

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОВЯЗКОГО ДЕМПФЕРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ

В. Н. Алексеев, А.М. Берковский, П.С. Васильев, В.В. Костарев, Д. Ю. Павлов, А.Ю. Щукин  
ООО «ЦКТИ-Вибросейсм», ул. Атаманская, 3 С.-Петербург, 193167, Россия, E-mail: [cvs@cvs.spb.su](mailto:cvs@cvs.spb.su)

## АННОТАЦИЯ

В настоящей статье дано описание конструкции высоковязких демпферов, описаны их характеристики, изложена методика моделирования демпферов при выполнении расчетов на прочность трубопроводов.

Приведены примеры использования высоковязких демпферов для защиты трубопроводов от вибрации, сейсмических и других видов динамических воздействий.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время, в связи с тем, что значительная часть энергетических объектов в СНГ приблизилась к расчетному сроку службы или исчерпала его, большое внимание уделяется повышению надежности и продлению ресурса распределительных систем и оборудования. Очевидно, что увеличение ресурса и повышение динамической надежности технологических трубопроводов позволяет в значительной степени снизить ежегодные потери из-за вынужденных остановов, недовыработки электроэнергии и затрат на проведение внеплановых ремонтных работ.

Опыт эксплуатации технологических трубопроводов показывает, что их колебания могут достигать значительных величин (пиковые значения виброскорости достигают сотен мм/с). Это обстоятельство зачастую может прямо влиять на надежную работу технологических объектов и, более того, быть причиной серьезных аварий и нарушений.

Основными видами отказов трубопроводных систем, к которым может привести их увеличенная вибрация, являются: появление трещин в основном металле и сварных швах, разрушение трубопровода, обрыв подвесок и усталостное разрушение опор, обрыв присоединенных импульсных трубок, ослабление болтовых соединений, ложное срабатывание арматуры, отказ концевых выключателей. Однако, несмотря на важность проблемы и серьезность возможных последствий, на вибрацию трубопроводов обычно обращают внимание только после случившихся аварийных ситуаций или при величинах вибрации, вызывающих опасения обслуживающего персонала за безопасность работы вблизи вибрирующего трубопровода.

Для объектов, расположенных в зонах с высокой сейсмической активностью, помимо проблемы вибрации возникает необходимость обеспечения сейсмостойкости технологических трубопроводов.

В настоящее время действует ряд документов, предъявляющих требования по обеспечению стойкости трубопроводов к динамическим воздействиям, таким как вибрация, сейсмика и гидроудары:

- ПНАЭ Г-7-002-86, Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок /1/;
- РД 10-249-98, Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды /2/;
- РТМ 38.001-94, Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов /3/;

В зарубежной практике наиболее широкое применение получили нормы /4/, в которых описаны требования по выполнению контроля, уровню вибрации и даны критерии по оценке вибрации (Requirements for Pre-operational and Initial Start-up Vibration Testing of Nuclear Power Plant Piping Systems. ASME OMa S/G-1991 STANDARD Part 3).

## **ЗАЩИТА ТРУБОПРОВОДОВ ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

В энергетической и нефтехимической промышленности широко распространены несколько типов устройств защиты трубопроводов от вибрации: механические и гидравлические амортизаторы, аксиальные высоковязкие демпферы, упруго-пластичные амортизаторы, демпферы трения, ограничители перемещений, магнитно-жидкостные амортизаторы, динамические виброгасители, высоковязкие демпферы фирм GERB и ЦКТИ-Вибросейсм.

Общие требования для демпферных устройств энергетических и промышленных установок заключаются в следующем:

- способность демпфирования любых видов динамического воздействия (вибрация, удары, сейсмика, и т.д.);
- продолжительный срок службы без ремонта и обслуживания;
- устойчивость к тепловому и радиационному воздействию, агрессивным средам;
- взрыво- и пожаробезопасность;
- незначительная сила реакции, действующая на трубопровод при тепловых расширениях;
- отсутствие запаздывания срабатывания при динамической нагрузке;
- возможность регулирования характеристик;
- низкая стоимость изготовления и эксплуатации.

