

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ СЕЙСМОСТОЙКОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Демишин С. В., к. т. н., руководитель испытательного подразделения ООО «ЦКСИ», e-mail: sergevdm@yandex.ru

Высокие требования по виброустойчивости к трубопроводной арматуре вызывают определенные затруднения как при ее проектировании, так и при испытаниях готовых изделий. Настоящая статья обращает внимание читателя на эффективные способы повышения сейсмостойкости, виброустойчивости и вибропрочности трубопроводной арматуры для атомных станций.

В настоящее время при проектировании атомных станций в Российской Федерации используются ужесточенные требования к устойчивости конструкций и оборудования в части сейсмостойкости. Повышающий коэффициент для условий максимального расчетного землетрясения (МРЗ) равен 1,4, что соответствует максимальному значению сейсмического воздействия до 4,2 g для трубопроводной арматуры (далее – арматуры). Предъявление к оборудованию столь высоких требований по устойчивости к сейсмическому воздействию обнаруживает следующие проблемы: ранее разработанные образцы не отвечают новым требованиям; существующее испытательное оборудование (вибростенды) не может обеспечить испытательный режим для всей номенклатуры изделий.

Существуют ли возможности «законного» снижения уровня сейсмического воздействия для расчета или испытаний оборудования, поставляемого на АЭС? По крайней мере для арматуры такая возможность имеется. Для этого следует связать арматуру непосредственно со строительными конструкциями. В этом случае есть все основания принять за расчетное или испытательное воздействие синусоиду с частотой, меняющейся в диапазоне сейсмического спектра реакции, соответствующей высотной отметке, и амплитудой, равной пиковому ускорению ожидаемой акселерограммы 1,4 МРЗ для соответствующей высотной отметки, то есть «ускорению нулевого периода», или ZPA в международной классификации. Опыт согласования и проведения испытаний арматуры по таким модифицированным требованиям в ООО «ЦКСИ» имеется. Практика показывает, что уровень испытательного воздействия в таком случае может быть снижен едва ли не в десять раз по отношению к исходному.

Однако не всегда привязка арматуры к строительным конструкциям может быть одобрена проектной организацией. Это связано как с организационными трудностями, так и с физической возможностью в рамках проекта станции. Для того чтобы понять, как поступать в таких случаях, следует привести ряд сведений из теории колебаний. Рассмотрим рисунок 1, иллюстрирующий масштаб резонансных явлений в зависимости от основных параметров: коэффициента демпфирования и вида воздействия. Также следует обратить внимание на значения коэффициента демпфирования, приведенные в таблице 1 [2]. Для массивных металлических изделий, таких как арматура, данные из таблицы 1 показывают, что с увеличением значения величины механических напряжений, действующих в изделиях при динамическом воздействии, происходит увеличение значения коэффициента демпфирования от 1 до 4 процентов.

Таблица 1

Вид конструкции	Относительное демпфирование, %, для механического напряжения, доли предела текучести		
	0,25	0,25	1
Сварные стальные конструкции	1	2	4
Болтовые стальные соединения, железобетонные конструкции	1	4	7
Шкафы и панели	1	2	5
Сборочные узлы	1	2	7
Крупногабаритные изделия, стальные трубы диаметром более 300 мм	1	2	3
Стальные трубы диаметром 300 мм и менее	1	1	2

Используя консервативную оценку и принимая, что испытательное воздействие на резонансной частоте имеет форму непрерывного гармонического сигнала, согласно рисунку 1, возможно ожидать усиления колебаний изделия по соответствующей форме колебаний относительно амплитуды испытательного воздействия от 12 до 40 и более раз. Накопленный опыт натуральных испытаний арматуры различного типа на вибрационное воздействие показывает, что резонансное усиление обычно несколько меньше, чем на графике рисунка 1, но для содержания настоящей статьи это несущественно.

