

# ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ ДЕМПФЕРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ФИЛЬТРОВ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1000

**В. В. КИРИЧОК, А. А. ПЕРЕПИЧАЙ, В. М. ТОРОП**

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: torop@paton.kiev.ua

Рассмотрены методы расчета сейсмостойкости оборудования АЭС и методы уменьшения сейсмических нагрузок от примыкающих трубопроводов. Обсуждены особенности применения высоковязких демпферов и других сейсмических ограничителей для трубопроводов АЭС с целью уменьшения нагрузок на патрубки оборудования при сейсмических воздействиях. Библиогр. 2, рис. 3.

*Ключевые слова:* сейсмостойкость, расчеты на прочность, высоковязкий демпфер, трубопроводы, оборудование АЭС

В рамках работы по продлению ресурса трубопроводов и оборудования АЭС проведена оценка сейсмостойкости высокотемпературного фильтра. Высокотемпературные фильтры входят в состав оборудования первого контура АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и предназначены для непрерывной очистки теплоносителя от радиоактивных продуктов коррозии материалов контура.

Согласно [1], трубопроводы и оборудование АЭС рассчитываются при сочетании нагрузок «нормальные условия эксплуатации + максимальное расчетное землетрясение» (НУЭ+МРЗ). В отдельных случаях, кроме этих режимов, следует учитывать нагрузки от сейсмического смещения опор. Однако по причине особенностей расположения высокотемпературного фильтра и примыкающих к нему трубопроводов в зданиях АЭС, нагрузки от сейсмического смещения опор незначительны и при оценке сейсмостойкости ими можно пренебречь.

Расчет сейсмостойкости высокотемпературного фильтра по общепринятым методикам включает расчет примыкающих трубопроводов с целью получения нагрузок на патрубки при рабочих нагрузках и сейсмическому воздействию, расчет при рабочих и сейсмических нагрузках собственно самого сосуда давления. При расчете нагрузок от примыкающих трубопроводов оборудование, к которому они подходят, принято считать жесткой заделкой. Для расчета трубопроводов существуют специальные программные комплексы, с помощью которых можно получить нагрузки на опорах и информацию о трубопроводе под воздействием приложенных нагрузок. Расчет для примыкающих трубопроводов температурного фильтра проводился с использованием программного комплекса dPire линейно-спектральным методом. При

этом учитывалась податливость патрубков фильтра. Соответствующие жесткости были учтены при расчете усилий от трубопровода на патрубки. Расчет самого сосуда давления проводился в программном комплексе Abaqus линейно-спектральным методом. При расчете консервативно использовались спектры ответа энергоблока при максимальном пиковом ускорении на грунте, равном 0,17g. Прикладывались спектры ответа в двух горизонтальных и вертикальном направлениях. Суммирование происходило по процедуре SRSS (квадратный корень из суммы квадратов всех возбуждений). Демпфирование принималось 5%. Условия эксплуатации высокотемпературного фильтра: давление 18 МПа; температура 350 °С; среда – вода 1-го контура; материал – X18H10T.

Сейсмический расчет высокотемпературного фильтра без учета нагрузок на патрубки показал, что максимальные напряжения составляют порядка 13 МПа и при этом концентрируются в опоре фильтра. В режиме нормальных условий эксплуатации условия статической прочности фильтра с учетом нагрузок на патрубки выполняются и при этом максимальные напряжения достигают 149 МПа при допускаемых 153 МПа. При сейсмическом расчете фильтра на максимальное расчетное землетрясение с учетом нагрузок на патрубки (+НУЭ) было определено, что максимальные напряжения составили 318 МПа при допускаемых 212 МПа (рис. 1). При этом концентрация напряжений с превышением допуска наблюдалась на нижней трубке фильтра.

Для возможности дальнейшей безопасной эксплуатации фильтра необходимо провести компенсирующие мероприятия с тем, чтобы эквивалентные напряжения не превышали допускаемые. К таким мероприятиям относят изменение геометрии

три трубопроводов и сосуда или изменение опорно-подвесной системы. На практике, как правило, изменяют опорно-подвесную систему. Процесс расстановки дополнительных опор является сложной комплексной задачей. При этом нужно помнить, что установка дополнительной опоры приводит к перераспределению нагрузок на остальных опорах и подвесках, изменяются собственные частоты трубопровода. Существует также проблема натяжения пружинных подвесок после изменения нагрузок на них. При увеличении жесткости трубопроводной системы может ухудшиться картина по циклической прочности и условиям работы при НУЭ, и при рекомендациях по улучшению сейсмостойкости на такие моменты нужно обращать особое внимание. Также бывают случаи, когда установка дополнительных опор приводит к усилению вибрации трубопровода, что негативно сказывается на трубопроводе и обслуживающем персонале.

