

УДК 33

DOI: 10.34670/AR.2020.83.84.018

Экономические аспекты динамического анализа трубопроводных конструкций

Шевцов Александр Иванович

Кандидат технических наук, доцент,
Московский финансово-промышленный университет «Синергия»,
125190, Российская Федерация, Москва, просп. Ленинградский, 80;
e-mail: shevtsov92@yandex.ru

Аннотация

В статье анализируются способы описания свойств трубопроводных систем, рассматриваются детерминистический и вероятностный подходы к расчету трубопроводов на динамические и сейсмические воздействия. С точки зрения детерминистического подхода анализируется описание возможных нагрузок и методов динамического анализа трубопроводов на основе метода конечных элементов, рассмотрены возможности использования спектральной и шаговой методик интегрирования во времени соответствующих уравнений движения. Представлены виды конечных элементов, используемых для динамического анализа трубопроводных систем. Автор отмечает, что обеспечение безопасности трубопроводов является в настоящее время актуальной задачей. Полученная матрица жесткости способна учесть изменение центральной линии элемента, проходящей через центры тяжести поперечных сечений, деформации поперечного сдвига, внутреннее давление внутри трубопроводов, изменение свойств материала из-за изменения температуры, то есть весьма точно описывает геометрию и свойства трубопровода.

Для цитирования в научных исследованиях

Шевцов А.И. Экономические аспекты динамического анализа трубопроводных конструкций // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2020. Том 10. № 5А. С. 158-165. DOI: 10.34670/AR.2020.10.57.019

Ключевые слова

Трубопроводные системы, динамические и сейсмические нагрузки, метод конечных элементов, методы интегрирования во времени уравнений движения, концепция «жесткая платформа», матрицы массы, жесткости, демпфирования, спектры воздействия, акселерограммы, регулирование нагруженности конструкций, детерминистический и вероятностный подходы, пассивное и активное гашение колебаний.

Введение

Обеспечение безопасности трубопроводов, часто имеющих значительные размеры, связывающих оборудование технологических систем в единое целое и находящихся под действием как статических и динамических (переходных) эксплуатационных нагрузок, так и сейсмического нагружения, остается актуальной задачей. Снижение уровня их соответствующей нагруженности на практике достигается методами, требующими теоретического и расчетного обоснований еще на стадии проектирования.

При расчете конструкций на сейсмические воздействия важнейшим моментом является количественное предсказание и описание характеристик входного воздействия. Практикой проектирования в сейсмически активных районах подтверждается критерий сейсмостойкости, основанный на рассмотрении двух уровней сейсмической активности, с которыми связан выбор двух видов землетрясений: максимально возможное землетрясение в данном районе (МВЗ) и проектное землетрясение (ПЗ), максимальные ускорения при котором составляют 50% от ускорений МВЗ. Это означает, что все трубопроводные системы проектируются и конструируются с расчетом того, что при воздействии любого землетрясения магнитуды, определяемой уровнем МВЗ, напряжения в элементах этих систем не превосходили бы предела текучести. При последующем же воздействии любого землетрясения уровня ПЗ эти системы должны работать без какой-либо потери надежности.

Способы описания свойств трубопроводных систем

Для оценки МВЗ необходима полная документация по наиболее значительным разломам и сейсмотектоническим зонам в пределах некоторого радиуса от рассматриваемого участка. Из корреляции записанной сейсмической активности с учетом существующих разломов и сейсмотектонических зон выясняется полная картина различных землетрясений с наиболее высоким уровнем колебательных движений почвы, возможных на рассматриваемом участке. Расчет конструкции производится, исходя либо из спектра реакций, построенного для данного участка, либо в качестве входного воздействия может быть принята акселерограмма наиболее сильного землетрясения. Иногда для описания входного воздействия используют синтезированную акселерограмму, представляющую собой максимальные ускорения, выбранные из всех имеющихся в распоряжении для данной площадки акселерограмм в различные моменты времени. Такой подход носит название детерминистического.

