

УДК 33

DOI: 10.34670/AR.2020.92.10.041

## Методолого-экономические аспекты решения задач антисейсмического проектирования

**Шевцов Александр Иванович**

кандидат технических наук, доцент,  
Кафедра Высшей математики и естественно научных дисциплин  
Московский финансово-промышленный университет «Синергия»,  
125190, Российская Федерация, Москва, просп. Ленинградский, 80;  
e-mail: shevcov@mail.ru

### Аннотация

Анализируются вероятностный и детерминистические подходы к расчёту трубопроводных конструкций в рамках антисейсмического проектирования, рассматриваются критерии сейсмостойкости конструкций, применяемые при их практических расчётах. Даются характеристики входного воздействия в случае сейсмического нагружения, предлагаются методики применения пассивного и активного гашения колебаний трубопроводных систем в качестве средства сейсмозащитных мероприятий. В работе показано, что наиболее целесообразно комплексное применение как спектральных, так и шаговых методик расчётов, что позволит в случае использования спектральных методик определить необходимый спектр собственных частот колебаний конструкции, а также оценить вклад в отклик конструкции каждой формы колебаний; в случае использования шаговых методик получить достоверную картину деформирования конструкции в тот или иной момент времени; на основании проведенных расчётов выбрать методику антисейсмической защиты конструкции (пассивное или активное гашение колебаний); осуществить расчёт и обоснованный выбор силовых факторов, действующих на ответственные элементы конструкций трубопроводов с целью детального анализа напряжённно-деформированного состояния этих элементов в качестве нагрузки для уточнённого анализа этих элементов.

### Для цитирования в научных исследованиях

Шевцов А.И. Методолого-экономические аспекты решения задач антисейсмического проектирования // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2019. Том 9. № 10А. С. 344-350. DOI: 10.34670/AR.2020.92.10.041

### Ключевые слова

Трубопроводные системы; динамические и сейсмические нагрузки; максимально возможное и проектное землетрясения; вероятностный и детерминистический подходы при выборе эффективных средств защиты конструкций от землетрясений; спектры воздействия, критерии сейсмостойкости; концепция «жёсткой платформы»; акселерограммы; пассивное и активное виброгашение.

## Введение

Важнейшим моментом при расчёте конструкций на сейсмические воздействия является определение и количественное предсказание существенных характеристик входного воздействия.

К расчётам на сейсмические воздействия предъявляются более жёсткие требования, чем для других конструкций, работающих в сейсмоопасных районах. Это касается в первую очередь выбора характеристик землетрясений, что, в конечном итоге, проявляется в повышении коэффициента сейсмичности для расчётов систем, конструкций и сооружений по сравнению с другими, работающими в данном районе. В странах, где имеются районы с высокой сейсмической активностью (в первую очередь США и Япония), имеются правила и критерии для такого выбора.

## Основное содержание

Критерий сейсмостойкости по правилам США (а эти правила взяты на вооружение и во многих других странах) основан на рассмотрении двух уровней сейсмической активности:

1) «максимальное»,

2) «расчётное»,

с которыми связан и выбор двух видов землетрясений:

1) максимально возможное землетрясение (МВЗ),

2) проектное землетрясение (ПЗ).

МВЗ – это землетрясение максимальной силы, которое возможно в данном районе, ПЗ – землетрясение, максимальные ускорения при котором составляют 50% от максимальных ускорений МВЗ.

Отечественный критерий сейсмостойкости также основан на рассмотрении двух уровней сейсмической активности, однако расчёты должны проводиться для проектного землетрясения (ПЗ) и максимального расчётного землетрясения (МРЗ). И МРЗ, и ПЗ характеризуются сейсмичностью площадки в баллах и набором аналоговых или синтезированных акселерограмм по трём компонентам для землетрясений со средней повторяемостью: ПЗ – 100 лет, МРЗ – до 10000 лет (ПЗ – не выше 6, МРЗ – не выше 9 баллов).

Предполагается, что все конструкции, системы и оборудование, непосредственно связанные с работой реактора, должны выполнять свои функции по обеспечению безопасности при землетрясении с интенсивностью до МРЗ включительно, а после прохождения землетрясения интенсивностью до ПЗ включительно – все эти системы должны сохранять свою работоспособность.