При рекомендации по установке дополнительных опор следует также принимать во внимание возможность установки такой опоры в том месте, в котором рекомендует эксплуатирующая и проектная организация.

Была попытка решения задачи путем установки дополнительных опор-ограничителей, которые вступают в действие при землетрясении. Для этого рассчитывались перемещения на участках трубопроводов при НУЭ. Сейсмические ограничители при этом играют роль опоры, у которой зазор с трубопроводом больше перемещений, возникающих при НУЭ.

Для данного трубопровода было определено, что в двух направлениях перемещения при НУЭ больше, чем перемещения, вызванные ответными ускорениями при землетрясении. Поэтому ограничители с зазором в этом случае не являются эффективным решением указанной выше проблемы.

При расчете трубопровода с дополнительными скользящими и направляющими опорами были получены значительно меньшие сейсмические нагрузки на патрубки фильтра, однако эквивалентные напряжения все же превышали допустимые при сочетании нагрузок НУЭ+МРЗ, поскольку если мы используем дополнительные скользящие и направляющие опоры на рассматриваемом трубопроводе, то они значительным образом влияют на работу этого трубопровода при НУЭ. Такой подход хоть и позволяет снизить моменты сил на патрубок фильтра, однако значительным образом повышает напряжения из-за больших температурных усилий. В итоге для данной ситуации не удалось достичь желаемого результата, используя механические ограничители.

Таким образом, в подобных случаях целесообразно устанавливать динамические амортизаторы или высоковязкие демпферы и использовать для расчета сейсмических напряжений метод динамического анализа, который более сложный в моделировании, однако при наличии зазоров и нелинейностей в системе дает более точные результаты. Такие устройства мало влияют на трубопровод при НУЭ и циклических нагрузках, однако позволяют повысить жесткость трубопроводной системы при сейсмических возмущениях.

Существенным недостатком динамических амортизаторов является то, что их следует устанавливать во всех направлениях возникновения усилий от сейсмических возмущений. Кроме того, для крепления каждого амортизатора необходимо устанавливать опорную конструкцию. К недостаткам такого антисейсмического устройства относятся также возможные утечки масла и необходимость в частом и дорогостоящем техническом обслуживании.

Принимая во внимание перечисленные выше особенности, наиболее подходящим компенсирующим мероприятием, на наш взгляд, является установка высоковязких демпферов на проблемных участках трубопроводов. Конструкция высоковязкого демпфера представляет собой корпус, наполненный вязкой жидкостью и погруженный в эту жидкость поршень, который жестко связан с трубопроводом (рис. 2). Демпфер закрепляют неподвижно за основание только в вертикальном положении, чтобы предотвратить вытекание высоковязкой жидкости. При сейсмическом возмущении высоковязкая жидкость мешает поршню совершать резкие линейные перемещения, работая при этом как неподвижная трехкомпонентная опора

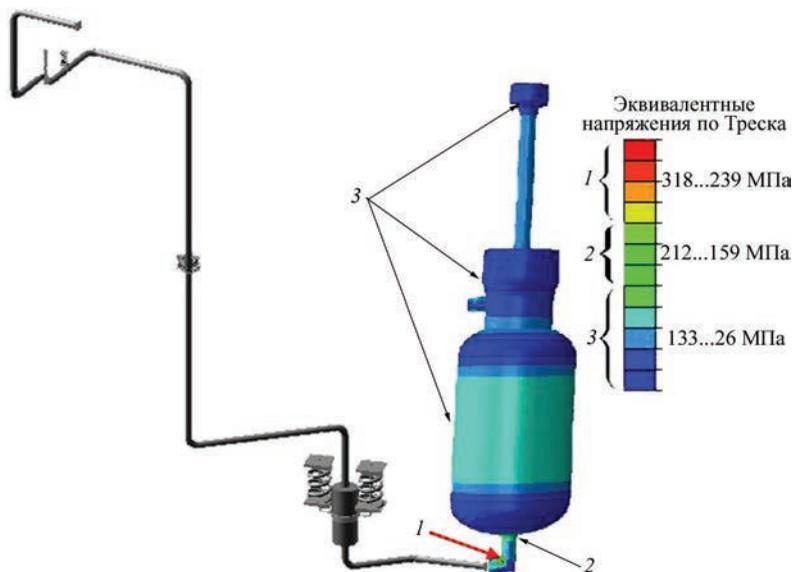


Рис. 1. Эквивалентные напряжения в фильтре при НУЭ+МРЗ для указанной конфигурации примыкающего трубопровода