В последние годы получила интенсивное развитие теория случайных процессов и ее многочисленные направления. Основы статистической теории сейсмостойкости, например, изложены в работах [Болотин, 1981; Болотин, 1971]. Особенностью такого подхода является необходимость наличия данных по всем реализациям сильных движений почвы на участке строительства той или иной технологической системы. С другой стороны, вероятностные характеристики для возмущений такого типа зависят и от проектируемой конструкции. Поэтому решению уравнений случайных колебаний предшествует большая подготовительная работа измерения и анализа случайных воздействий для получения вероятностных характеристик входного воздействия.

Методы статистического моделирования [Болотин, 1981] дают возможность получать реализации истории нагружения и поведения конструкций в стохастическом аспекте, а статистическое моделирование позволяет выявить наиболее вероятные для рассматриваемого

участка характеристики входа. Однако дальнейший расчет конструкций с точки зрения как детерминистического, так и вероятностного подходов принципиальных различий не имеет. Даже получив все возможные для данного участка реализации сейсмического воздействия, тем не менее расчет отклика конструкции на каждое такое воздействие остается важной задачей. Это предполагает просчет большого числа вариантов, поэтому предъявляет повышенные требования к эффективности используемых методов расчета.

Особенности задания сейсмического воздействия тесно связаны с выбором основания. Самой популярной при сейсмических расчетах является концепция «жесткой платформы», предполагающая, что сейсмическое воздействие одновременно действует на все точки конструкции, соприкасающиеся с грунтом, одинаково. Для многих конструкций трубопроводов такое предположение является достаточно верным. Этот же вывод может быть подтвержден и в связи с исследованиями по выбору наиболее опасного направления сейсмического воздействия. Другим важным моментом является вопрос учета влияния движения грунта на движение опор трубопроводов. Обычно этим влиянием пренебрегают, если конструкция податливая, а основание скальное, в силу чего передаваемая основанию от конструкции энергия мала. Для таких трубопроводных систем это условие выполняется в полной мере.

Различные подходы могут быть и к трактовке самого землетрясения. Если для описания землетрясения используют спектры действия либо нормативные спектры и коэффициент сейсмичности, заданные для данного участка, то имеется возможность лишь оценить максимальные значения перемещений, усилий и напряжений, возникающих в трубопроводной системе, а также установить, какая частота и форма колебания преобладают при данном землетрясении. Использование же сейсмических воздействий, описываемых акселерограммой, позволяет получить историю нагружения и поведения конструкции, учесть волновые эффекты, реализовать некоторые выявленные при таком рассмотрении дополнительные ресурсы прочности, а поэтому является и более предпочтительным.

Полагая сейсмическое воздействие известным, основное внимание уделяется вопросам исследования напряженно-деформированных состояний трубопроводных систем и выявлению тех возможностей, которые позволят снизить уровни перемещений, усилий воздействия на опоры и связываемое ими оборудование, а также напряжений в самих трубопроводах. Перемещения, усилия и напряжения в трубопроводах, подверженных действию эксплуатационных и сейсмических нагрузок, нередко превышают допустимый уровень. Их снижение часто достигается изменениями в самой конструкции трубопровода, а именно увеличением либо диаметра труб, либо их толщины, либо того и другого одновременно, либо за счет изменений в трассировке трубопроводов. Как правило, такие способы весьма дорогостоящие. Наиболее перспективным представляется динамическое гашение колебаний.

Методы динамического гашения колебаний [Фролов, 1981] связаны с использованием активных или пассивных гасителей. В трубопроводных системах в качестве пассивных гасителей колебаний могут использоваться как податливые опоры, так и гидроамортизаторы. Активные динамические гасители отличаются от пассивных тем, что имеют собственный источник энергии, и речь здесь идет уже о применении систем автоматического регулирования. Для трубопроводов активное виброгашение может быть реализовано путем приложения в какой-либо точке рассматриваемой трубопроводной системы нагрузки, уравнивающей возникающие в ней внутренние усилия в течение необходимого интервала времени. Очевидно, что такое противонагружение может иметь наибольший эффект, если точкой приложения противонагрузки (которой могут быть либо сила, либо момент, либо ускорение в какой-то точке

трубопровода) выбрана та точка трассы трубопровода и то направление, где перемещение для всех рассматриваемых моментов времени достигает максимальных значений. Еще одним способом является комбинирование активных и пассивных элементов.

