты детерминированного расчета, все проектные требования выполнены. При этом минимальный коэффициент запаса прочности равен 1,5.

Для решения задачи статистической динамики используется метод интерполяционных полиномов, который является наиболее экономичным. В качестве случайных входных данных здесь выбраны пять величин, оказывающих наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние трубопровода. Их законы распределения и числовые характеристики приведены в табл. 2.

С целью снижения вычислительных затрат применяется схема $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$, т.е. для каждой входной случайной величины задаются по два узла интерполирования.

Следует отметить, что в методе интерполяционных полиномов математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение некоторой выходной случайной величины y находятся по формулам

$$\langle y \rangle = \sum_{i=1}^q y_i \rho_i ; \quad S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^q (y_i - \langle y \rangle)^2 \rho_i} , \quad (1)$$

где

$$q = \prod_{k=1}^n q_k ; \quad \rho_i = \prod_{k=1}^n \rho_{kj} .$$

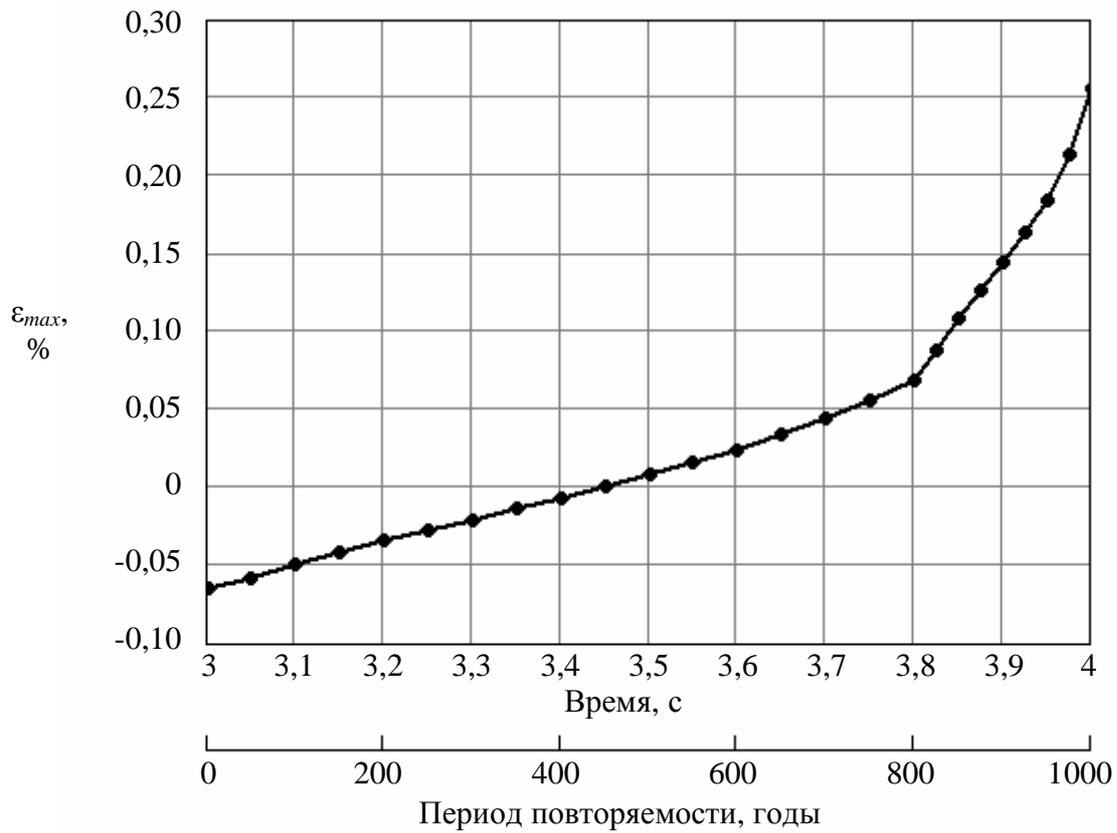