Амортизаторы, аксиальные высоковязкие демпферы, ограничители перемещений и высоковязкие демпферы наиболее широко применяются по сравнению с другими устройствами. Одной из перспективных конструкций для динамической защиты трубопроводов является высоковязкий демпфер, в конструкции которого удалось совместить многие преимущества и удачно избежать некоторых основных недостатков других устройств.

## **КОНСТРУКЦИЯ ВЫСОКОВЯЗКОГО ДЕМПФЕРА**

Конструкция высоковязкого демпфера типа ВД приведена рис. 1. Демпфер состоит из корпуса 1, заполненного рабочей вязкой жидкостью 2, поршня 3 и сердечника 4, погруженных в жидкость. Между корпусом и поршнем установлены тонкостенные цилиндры 5, которые свободно опираются на днище корпуса и не связаны между собой. Сердечник помещен внутри поршня с зазором относительно поршня и свободно опирается на днище корпуса.

Как правило, фланец корпуса крепится к неподвижному основанию, а фланец поршня - к оборудованию, которое необходимо защитить от динамических нагрузок. Возможно крепление корпуса демпфера к оборудованию, а поршня - к неподвижному основанию, либо раскрепление демпфером двух вибрирующих объектов без связи с основанием.

Для крепления демпферов во фланцах поршня и корпуса выполнено по 4 отверстия.

Зазор между поршнем и корпусом закрывается защитным чехлом 6, который закрепляется на корпусе и на поршне хомутами 7.

Демпферы всех типоразмеров одинаковы по конструкции.

Высоковязкая рабочая жидкость нетоксична, огнеупорна, устойчива к радиоактивным веществам, биологически инертна, не способствует коррозии и может использоваться в диапазоне температур от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ . Тонкостенные цилиндры (5) между корпусом и поршнем предназначены для возможности регулирования демпфирующей способности демпфера.

Демпфер не воспринимает статических нагрузок и не препятствует тепловым расширениям. В тоже время демпфер сопротивляется динамическим смещениям, эффективно рассеивая энергию колебаний по 6-ти степеням свободы, в отличие от большинства других аналогичных конструкций. Варианты установки демпферов на трубопроводах приведены на рис.2 и 3.

Конструкция демпфера серии ВД защищена патентом РФ № 1 689 693 на изобретение «Вязкоупругий демпфер», зарегистрированным в ГОСРЕЕСТРЕ 10.01.1994 г.

Разработаны технические условия для ряда типоразмеров и рекомендации по использованию демпферов.