Для оценки МРЗ необходима полная документация по наиболее значительным разломам и сейсмостектоническим зонам в пределах некоторого радиуса от рассматриваемого участка (сюда включается также изучение геологической обстановки в пределах разлома, определение направления перемещений, прошлых подвижек по разлому, характеристик грунта, исследование опасных землетрясений, происходивших в прошлом на участке и вокруг него, измерение сейсмических движений на участке для изучения динамических характеристик района формации). Из корреляции записанной сейсмической активности с существующими разломами или сейсмостектоническими зонами выясняется полная картина различных землетрясений с наиболее высоким уровнем колебательных движений почвы, возможных на

рассматриваемом участке, а расчётное землетрясение определяется либо как событие данной магнитуды, связанное с известным разломом на определённом расстоянии от площадки, либо как событие с данной эпицентральной интенсивностью в ближайшей точке сеймотектонической зоны. В зависимости от этого производится выбор и нормировка набора представительных акселерограмм при построении спектра реакций (в первом случае – линейная нормировка по магнитуде и расстоянию, во втором – по типу ускорения).

Расчёт конструкций производится либо исходя из спектра реакций, построенного для данной площадки, либо в качестве входного воздействия принимают акселерограммы сильных землетрясений, нормированных к условиям участка строительства, либо синтезированные акселерограммы, представляющие собой максимальные ускорения, выбранные из всех имеющихся в распоряжении для данной площадки акселерограмм в различные моменты времени.

Особенности задания сейсмического воздействия самым тесным образом связаны с выбором основания, то есть, необходимо определить, как сейсмическая нагрузка будет действовать на рассматриваемую конструкцию. Самой популярной при сейсмических расчётах является концепция «жёсткой платформы». Она предполагает, что сейсмическое воздействие начинает действовать одновременно и одинаково на все точки конструкции, соприкасающиеся с грунтом.

Однако для некоторых элементов конструкций, систем и сооружений, какими, например, могут являться трубопроводы, имеющие значительную протяжённость в пространстве, эта концепция не всегда приводит к верным результатам, поскольку в этом случае контактирующие с грунтом точки их движутся по отличающимся законам, либо подвергаются воздействию, одинаковому в каждой точке контакта, но отличающемуся по времени начала действия.

При проектировании конструкций трубопроводов существенным моментом является и вопрос учёта влияния движения грунта на движение опор. Обычно этим влиянием пренебрегают вследствие его незначительности, если основание скальное, а конструкция относительно податливая. Тогда конструкция передаёт основанию очень малую энергию и, следовательно, можно использовать данные по замеренному свободному движению основания. В ряде случаев эти условия выполняются в полной мере. Однако, если имеется жёсткая конструкция, опирающаяся на сравнительно мягкое основание, передаваемая от конструкции энергия может быть значительной и приведёт к ошибкам.

Следовательно, для сейсмических воздействий существенным является требование обязательной привязки параметров сейсмического нагружения как к сеймотектоническим и, в первую очередь, геологическим условиям конкретной площадки, так и к условиям работы конкретной конструкции.

Ещё одним важным элементом анализа прочности является интерпретация результатов. Вычисленные в оборудовании и трубопроводах напряжения и перемещения должны быть такими, чтобы после прохождения землетрясения уровня МРЗ была обеспечена остановка и отвод от них остаточного тепла при условии отсутствия неконтролируемого поступления в окружающую среду вредоносных выбросов, а после прохождения землетрясения уровня ПЗ – рассчитываемая конструкция или система сохраняла свою работоспособность. Поэтому при сейсмических расчётах допускаемые напряжения для трубопроводов и их оборудования повышаются. При оценке уровней общих мембранных напряжений, вычисленных в конструкциях от действия нормальных условий эксплуатации (НУЭ) и сейсмических нагрузок уровня ПЗ, это повышение составляет 20%, для приведенных напряжений, определяемых по

суммам общих или местных мембранных и общих изгибных с учётом напряжений компенсации – 60%. В случаях, когда трубопроводы и оборудование систем рассчитываются на воздействие землетрясений уровня МРЗ в сочетании с нагрузками НУЭ, при оценке отмеченных выше категорий напряжений допускаемые напряжения должны быть увеличены, соответственно, на 40% и на 80%.

Изложенный здесь подход носит название детерминистического.

В последние годы очень интенсивно развивалась теория случайных процессов и её многочисленные направления. Там же заложены основы статистической теории сейсмостойкости. Особенностью статистических методов является то, что методы теории вероятностей и теория случайных процессов позволяют исследовать массовые события независимо от точного поведения отдельных индивидуальных событий, однако для применения методов теории вероятностей необходимым условием является возможность многократного осуществления случайного события в практически однородных условиях, то есть, только при массовых событиях имеет смысл применять вероятностные методы исследования. Для определения сейсмических нагрузок, действующих на опоры, стохастические модели могли быть использованы, если бы имелись неограниченные данные движений почвы. Однако на практике данные сильных движений почвы в форме акселерограмм весьма ограничены. И хотя было бы желательно, с этой точки зрения, иметь данные для всех реализаций, получить их невозможно в принципе. С другой стороны, вероятностные характеристики для возмущений такого типа зависят и от проектируемой конструкции, поэтому решению уравнений случайных колебаний предшествует очень большая подготовительная работа, связанная с измерением и анализом случайных воздействий для получения вероятностных характеристик входа. Для аналитических целей очень часто применяют набор модельных функций, по своим свойствам являющихся простейшим видом случайной функции – белым шумом, – значения которой при разности  $t - t_1$  отличны от нуля, некоррелированы, что физически эквивалентно условию об абсолютной безынерционности процесса, а это, конечно, неверно.