Усиление амплитуды резонансных колебаний в десятки раз может быть недопустимо. И если состояние основных корпусных деталей арматуры обычно остается неизменным во время и после испытательного воздействия, то приводная часть, как правило, сопротивляется динамическим деформациям «из последних сил», и случаи отказов не так уж и редки. Но даже подтвержденное сохранение работоспособности приводной части во время вибрационных испытаний не гарантирует получения положительного заключения по их итогам. Дело в том, что руководящий документ [3], определяющий методику, порядок, количественные и качественные требования к испытаниям

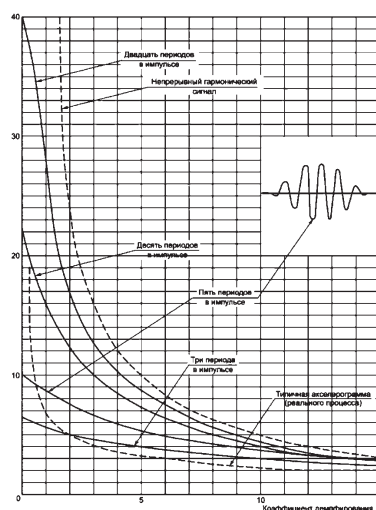


Рисунок 1 – Коэффициент усиления на резонансе для импульсов биений разной формы [1]

и их результатам, ограничивает максимальное ускорение центра масс привода значениями 8 и 5 g по горизонту и вертикали соответственно. При превышении указанных величин ускорения привода изделие считается не прошедшим испытания.

Самый надежный и обоснованный способ избежать превышения ускорений привода – повышение жесткости конструкции бугельной части арматуры с соответствующим отстраиванием собственных частот от максимальной нормативной испытательной (в части сейсмостойкости) частоты в 33 Гц. Но и здесь есть особенность: собственные частоты следует вывести за 100 Гц, так как верхняя граница испытательного режима на вибростойкость для арматуры составляет 100 Гц при ускорении 0,5–1,0 g в зависимости от типа арматуры [4]. Консервативная оценка показывает, что при испытательном воздействии в 1 g, резонансный отклик может достигать 12–40 g, что гарантированно больше предельного значения 8 g для привода. Получаем парадокс: производитель гарантирует безотказную работу привода при ускорениях до 8 g и при испытаниях на сейсмостойкость ускорение привода является критерием соответствия испытательным требованиям, а при испытаниях на вибростойкость – нет!

Повышение жесткости самой арматуры для увеличения собственных частот – дело практически невозможное, когда изделие уже существует «в железе». Единственно доступный в таком случае способ повышения собственных частот – установка дополнительных связей на привод. Довольно часто заинтересованными сторонами согласовывается вариант привязки привода к строительным конструкциям. Очевидная в таком случае выгода – гарантированное снижение амплитуды колебаний привода до безопасных значений включает в себе и скрытые режимы работы для корпусной и бугельной частей арматуры. Все дело в том, что в общем случае колебания системы «участок трубопровода – арматура» могут быть независимы от колебаний строительных конструкций. При наличии жестких связей между приводом арматуры и строительными конструкциями инерционные усилия от колебаний участка трубопровода с установленной на нем арматурой, будут передаваться на эти связи. Выполняется ли разработчиком арматуры проверка прочности связей на указанные усилия? Даже если связи оказываются достаточно прочными, то бугельная часть арматуры в таком случае испытывает перенапряжение. Лучший результат при повышении жесткости арматуры с минимальными изменениями конструктива может дать установка связей между фланцевой и приводной частями. В таком случае не нарушаются условия колебаний системы «участок трубопровода – арматура» и она колеблется в проектных пределах, разгружается бугельная часть арматуры, повышается жесткость арматуры, гарантированно снижается до безопасных значений ускорение привода.