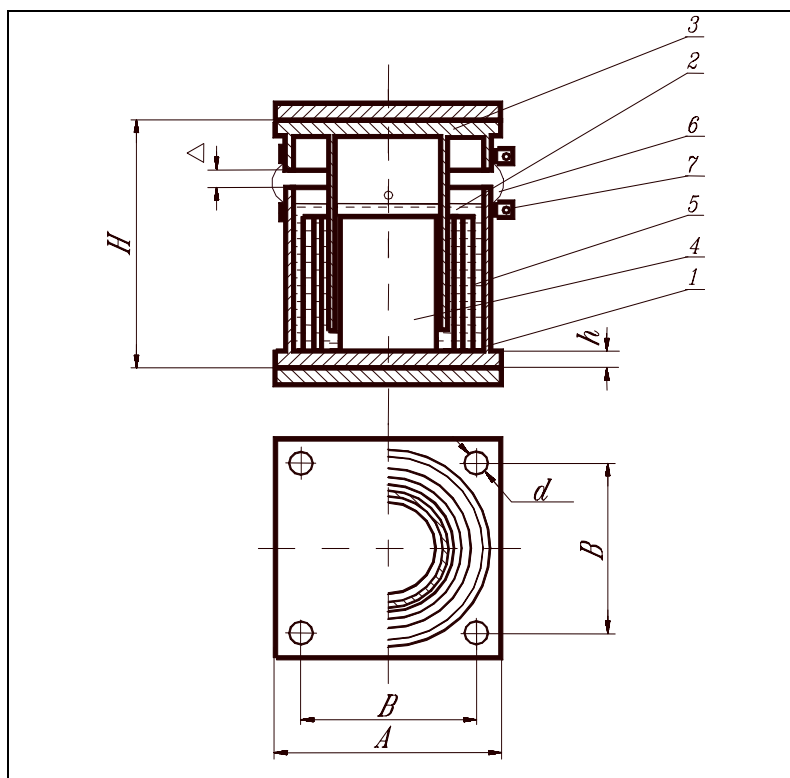


Рис.1. Высоковязкий демпфер типа ВД.  
 1-корпус, 2-вязкая жидкость, 3-поршень, 4-сердечник,  
 5-тонкостенные цилиндры, 6-уплотнение, 7-хомут



Рис. 2. Установка демпфера ВД  
 на вертикальном участке трубопровода



Рис. 3. Установка демпфера ВД  
 на горизонтальном участке трубопровода

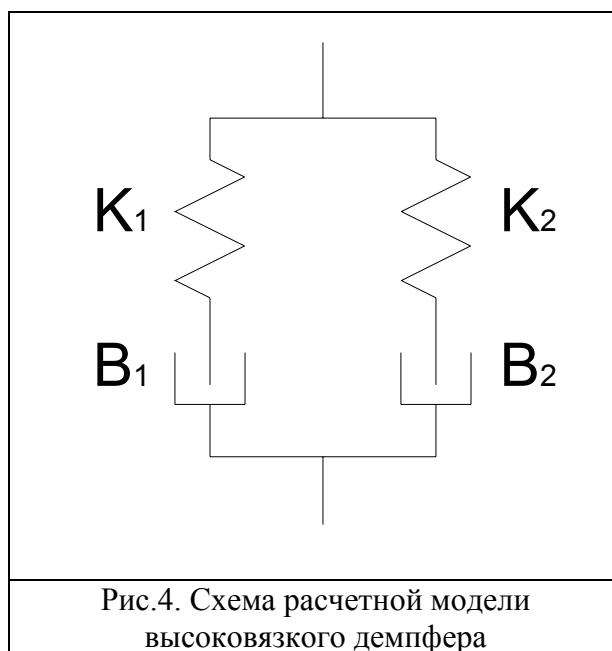
## ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОВЯЗКОГО ДЕМПФЕРА

Для проведения расчетного анализа систем, оснащенных высоковязкими демпферами, была разработана и верифицирована математическая модель демпфера, позволяющая корректно оценивать ответ анализируемой системы на динамические воздействия.

Динамические свойства демпфера определяются как свойствами рабочего тела, так и конфигурацией поршня, корпуса и тонкостенных цилиндров (их количеством). Наиболее простой математической моделью, описывающей вязкоупругое поведение, является модель Максвелла, представляющая собой последовательное соединение идеального упругого элемента и идеального вязкого элемента, которые имеют жесткость  $K$  и вязкость  $B$ , соответственно /5/.

С помощью представленной модели можно задать следующие свойства, характерные для реальных высоковязких демпферов: на низких (стремящихся к нулю) частотах нагружения реакция демпфера становится вязкой и на высоких частотах нагружения реакция демпфера становится преимущественно упругой.

Составляющие жесткости, равно как и производные величины, существенным образом зависят от частоты динамического возбуждения  $\omega$ . Из общих соображений следует, что произвольное вязкоупругое поведение может быть описано набором достаточно большого количества цепей Максвелла. Однако опыт обработки большого количества результатов экспериментов показал, что для обеспечения инженерного уровня точности достаточно использовать комбинацию двух цепей Максвелла. Вид такой модели демпфера приведен на рис. 4.



Таким образом, задача построения расчетной модели демпфера по экспериментальным данным сводится к определению четырех неизвестных параметров модели. На рис. 5 приведен пример аппроксимации экспериментальных данных для демпфера.

Следует отметить, что использование четырех-параметрической Максвелловской модели демпфера дает наиболее достоверные результаты для оценки динамического ответа трубопроводной системы. В работах /5, 6/ было показано, что при использовании упрощенных моделей этого устройства (эквивалентной упругой модели или идеально вязкой модели) возможны ошибки как в консервативную сторону (эквивалентная упругая модель), так и в неконсервативную (идеально вязкая модель).