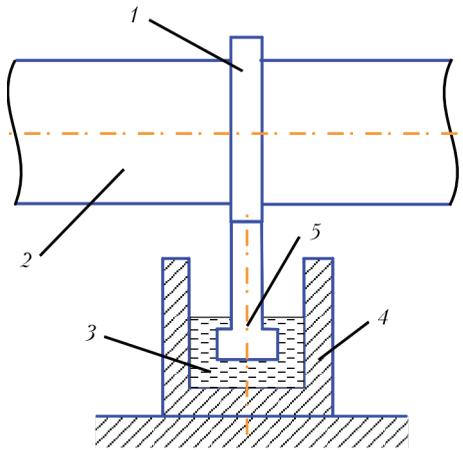


Рис. 2. Схематическое представление высоковязкого демпфера: 1 – крепежный хомут; 2 – трубопровод; 3 – высоковязкая жидкость; 4 – корпус; 5 – корпус

с определенной жесткостью. При плавном нагружении демпфер не влияет на работу трубопровода. Также он способствует уменьшению вибраций. Таким образом, правильно подобранный и установленный демпфер не наносит вред трубопроводу и после его установки расчеты для всех режимов эксплуатации, кроме вибропрочности и сейсмостойкости, остаются неизменными.

Международный опыт использования высоковязких демпферов [2] показывает, что это самый простой и эффективный способ по борьбе с вибрациями и сейсмическими нагрузками. Несмотря на то, что в украинской атомной энергетике отсутствуют нормы по применению высоковязких демпферов, в отдельных случаях они были установлены на АЭС и теперь успешно выполняют свое назначение.

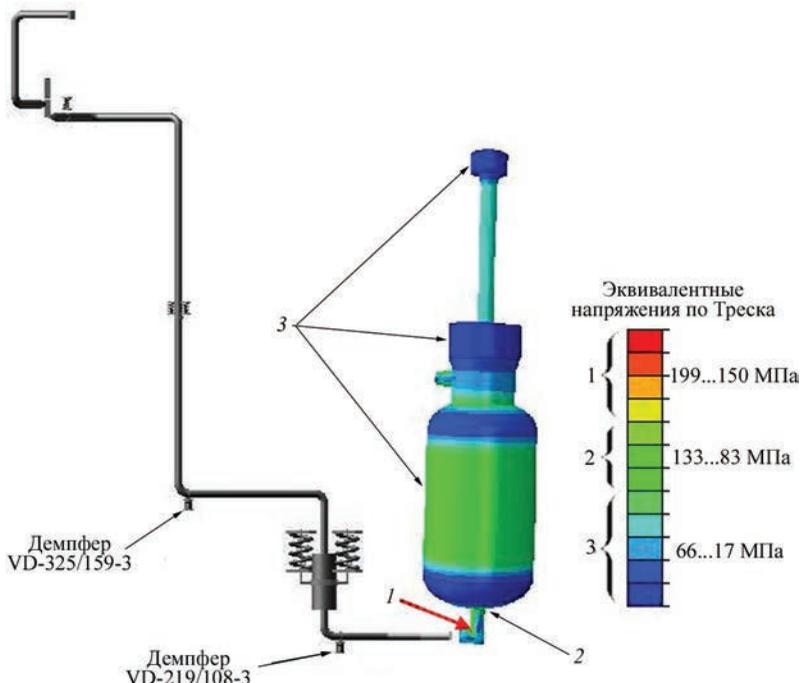


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в фильтре при НУЭ+МРЗ для указанной конфигурации примыкающего трубопровода с установленными демпферами

Подбирая демпфер, нужно учитывать допускаемые нагрузки на антисейсмическое устройство и допускаемые перемещения поршня в корпусе. При этом на допускаемые перемещения демпфера нужно обращать особое внимание, так как их превышение от температурных нагрузок во время работы трубопровода может привести к разрушению трубопровода или опоры демпфера. При расчете трубопроводов с демпферами в основном используется упругая модель, вязкая и максфелловская.