Рис. 5. Максимальная осевая деформация

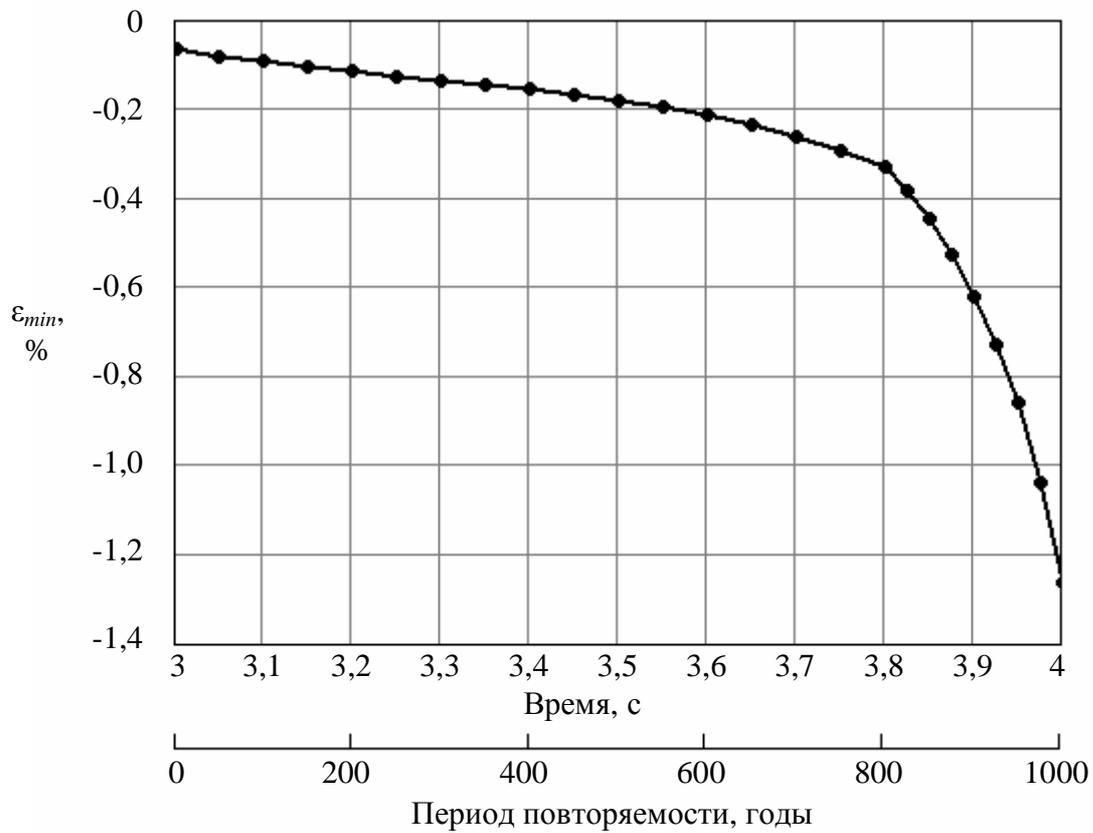


Рис. 6. Минимальная осевая деформация

Таблица 2. Параметры распределения

№ п/п	Случайная величина	Закон распределения	Числовые характеристики
1	Сейсмические смещения $u_{yp} = u_{zp}$	Нормальный	Математическое ожидание $\langle u_{yp} \rangle = 915$ мм Среднее квадратическое отклонение $S_{u_{yp}} = 0,1 \langle u_{yp} \rangle = 91,5$ мм
2	Сейсмическое смещение u_{xp}	Нормальный	Математическое ожидание $\langle u_{xp} \rangle = -457,5$ мм Среднее квадратическое отклонение $S_{u_{xp}} = 0,1 \langle u_{xp} \rangle = 45,75$ мм
3	Модуль упругости материала трубы E	Равномерный	Минимальное значение $E_{min} = 1,90 \cdot 10^5$ МПа Максимальное значение $E_{max} = 2,22 \cdot 10^5$ МПа
4	Предел текучести материала трубы σ_T	Нормальный	Математическое ожидание $\langle \sigma_T \rangle = 483$ МПа Среднее квадратическое отклонение $S_{\sigma_T} = 0,05 \langle \sigma_T \rangle = 24,15$ МПа
5	Толщина стенки трубы специальной секции δ	Нормальный	Математическое ожидание $\langle \delta \rangle = 25,3$ мм Среднее квадратическое отклонение $S_{\delta} = 0,05 \langle \delta \rangle = 1,265$ мм