На рис. 6 показаны характеристики демпфера ВД-630/325-15, которые используются при расчетах на динамические нагрузки трубопроводов.

На базе большого количества экспериментальных данных, полученных ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» и фирмой «GERB», составлен каталог характеристик демпферов типа ВД, ко-

которые используются при обосновании динамической прочности трубопроводов и оборудования.

ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» разработан программный комплекс (ПК) «dPIPE» для расчета трубопроводных систем с учетом действия эксплуатационных и динамических нагрузок. ПК позволяет выполнять расчеты на все виды динамических нагрузок с учетом реальных характеристик демпферов типа ВД /14/.

Основные особенности и возможности программы dPIPE состоят в следующем:

- статический анализ (расчет на распределенную и сосредоточенную весовую нагрузку и внутреннее давление),
- анализ самокомпенсации (тепловые расширения),
- анализ свободных колебаний системы (определение собственных форм и частот колебаний),
- выполнение анализа по линейно-спектральному методу (ЛСМ) с учетом платформенного эффекта или многоопорного воздействия, учет высших форм колебаний и сейсмического смещения опор,
- выполнение расчетов методом динамического анализа (МДА), интегрирование по времени уравнений движения трубопроводных систем (учет непропорционального демпфирования в системе, вносимого вязкими демпферами, учет нелинейной работы трубопроводных опор),
- результирующие таблицы напряжений и внутренних усилий для всех трубопроводных элементов, включая соответствующие коэффициенты запаса, и проверка прочности по Российским нормам ПНАЭ или американскому коду ASME BPVC,
- результирующие таблицы сейсмических перемещений и ускорений,
- результирующие таблицы реакций трубопроводных опор (подвески, патрубки, демпферы и т.д.);
- графический вывод и анимация для контроля исходных данных и анализа результатов расчета на всех его этапах.