Для решения задачи регулирования нагруженности пригодными являются лишь те методы, которые позволяют получить в результате расчета изменение во времени перемещений, усилий и напряжений отклика трубопровода на динамические и сейсмические воздействия. С другой стороны, необходимо использовать и такие методы описания свойств трубопроводных систем, которые позволят достаточно точно и вместе с тем наиболее экономично описать геометрию трубопроводов, их жесткостные и инерционные свойства, разнородность материалов и поперечных сечений труб, учесть сложные граничные условия, статические, динамические и сейсмические нагрузки. Исходя из вышеизложенного, для описания конструкций трубопроводов следует использовать метод конечных элементов, а для анализа динамического отклика – либо спектральную «динамическую», либо шаговые методики интегрирования во времени уравнений движения.

Поскольку арматура трубопроводов, а также некоторые участки трубопроводной системы имеют сложное местное распределение напряжений, представляется целесообразным расчет трубопроводных систем проводить в два этапа: на первом этапе трубопровод, находящийся под действием эксплуатационных, динамических и сейсмических нагрузок, рассматривать в одномерной постановке, а на втором этапе арматуру и наиболее сложные и ответственные его элементы – в трехмерной с использованием результатов расчетов первого этапа. Это обеспечит высокую экономичность и разрешающую способность производимых расчетов.

Используя функционал

$$J^* = \int_V \left[\sigma_{ij} \left(e_{ij} - \frac{1}{2} u_{ij} - \frac{1}{2} u_{ji} \right) - U(e_{ij}) + F_i u_i \right] dV + \int_{S_T} T_i^* u_i ds + \\ + \int_{S_u} \sigma_{ij} n_j (u_i - u_i^*) ds - \frac{1}{2} \int_V \rho \ddot{u}_i dV - - \frac{1}{2} \int_V \mu \dot{u}_i dV ,$$

где σ_{ij} и e_{ij} – симметричные тензоры напряжений и деформаций; u_i – вектор перемещений; $U(e_{ij})$ – потенциал напряжений; F_i – компоненты вектора объемных сил; T_i^* – компоненты поверхностных сил, заданных на части поверхности S_T ; u_i^* – компоненты перемещений, заданных на части поверхности S_u ; ρ – плотность материала; μ – коэффициент затухания, в матричном виде уравнения движения могут быть записаны в следующем виде:

$$[M]\{\ddot{q}(t)\} + [C]\{\dot{q}(t)\} + [K]\{q(t)\} = \{F_0\} + \{F(t)\} - [M]\{\ddot{q}_0(t)\} ,$$

где $[M]$, $[C]$ и $[K]$ – общие матрицы массы, демпфирования и жесткости; $\{F_0\}$ – вектор статических нагрузок; $\{F(t)\}$ – вектор динамических нагрузок; $\{\ddot{q}_0(t)\}$ – вектор сейсмических ускорений; $\{\dot{q}(t)\}$ – вектор динамических перемещений точек трубопровода.

Такое представление уравнений движения систем позволяет как учесть начальную

статическую и динамическую нагруженность трубопровода, так и использовать задание землетрясения в виде акселерограммы.

Общая матрица массы трубопроводной системы $[M]$ получается по общеизвестным правилам [Зенкевич, 1975] из локальных для каждого элемента матриц масс. Может быть использована как матрица распределенной массы, которая, если известны функции формы $[N]$ для элемента e , определяется выражением $[M]^e = \int_V \rho [N]^T [N] dV$, так и матрица сосредоточенной массы, которая имеет диагональный вид и может быть получена непосредственно, полагая, что вся масса m , прилегающая к узлу, сосредоточена в этом узле. Если инерцией вращения пренебречь, матрица сосредоточенных масс трубопроводного элемента примет вид

$$[M]^e = \left(\frac{m}{2}\right) [1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0].$$

Если же инерцией вращения пренебречь нельзя, то

$$[M]^e = \left[\frac{m}{2}, \frac{m}{2}, \frac{m}{2}, J_x, J_y, J_z, \frac{m}{2}, \frac{m}{2}, \frac{m}{2}, J_x, J_y, J_z\right].$$

Следует, однако, отметить, что использование матрицы распределенной массы приводит к более точному определению форм собственных колебаний. Использование же матрицы сосредоточенных масс дает более точные значения собственных частот. Если используются методы шагового интегрирования во времени уравнений движения, для получения более точных значений собственных частот лучше использовать матрицу сосредоточенных масс, что дает значительные преимущества при программной реализации.