Максфелловская модель является наиболее точной и сложной в расчетах, однако возможность использования консервативного подхода в атомной энергетике позволяет использовать наиболее простую упругую модель. При этом идеально вязкая модель не является консервативной по сравнению с максфелловской. При использовании в расчете упругой модели расчетчик, исходя из модального анализа трубопровода и спектров отбита, сам задает характерную частоту демпфера, которая характеризует жесткость антисейсмического ограничителя.

Частотные характеристики демпферов, которые используются в атомной энергетике, представляют собой зависимость динамической жесткости демпфера от частоты возбуждения. При этом жесткость демпфера возрастает с увеличением частоты колебаний до некоторого значения, после которого она начинает падать. Как правило, при частоте выше 40 Гц демпфер становится менее эффективным. Однако этого диапазона достаточно для повышения сейсмостойкости трубопроводов и оборудования АЭС.

Расчет трубопровода с использованием демпферов выполнен в dPipe в упругой постановке. На модели трубопровода были установлены два демпфера типа VD, с помощью которых удалось в несколько раз снизить сейсмические нагрузки и получить напряжения на патрубке ниже допускаемых при сочетании нагрузок НУЭ+МРЗ. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

### Выводы

Подтверждена необходимость учета внештатных режимов эксплуатации оборудования и трубопроводов при проведении компенсирующих мероприятий, направленных на повышение сейсмостойкости АЭС.

Внедрена практика использования высоковязких демпферов серии VD для уменьшения сейсмических напряжений высокотемпературного филь-

тра, для которого не выполняются условия сейсмостойкости, согласно [1].

1. ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

Methods of calculation of NPP equipment seismic resistance and methods to reduce seismic loads from abutting piping are considered. Features of application of high-viscosity dampers and other seismic limiters for NPP piping are discussed, in order to reduce the loads on equipment fittings at seismic impact. 2 References, 3 Figures.

*Keywords: seismic resistance, strength analysis, highly-viscous damper, piping, NPP equipment*

Поступила в редакцию  
26.09.2016

## ОБОСНОВАНИЕ СВЕРХПРОЕКТНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

На многих промышленных предприятиях техническое оборудование исчерпало свой проектный ресурс. В связи с этим актуальной проблемой является обоснование сверхпроектной надежной эксплуатации оборудования повышенной опасности, к которому относятся сосуды, работающие под давлением, а также трубопроводы, резервуары, баллоны, колонны и реакторы химических и нефтехимических производств, ТЭС, АЭС и т.п. Для обоснованного назначения сверхпроектного срока эксплуатации в отделе «Новые конструктивные формы сварных соединений и конструкций» Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разрабатываются информационно-аналитические системы управления старением указанного оборудования, которые в режиме мониторинга позволяют оценивать их фактическое техническое состояние и прогнозировать остаточный ресурс. Используя современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля, программно-методические комплексы (в том числе и коммерческие продукты ACPA-AЭС, dPIPE, ABAQUS, ANSYS, SYSWELD и др.), экспериментальное оборудование сертифицированной лаборатории, позволяющее испытывать не только образцы но и натурные крупногабаритные изделия, накопленный многолетний опыт научных исследований и созданные базы данных, отдел способен решать сложные научно-технические проблемы, возникающие на промышленных предприятиях Украины.

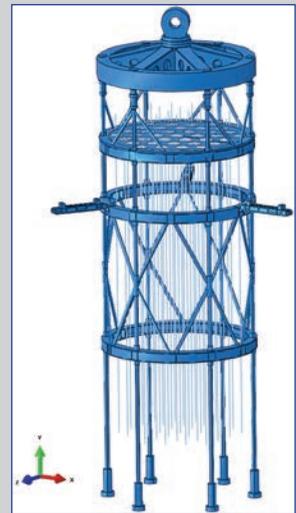


Сертифицированная лаборатория для испытаний внутренним гидравлическим давлением изделий длиной до 10000 мм и диаметром до 1400 мм в поперечном сечении с возможностью разрушения:

- статическим давлением до 100 МПа с расходом 60 л/час;
- циклическим давлением до 60 МПа с расходом 800 л/час.

Расчетное обоснование дополнительного раскрепления металлоконструкций верхних блоков энергоблоков №1, 2 ОП РАЭС от внешних динамических воздействий;

МКЭ-модель в ПК ABAQUS.



03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11  
Тел.: (044) 2006457, моб.: (067) 4490562,  
E-mail: v.torop@gmail.com,