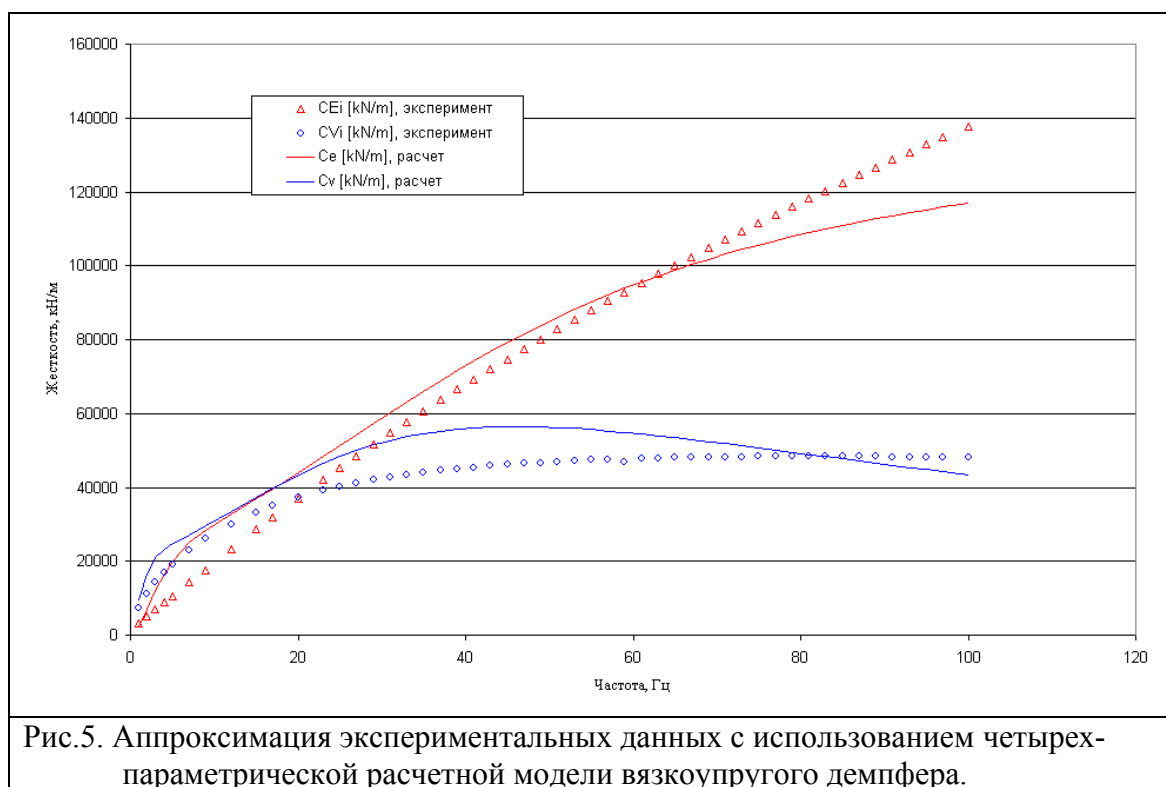
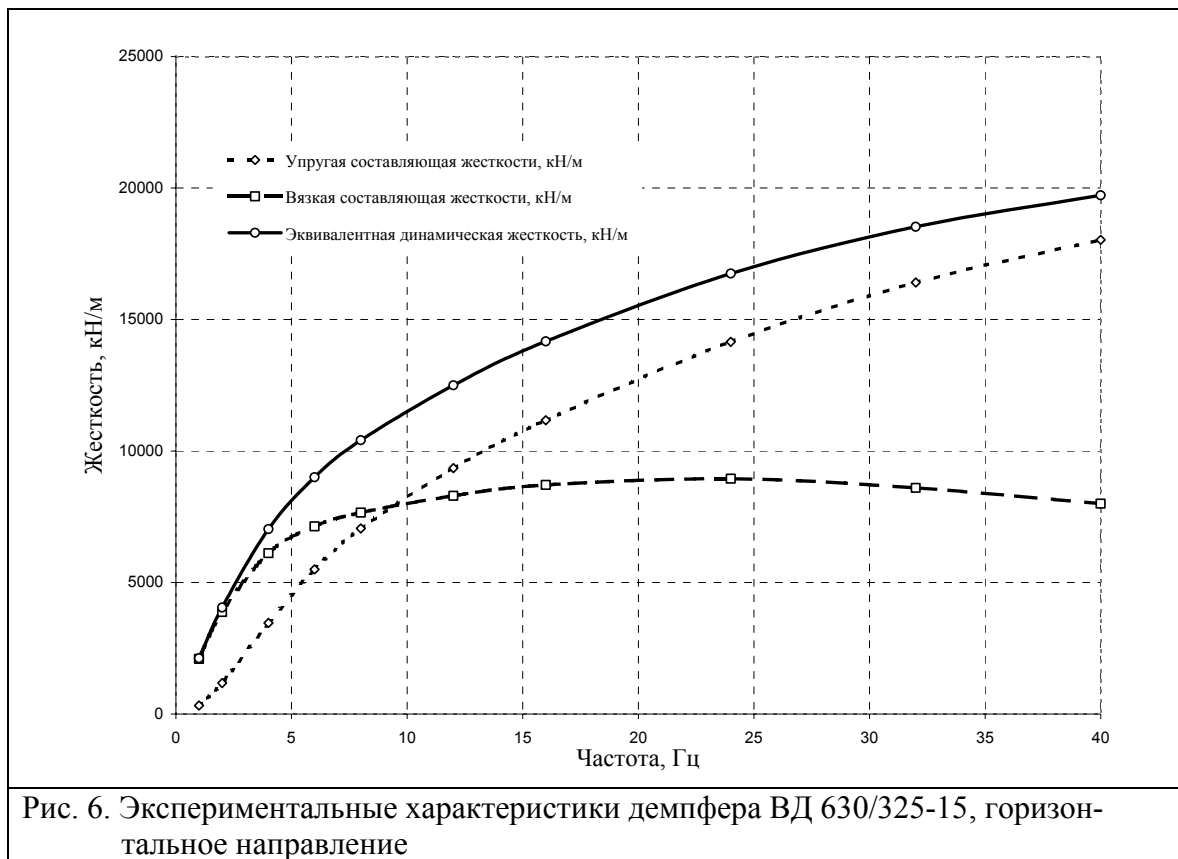


Рис.5. Аппроксимация экспериментальных данных с использованием четырех-параметрической расчетной модели вязкоупругого демпфера.



### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕМПФЕРОВ

На стадии разработки конструкции высоковязкого демпфера были проведены экспериментальные исследования, подтверждающие как эффективность работы этого устройства, так и корректность моделирования его динамических характеристик при расчетном анализе систем и оборудования. Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований демпферов типа ВД, разработанных ООО «ЦКТИ-Вибросейсм».

На рис. 7-10 показаны результаты испытаний демпфера на трехкомпонентной 35 – тонной сейсмоплатформе японской компании Ishikawazima Harima Heavy Industries Co. /7, 8/. Демпфер устанавливался на модельном трубопроводе диаметром 165 мм, длиной 15 метров, смонтированном на сейсмоплатформе. Всего один высоковязкий демпфер, установленный в системе, благодаря своим многокомпонентным характеристикам, позволил исключить практически все резонансные пики на передаточной функции трубопровода (рис. 9).



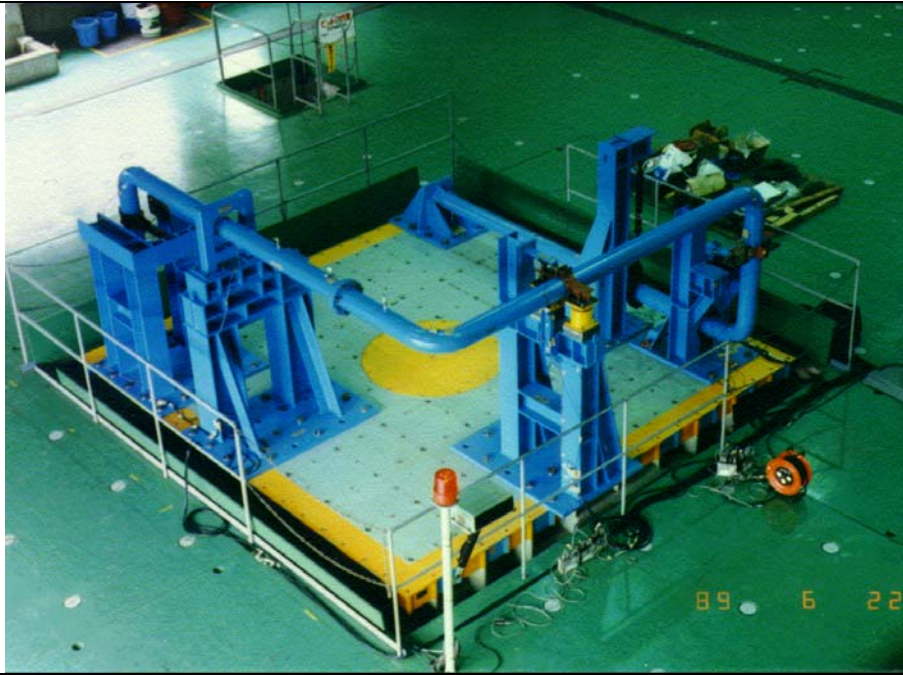


Рис. 7. Модельный трубопровод на столе сеймоплатформы фирмы ИНИ.