Внутреннее демпфирование в трубопроводных системах незначительно, порядка $2 \div 10\%$ от критического [Dowrick, 1987], вникать в собственно механизм демпфирования нет необходимости, так как общая матрица демпфирования $[C]$ может быть представлена через общие матрицы массы $[M]$ и жесткости $[K]$ [Wilson, 1972]:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K],$$

где α и β – коэффициенты пропорциональности.

Матрица жесткости трубопроводных элементов как для *прямолинейных*, так для *криволинейных участков трассы* может быть получена с помощью метода податливостей. Локальная матрица податливостей при ее обращении дает жесткость элемента:

$$[K_{BB}] = [f_{BB}]^{-1}.$$

Податливость стержня произвольной формы может быть дана выражением:

$$[f_{BB}] = \int_L [m]^T [D]^{-1} [m] dx,$$

где матрица $[m]$ получена вычислением реакций в произвольном сечении стержня от одного из единичных поворотов и смещений на конце стержня, когда остальные повороты и смещения равны нулю, а диагональная матрица $[D]$ имеет вид:

$$[D] = [EA, EA_y, EA_z, GJ_x, GJ_y, GJ_z],$$

где E и G – соответственно модули Юнга и сдвига; A – площадь поперечного сечения стержня; A_y и A_z – площади сдвига для поперечной сдвиговой силы в направлении главных осей инерции сечения, J_x, J_y, J_z – соответствующие моменты инерции сечения.

Локальная матрица жесткости трубопроводного элемента имеет вид:

$$[k]^e = \begin{bmatrix} [H][K_{BB}][H]^T & [H][K_{BB}] \\ [K_{BB}][H]^T & [K_{BB}] \end{bmatrix},$$

а матрица $[H]$ получена таким же образом, как и матрица $[m]$.

Виды конечных элементов, используемых для динамического анализа трубопроводных систем, показаны на рисунке.

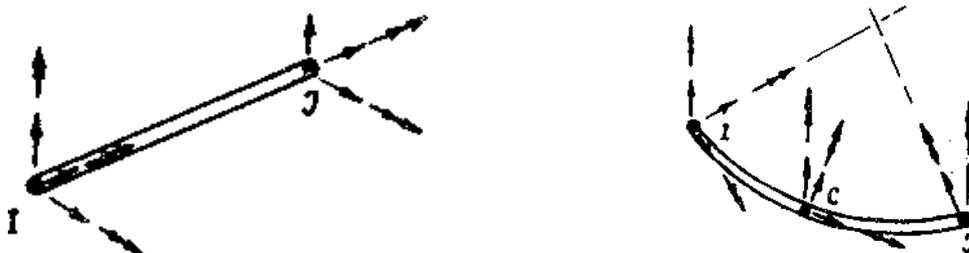


Рисунок 1 – Виды конечных элементов, используемых для динамического анализа

Заключение

Таким образом, нами были проанализированы способы описания свойств трубопроводных систем, а также рассмотрены детерминистический и вероятностный подходы к расчету трубопроводов на динамические и сейсмические воздействия. Представлена матрица жесткости, полученная с помощью метода податливостей, которая способна учесть изменение центральной линии элемента, проходящей через центры тяжести поперечных сечений, деформации поперечного сдвига, внутреннее давление внутри трубопроводов, изменение свойств материала из-за изменения температуры, то есть весьма точно описывает геометрию и свойства трубопровода.

Библиография

1. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.
2. Болотин В.В. Статистическое моделирование в расчетах на сейсмостойкость // Строительная механика и расчет сооружений. 1981. № 1. С. 60-64.

3. Бородавкин П.П., Синюков А.М. Прочность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1984. 243 с.
4. Фролов К.В. (ред.) Вибрации в технике. М.: Машиностроение, 1981. 456 с.
5. Ефимов А.А. Колебания и динамическая устойчивость глубоководных нефтегазопроводов: автореф. дис. канд. техн. наук. СПб., 2009. 19 с.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 543 с.
7. Петров И.П., Спиридонов В.В. Надземная прокладка трубопроводов. М.: Недра, 1965. 450 с.
8. Соколов В. Г. Колебания, статическая и динамическая устойчивость трубопроводов большого диаметра: автореф. дис. д-ра техн. наук. СПб., 2011. 38 с.
9. Dowrick D.J. Earthquake resistant design for engineering and architects. New York: John, Willey & Sons Inc., 1987. 519 p.
10. Wilson E.L., Piensien J. Evaluation of orthogonal deamping matrice // International Journal for Numerical Methods. 1972. Vol. 4. P. 5.