Методы статистического моделирования 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 расчёт самой конструкции, с точки зрения как детерминистического, так и вероятностного подходов, не имеет принципиальных различий. Даже имея все возможные для данного участка реализации сейсмического воздействия, тем не менее весьма важной задачей остаётся расчёт отклика конструкции на каждое из таких воздействий, что предполагает просчёт нескольких вариантов, а также предъявляет повышенные требования к эффективности используемых методов расчёта.

Полагая сейсмическое воздействие известным, основное внимание следует уделить вопросам исследования напряжённо-деформированных состояний трубопроводных систем, их ресурса с учётом статической, динамической и сейсмической нагрузки и выявлению тех возможностей, которые позволят снизить уровни перемещений, усилий воздействия на опоры и оборудование трубопроводных систем, а также напряжений в конструкции трубопроводов.

Результатом расчёта трубопроводной системы на динамическую и сейсмическую нагрузки являются знания об изменении во времени перемещений, силовых факторов и напряжений. Нередко оказывается, что рассматриваемая конструкция трубопровода под действием приложенных как статических, так и динамических, в том числе сейсмических, нагрузок либо имеет превышающие допустимый уровень перемещения, либо в каких-то точках её возникают

недопустимые усилия или напряжения. Для борьбы с такого рода явлениями имеются различные возможности. Иногда цели достигаются изменениями в конструкции трубопровода, увеличивая диаметры поперечных сечений, либо толщины стенок труб, либо и то, и другое одновременно. Однако такой путь часто оказывается весьма дорогостоящим. Тогда следует применять динамическое гашение колебаний.

Методы динамического гашения колебаний основаны на присоединении к объекту виброзащиты дополнительных устройств с целью изменения его вибрационного состояния, а работа динамических гасителей состоит в формировании силовых воздействий, передаваемых на объект. Эти методы описаны в литературе. Динамические гасители колебаний, как правило, используют для достижения локального эффекта: понижения виброактивности объекта в местах крепления гасителей. Они могут быть либо пассивными, либо активными. В случае трубопроводов пассивное виброгашение может быть реализовано, например, установкой в некоторых точках трубопроводной системы дополнительных жёстких опор. В тех случаях, когда увеличение числа промежуточных жёстких опор по каким-либо причинам невозможно, рассматривается возможность установки либо податливых опор, либо использования гидроамортизаторов. Для случаев сейсмических воздействий гашение динамических перемещений может быть осуществлено путём использования фрикционных опор, которые обладают способностью с помощью трения значительно рассеивать энергию сейсмического воздействия.

Активные динамические гасители отличаются от пассивных тем, что имеют собственные источники энергии, то есть, здесь уже идёт речь о применении систем автоматического регулирования. Использование активных элементов расширяет возможности динамического виброгашения, поскольку позволяет производить непрерывную подстройку параметров динамического гасителя в функции действующих возмущений.

Для трубопроводов активное виброгашение может быть реализовано путём приложения в какой-либо точке рассматриваемой трубопроводной системы нагрузки, которая уравновешивала бы возникающие в ней внутренние усилия в течение необходимого интервала времени. Представляется очевидным, что в качестве нагружающего воздействия может быть выбрано, наряду с каким-либо силовым фактором (сила, момент), и взятое с противоположным знаком ускорение какой-то точки системы в любом направлении. Также очевидным представляется, что наибольшего эффекта такое противонагружение достигнет для случая, когда в качестве точки приложения противонагрузки выбрать ту точку трассы трубопровода и то направление, где перемещение для всех рассматриваемых моментов времени достигает максимальных значений. Другим способом является комбинирование пассивных и активных элементов.

## Заключение

Следует отметить, что для регулирования нагруженностью трубопроводных систем с помощью активных динамических гасителей, для соответствующих этому случаю расчётов, пригодными являются лишь методы, дающие в результате историю динамического отклика.