Для проверки эффективности предложения установки дополнительных связей между приводом и фланцевой частью трубопровода было проведено численное моделирование методом конечных элементов с использованием отечественного программного средства «Зенит-95». На рисунке 2 приведен общий вид модели арматуры, первая частота и форма ее колебаний. Направление осей глобальной системы координат установлено таким: ось X – горизонтальная, нормальна к оси трубопровода, ось Y – вертикальная, ось Z – горизонтальная, соосна оси трубопровода. Проведение модального анализа проводилось в условиях моделирования жесткого закрепления по фланцам арматуры. Условный диаметр арматуры – 700 мм, длина – 1000 мм, толщина корпуса – 50 мм, привод моделируется алюминиевой пластиной толщиной 250 мм. Сечение условного бугеля подобрано так, чтобы первая собственная частота находилась в области, экспериментально наблюдаемой для подобных изделий. Рисунок 3 иллюстрирует «сборку» арматуры с условным участком трубопровода толщиной 20 мм, с длинами плеч – 3000 мм, а также результат ее модального анализа. Интересен факт различия собственных частот моделей арматуры и арматуры с трубопроводом: 64 и 47 Гц

соответственно. Само по себе различие не вызывает никаких сомнений и является ожидаемым. Предполагается, что изменение частот должным образом учтено в соответствующих нормативах.

Основная идея моделирования заключалась в анализе результатов влияния связи приводной части со строительными конструкциями и с фланцевой частью арматуры. В качестве воздействия принималась синусоидальная вибрация частотой 30 Гц. Кинематически вибрационное возмущение создавалось на свободных окончаниях трубопроводов, а амплитудное значение подбиралось так, чтобы ускорение центра масс арматуры без дополнительных связей составляло 3 g.

Моделирование закрепления приводной части к строительным конструкциям осуществлялось наложением кинематического

ограничения типа «шарнирное закрепление» на один из узлов фланца привода. Запрещение линейных перемещений узла фланца привода считаю оправданным, так как колебания строительных конструкций могут быть как в фазе, так и в противофазе колебаний трубопровода с арматурой. В этом смысле запрещение линейных перемещений – один из возможных случаев взаимодействия арматуры

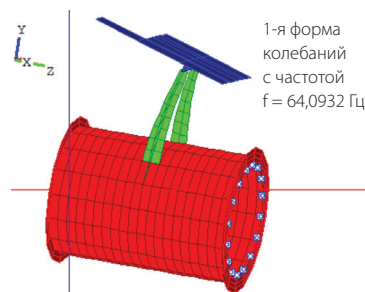


Рисунок 2 – Общий вид модели арматуры, деформированной по 1-й форме колебаний

со строительными конструкциями. Раскрепление приводной части арматуры к фланцу осуществлялось четырьмя укосинами, установленными между фланцами арматуры и фланцем привода, выполненными из квадратной трубы сечением 63x3 мм. На рисунке 4 приведена расчетная модель такого случая раскрепления.

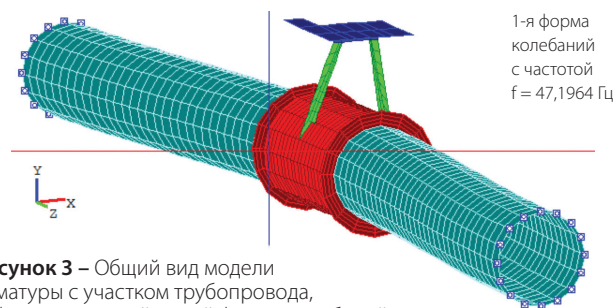


Рисунок 3 – Общий вид модели арматуры с участком трубопровода, деформированной по 1-й форме колебаний

В качестве критерия оценки влияния условий закрепления привода арматуры рассматривались эквивалентные напряжения, действующие в месте сопряжения бугельной части с корпусом арматуры. Следует отметить, что абсолютные значения напряжений не являются важными в данном случае; сама модель имеет условный характер, и значимым является взаимное отношение напряжений в одной и той же области в зависимости от прочих условий. На рисунке 5 приведено распределение интенсивности напряжений по бугелю для случая сейсмического воздействия вдоль оси трубопровода (ось Z) при раскреплении привода