Здесь q – общее число реализаций; y_i – значение выходной случайной величины на i -ой реализации; r_i – число Кристоффеля выходной случайной величины; n – число входных случайных величин; q_k – число узлов интерполирования, выбранное для k -ой входной случайной величины; r_{kj} – числа Кристоффеля для k -ой входной случайной величины.

В рассматриваемой задаче выходными случайными величинами являются наибольшие по модулю значения деформаций ϵ_b , ϵ_{ac} и ϵ_{at} , используемые в критериях землетрясений SLE и DLE . Их математические ожидания и средние квадратические отклонения сведены в табл. 3.

Функцией безопасности $B(t)$ называется вероятность того, что на отрезке времени $[0, t]$ ни разу не возникнет аварийная ситуация:

$$B(t) = P\{v(\tau) \in \Omega; \tau \in [0, t]\}, \quad (2)$$

где $v(t)$ может совпадать с вектором качества, входящим в определение для вероятности безотказной работы [1]. Здесь Ω – область безопасности, которая включает в себя допустимую область по отношению к эксплуатационным отказам и предельным состояниям.

Дополнение функции безопасности до единицы называется функцией риска

Таблица 3. Математические ожидания и средние квадратические отклонения выходных случайных величин

Характеристики случайной величины	Землетрясение SLE			Землетрясение DLE		
	ϵ_b	ϵ_{ac}	ϵ_{at}	ϵ_b	ϵ_{ac}	ϵ_{at}
$\langle y \rangle, \%$	0,0413	-0,1166	0,0000	0,9157	-1,4986	0,3329
$S_y, \%$	0,00390	0,00568	0,0000	0,6293	1,0021	0,2676
$S_y / \langle y \rangle$	0,095	0,049	–	0,687	0,669	0,804

$$R(t) = 1 - B(t). \quad (3)$$

Случайные события, являющиеся потенциальным источником аварийной ситуации, удобно разбить на классы $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m$, которые могут отличаться уровнем интенсивности воздействий, иметь различные источники или различную физическую природу.

Пусть все m классов событий образуют независимые пуассоновские потоки, интенсивности которых I_j ($j = 1 \dots m$) в общем случае различны. При этом обратные величины $q_j = 1/I_j$ имеют смысл среднего периода ожидания (или периода повторяемости для землетрясений). Тогда для функции безопасности можно получить следующую формулу [1]:

$$B(t) = \exp \left[- \sum_{j=1}^m \lambda_j t R(\Phi_j) \right], \quad (4)$$

где

$$R(\Phi_j) = 1 - B(\Phi_j).$$

Здесь $B(\Phi_j)$ – условная безопасность, равная вероятности того, что авария не наступит при осуществлении события $E \in \Phi_j$; $R(\Phi_j)$ – условный риск.

Если $I_j t R(\Phi_j) \ll 1$ при всех j и всех рассматриваемых t , то из выражения (4) следует более простая формула для оценки риска:

$$R(t) \approx \sum_{j=1}^m \lambda_j t R(\Phi_j). \quad (5)$$

В нашем случае $m = 2$, поскольку расчет выполняется на два типа сейсмических воздействий (проектное землетрясение SLE и максимальное расчетное землетрясение DLE). Таким образом,

$$R(t) = [\lambda_{SLE} R(\Phi_{SLE}) + \lambda_{DLE} R(\Phi_{DLE})] t, \quad (6)$$

где

$$R(\Phi_{SLE}) = 1 - B(\Phi_{SLE}); \quad R(\Phi_{DLE}) = 1 - B(\Phi_{DLE}),$$

причем $q_{SLE} = 200$ лет; $q_{DLE} = 1000$ лет; $I_{LE} = 5 \cdot 10^{-3}$ 1/год; $I_{DLE} = 10^{-3}$ 1/год.