Тем не менее наиболее целесообразно комплексное применение как спектральных, так и шаговых методик расчётов, что позволит:

– в случае использования спектральных методик определить необходимый спектр собственных частот колебаний конструкции, а также оценить вклад в отклик конструкции

каждой формы колебаний;

– в случае использования шаговых методик получить достоверную картину деформирования конструкции в тот или иной момент времени;

– на основании проведенных расчётов выбрать методику антисейсмической защиты конструкции (пассивное или активное гашение колебаний);

– осуществить расчёт и обоснованный выбор силовых факторов, действующих на ответственные элементы конструкций трубопроводов с целью детального анализа напряжённо-деформированного состояния этих элементов в качестве нагрузки для уточнённого анализа этих элементов.

## Библиография

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций при проектировании, сооружении и эксплуатации (ОПБ-82). – Атомная энергия, 1983, т.54, вып.2, с. 151-160
2. Информационный бюллетень №8 (656)-81. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов АЭС с водо-водяными реакторами на сейсмические воздействия. – М. Госгортехнадзор, 1981. – 47 с.
3. Болотин В.В. Статистическое моделирование в расчётах на сейсмостойкость. – Строит. механика и расчёт сооружений, 1981, №1, с. 60-64
4. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений. – М.: Стройиздат, 1971. – 255 с.
5. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 2 изд., 1965. – 278 с.
6. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979. – 335 с.
7. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
8. Вибрации в технике. Справочник в 6-ти т. под ред. К.В. Фролова, т.6. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
9. Anderson J.C., Sabir A.R. Seismic Response of Pipelines on Friction Supports. – J. Eng. Mech. Div., 1976, Apr., p. 275-291

## Methodological and economic aspects of solving the problems of antiseismic design

**Aleksandr I. Shevtsov**

Associate Professor of the Department of higher mathematics and natural sciences,  
Moscow University for Industry and Finance "Synergy",  
125190, 80 Leningradskii av., Moscow, Russian Federation;  
e-mail: shevcov@mail.ru

### Abstract

The probabilistic and deterministic approaches to the calculation of pipeline structures within the framework of antiseismic design are analyzed, the criteria for the earthquake resistance of structures used in their practical calculations are considered. Characteristics of the input action in the case of seismic loading are given, methods for using passive and active damping of vibrations of pipeline systems as a means of seismic protection are proposed. It is shown in the work that the most appropriate is the integrated application of both spectral and step calculation methods, which, if spectral methods are used, will determine the necessary spectrum of eigenfrequencies of the structural vibrations, as well as evaluate the contribution to the design response of each vibration form; in the case of using step-by-step techniques, to obtain a reliable picture of the deformation of

the structure at a given moment in time; based on the calculations, choose the method of antiseismic protection of the structure (passive or active damping of vibrations); to calculate and make a reasonable choice of force factors acting on critical structural elements of pipelines with the aim of a detailed analysis of the stress-strain state of these elements as a load for a more accurate analysis of these elements.

### For citation

Shevtsov A.I. (2019) Metodologo-ekonomicheskie aspekty resheniya zadach antiseismicheskogo proektirovaniya [Methodological and economic aspects of solving the problems of antiseismic design]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 9 (10A), pp. 344-350. DOI: 10.34670/AR.2020.92.10.041

### Keywords

Piping systems; dynamic and seismic loads; the maximum possible and design earthquake; probabilistic and deterministic approaches when choosing effective means of protecting structures from earthquakes; exposure spectra, seismic resistance criteria; concept of a “rigid platform”; accelerograms; passive and active vibration damping.

### References

1. General provisions for ensuring the safety of nuclear plants in the design, construction and operation (OPB-82). - Atomic energy, 1983, vol. 54, issue 2, p. 151-160
2. Newsletter No. 8 (656) -81. Standards for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants with water-cooled reactors for seismic effects. - M. Gosgortekhnadzor, 1981.- 47 p.
3. Bolotin V.V. Statistical modeling based on earthquake resistance. - Builds. mechanics and calculation of structures, 1981, No. 1, p. 60-64
4. Bolotin V.V. The application of methods of probability theory and reliability theory in the calculation of structures. - M.: Stroyizdat, 1971. - 255 p.
5. Bolotin V.V. Statistical methods in structural mechanics. - M.: Stroyizdat, 2nd ed., 1965.-- 278 p.
6. Bolotin V.V. Random vibrations of elastic systems. - M.: Nauka, 1979. - 335 p.
7. Svetlitsky V.A. Random vibrations of mechanical systems. - M.: Mechanical Engineering, 1976. - 216 p.
8. Vibration in technology. Handbook in 6 volumes. Ed. K.V. Frolova, T. 6. - M.: Mechanical Engineering, 1981. - 456 p.
9. Anderson J.C., Sabir A.R. Seismic Response of Pipelines on Friction Supports. - J. Eng. Mech Div., 1976, Apr., p. 275-291