Economics aspects of dynamic analysis of pipeline structures

Aleksandr I. Shevtsov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Moscow University for Industry and Finance "Synergy",
125190, 80 Leningradskii av., Moscow, Russian Federation;
e-mail: shevtsov92@yandex.ru

Abstract

The article analyzes the methods of describing the properties of pipeline systems, examines the deterministic and probabilistic approaches to the calculation of pipelines for dynamic and seismic effects. From the point of view of the deterministic approach, the description of possible loads and methods of dynamic analysis of pipelines based on the finite element method is analyzed, the possibilities of using spectral and step methods for integrating the corresponding equations of motion in time are considered. It is noted that ensuring the safety of pipelines, often of significant dimensions, connecting the equipment of technological systems into a single whole and under the influence of both static and dynamic (transient) operational loads and seismic loading, remains an urgent task. A decrease in the level of their corresponding loading in practice is achieved by methods that require theoretical and computational substantiation even at the design stage. The types of finite elements used for the dynamic analysis of pipeline systems are presented. The resulting stiffness matrix is able to take into account the change in the center line of the element passing through the centers of gravity of the cross sections, transverse shear deformations, internal pressure inside the pipelines, changes in material properties due to temperature changes, that is, it very accurately describes the geometry and properties of the pipeline.

For citation

Shevtsov A.I. (2020) Ekonomicheskie aspekti dinamicheskogo analiza truboprovodnykh konstruksii [Economics aspects of dynamic analysis of pipeline structures]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 10 (5A), pp. 158-165. DOI: 10.34670/AR.2020.10.57.019

Keywords

Piping systems, dynamic and seismic loads, finite element method, methods for integrating equations of motion in time, concept of "rigid platform", mass matrices, stiffness, damping, action spectra, accelerograms, regulation of structural loading, deterministic and probabilistic approaches, passive and active vibration damping.

References

1. Bolotin V.V. (1971) *Primenenie metodov teorii veroyatnosti i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenii* [Application of the methods of the theory of probability and the theory of reliability to the analysis of structures]. Moscow: Stroizdat Publ.
2. Bolotin V.V. (1981) Statisticheskoe modelirovanie v raschetakh na seismostoikost' [Statistical modeling in calculations for earthquake resistance]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural mechanics and calculation of structures], 1, pp. 60-64.
3. Borodavkin P.P., Sinyukov A.M. (1984) *Prochnost' magistral'nykh truboprovodov* [Strength of main pipelines]. Moscow: Nedra Publ.
4. Dowrick D.J. (1987) *Earthquake resistant design for engineering and architects*. New York: John, Willey & Sons Inc.
5. Efimov A.A. (2009) *Kolebaniya i dinamicheskaya ustoychivost' glubokovodnykh neftegazoprovodov. Dokt. Diss. Abstract* [Vibrations and dynamic stability of deep-water oil and gas pipelines. Doct. Diss. Abstract]. Saint Petersburg.
6. Frolov K.V. (ed.) (1981) *Vibratsii v tekhnike* [Vibrations in technology]. Moscow: Mashinostroenie Publ.
7. Petrov I.P., Spiridonov V.V. (1965) *Nadzemnaya prokladka truboprovodov* [Overhead laying of pipelines]. Moscow: Nedra Publ.
8. Sokolov V.G. (2011) *Kolebaniya, staticheskaya i dinamicheskaya ustoychivost' truboprovodov bol'shogo diametra. Dokt. Diss. Abstract* [Vibrations, static and dynamic stability of large-diameter pipelines. Doct. Diss. Abstract]. Saint Petersburg.
9. Wilson E.L., Piensien J. (1972) Evaluation of orthogonal deamping matrice. *International Journal for Numerical Methods*, 4, pp. 5.
10. Zenkevich O. (1975) *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in technology]. Moscow: Mir Publ.