Условные показатели безопасности можно трактовать как вероятности удовлетворения критериев проектирования SLE и DLE :

$$\begin{aligned} B(\Phi_{SLE}) &= P\{v(\tau) \in \Omega_{SLE}; \tau \in [0, t_{SLE}]\}; \\ B(\Phi_{DLE}) &= P\{v(\tau) \in \Omega_{DLE}; \tau \in [t_{SLE}, t_{DLE}]\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $t_{SLE} = 3,2$ с; $t_{DLE} = 4$ с. Следует напомнить, что в последних двух формулах под t подразумевается не физическое время, а просто монотонно возрастающий параметр приложения нагрузки.

Соотношения (7) можно представить в более удобной для практического использования форме. Учитывая, что вектор качества системы квазимоноотонно приближается к границам допустимых областей, запишем

$$\begin{aligned} B(\Phi_{SLE}) &= \min \left(\begin{array}{l} P\{\varepsilon_b(t_{SLE}) < 0,9\varepsilon_{Mmax}\}, \\ P\{|\varepsilon_{ac}(t_{SLE})| < 0,8|\varepsilon_w|\}, \\ P\{\varepsilon_{at}(t_{SLE}) < 2\% \} \end{array} \right); \\ B(\Phi_{DLE}) &= \min \left(\begin{array}{l} P\{\varepsilon_b(t_{DLE}) < 4\% \}, \\ P\{|\varepsilon_{ac}(t_{DLE})| < |\varepsilon_w|\}, \\ P\{\varepsilon_{at}(t_{DLE}) < 4\% \} \end{array} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Входящие в эти выражение вероятности легко находятся с помощью функций распределения соответствующих выходных параметров. Сопоставляя данные кривые с допустимыми значениями критериев землетрясений SLE и DLE (см. табл. 1), можно отметить следующее. Все критерии проектирования за исключением одного удовлетворяются с высокой вероятностью (близкой к единице). Вероятность выполнения критерия прочности при сжатии (гофрообразовании) для землетрясения DLE $P\{|\varepsilon_{ac}(t_{DLE})| < |\varepsilon_w|\}$ составляет всего 62,5 % (см. рис. 7). Таким образом, $B(\Phi_{DLE}) = 0,625$, а для землетрясения SLE можно принять, что $B(\Phi_{SLE}) \approx 1$.

Вычисленная по формулам (5) и (3) функция полной безопасности приведена на рис. 8. Как видно из графика, например, для трубопровода со сроком службы $T = 40$ лет безопасность составляет 0,985.