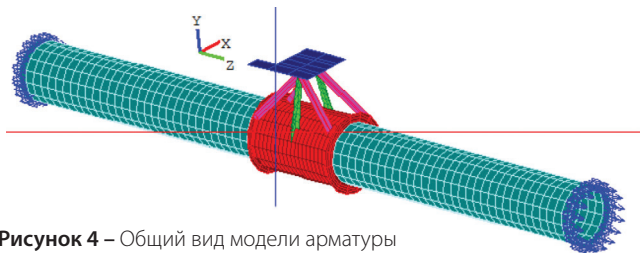


Рисунок 4 – Общий вид модели арматуры с дополнительным раскреплением привода

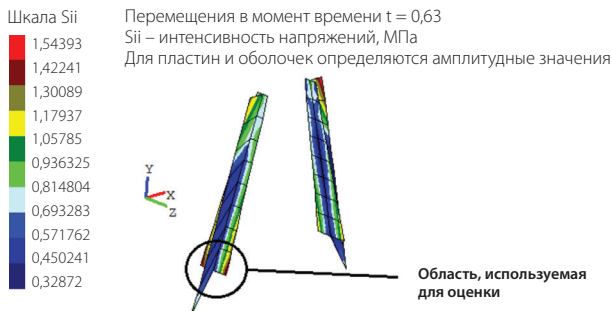


Рисунок 5 – Распределение интенсивности напряжений по бугеле

к фланцевой части. Значение времени, используемое для определения напряжений, во всех случаях соответствует максимуму стационарного режима колебаний. Шаг счета по времени – 1 мс, какое-либо демпфирование в расчете не учитывалось.

Соответствующее рисунку 5 напряжение имеет значение 1,5 МПа. Результаты моделирования сведены в таблицу 2.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что во всех расчетных случаях закрепление фланца привода за строительные конструкции практически полностью исключает колебательный процесс привода, но при этом весьма существенно по отношению к варианту без закрепления и вызывает увеличение напряжений в бугеле (до 4 раз!). При использовании в качестве раскрепляющих конструкций укосин ожидаемо снижается напряжение в бугеле по отношению ко всем прочим расчетным случаям, а ускорение

Таблица 2

Направление воздействия	Тип закрепления	Ускорение центра масс арматуры, m/c^2	Ускорение центра масс привода, m/c^2	Напряжение в бугеле, МПа
X	-	30	34	2,5
СК	12	0	7,0	
Ф	30	34	2,4	
Z	-	29	37	9,7
СК	28	1	42,1	
Ф	29	30	1,5	

Примечание: -- без закрепления, СК – к строительным конструкциям, Ф – к фланцам

привода либо остается неизменным по отношению к варианту без закрепления, либо снижается в зависимости от направления воздействия и, соответственно, формы колебаний системы «участок трубопровода – арматура».

В качестве заключения можно отметить, что обеспечение безопасности объектов, содержащих опасные вещества, в условиях возможной сейсмической активности должно осуществляться не только пересмотром и актуализацией интенсивности потенциальной сейсмической активности (часто в сторону увеличения), но и использованием конструктивных решений, предназначенных для оптимизации работы ответственного оборудования в условиях внешнего динамического воздействия.

Ленинградская область, февраль 2022 года

Список литературы:

- ГОСТ IEC 60068-2-57-2016 Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на вибрацию в форме акселерограммы и импульсов биений.
- ГОСТ 30546.1-98 Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости.
- МУ 1.2.3.07.0057-2018 Состав и объем испытательной специальной трубопроводной арматуры и приводов для атомных станций. Методические указания.
- МУ 1.1.4.01.1422-2019 Проведение испытаний на вибростойкость и вибропрочность трубопроводной арматуры для атомных станций. Методические указания.



ЦКСИ

ЦЕНТР
КОМПЛЕКСНО-СЕЙСМИЧЕСКИХ
ИСПЫТАНИЙ



РОСАТОМ



ИНТЕРГАЗСЕРТ
система добровольной сертификации

АККРЕДИТОВАННЫЙ
ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ
ЦЕНТР

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ
ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ
ВИБРОПРОЧНОСТЬ
МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ
СЕРТИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ
ВИБРОКОНТРОЛЬ



Технологическое
оборудование



Дистанционно
управляемая арматура



Электрические
двигатели



Кабельная
продукция



Насосы
АЭС



Линии
электропередачи



Строительные
конструкции



Электротехнические
изделия



Кабельные
эстакады