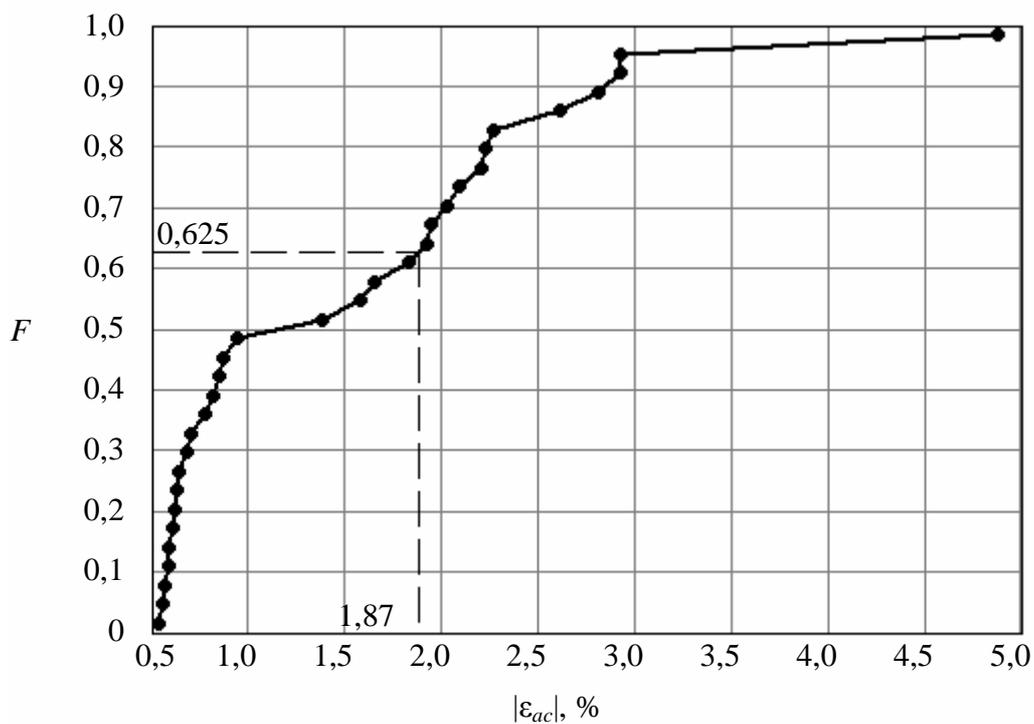


Рис. 7. Функция распределения деформации ε_{ac} для землетрясения DLE

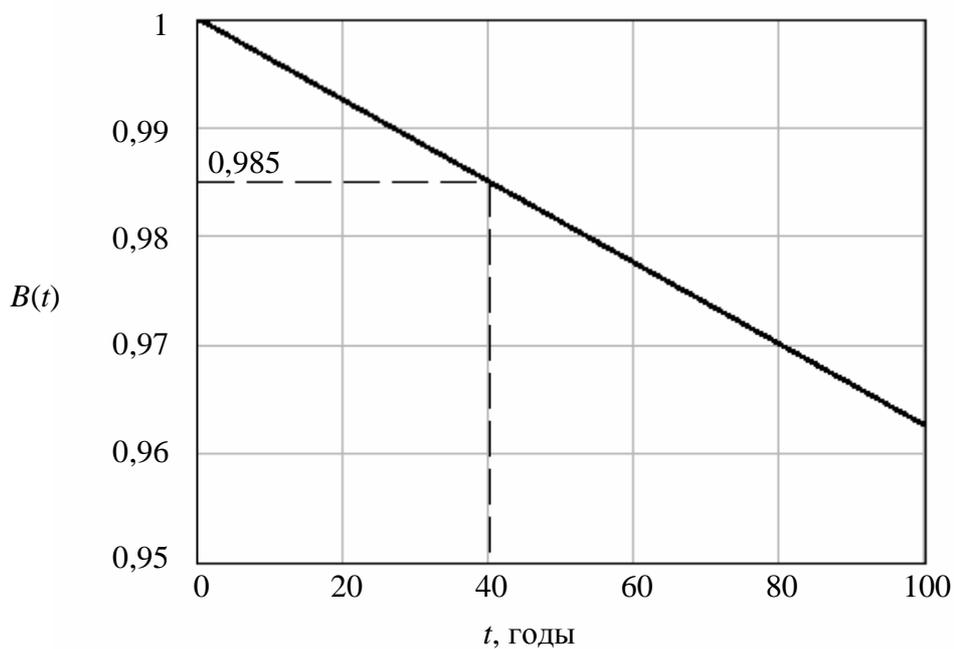


Рис. 8. Функция безопасности

Список литературы

1. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

2. Обеспечение надежности трубопроводных систем / С. Н. Перов, С. И. Аграфенин, Ю. В. Скворцов, Ю. Л. Тарасов. – Самара: ООО «Издательство СНЦ», 2008. – 246 с.