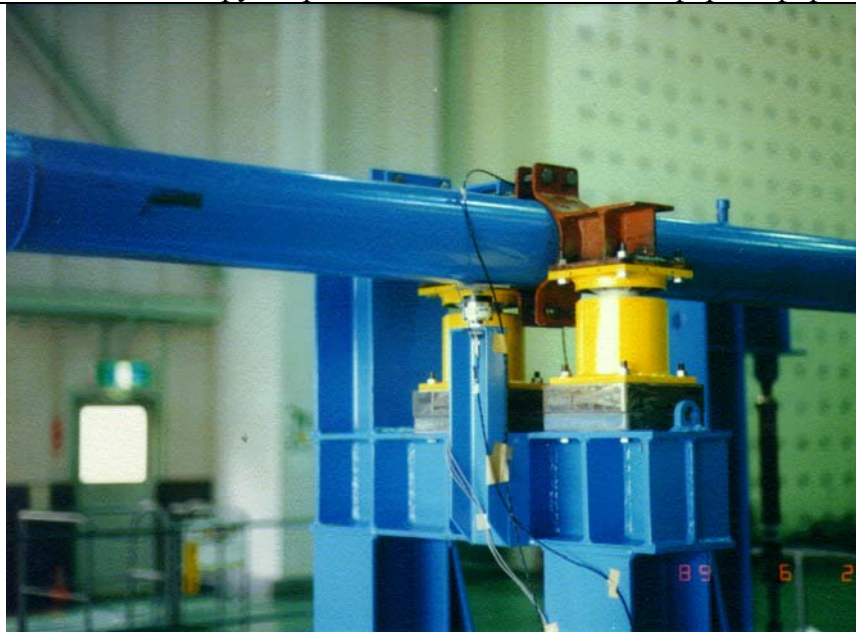
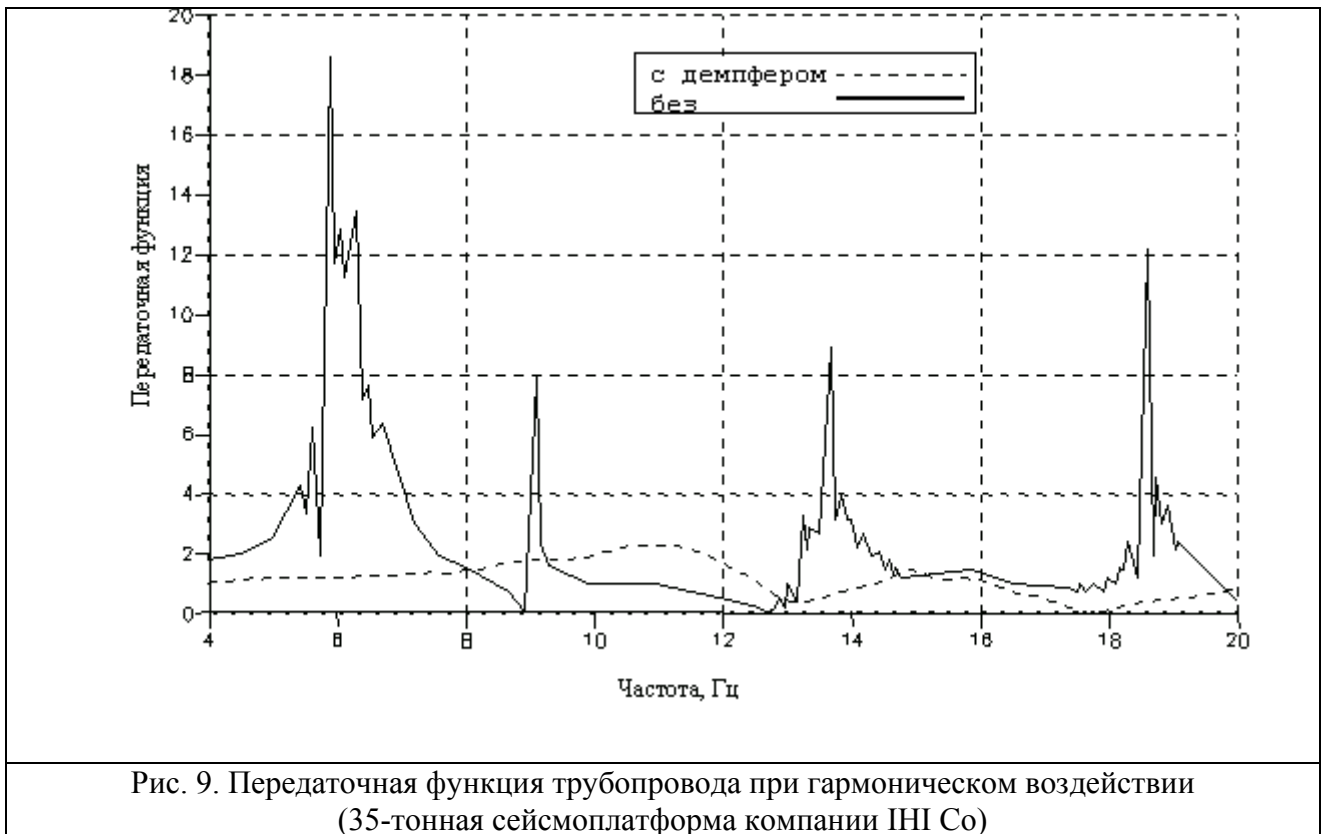
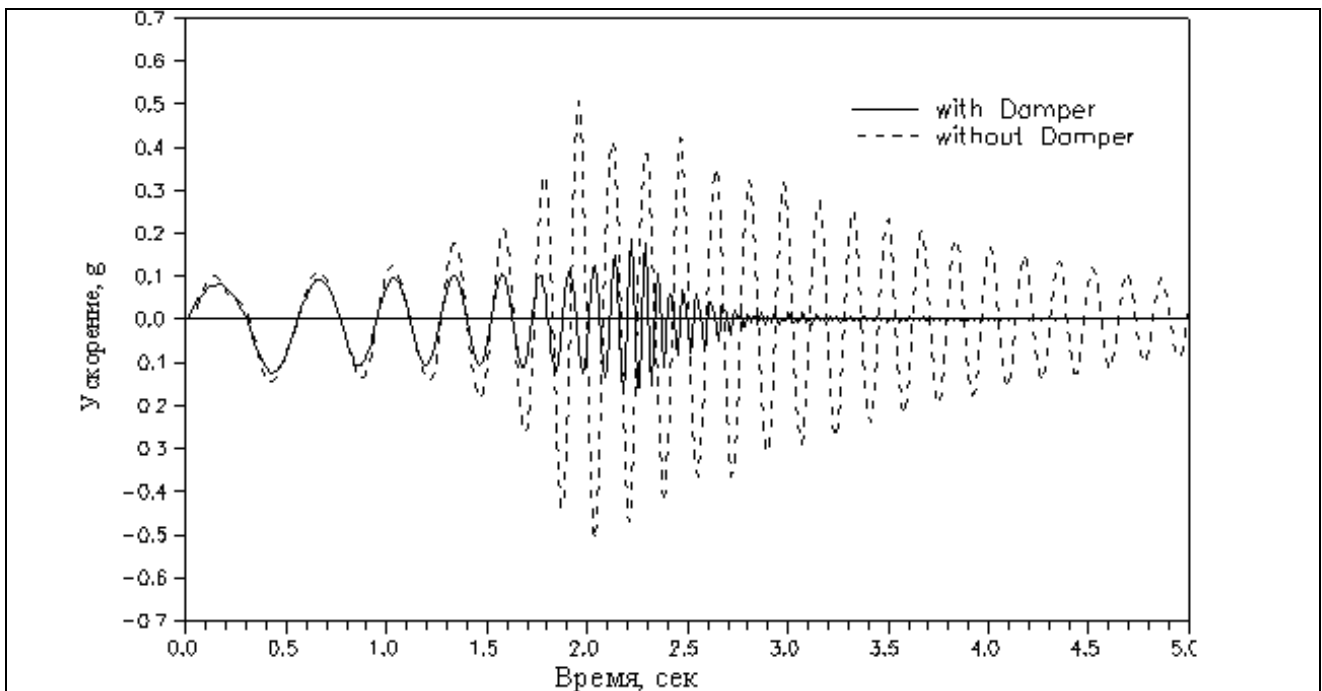


Рис. 8 Демпферы ВД-159/76 на модельном трубопроводе



Испытание той же самой системы трубопровода при сейсмическом возбуждении продемонстрировало значительное снижение ответного ускорения трубопровода и практическое отсутствие резонансных явлений системы (рис. 10).



## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОВЯЗКИХ ДЕМПФЕРОВ



Опыт использования высоковязких демпферов показал, что технология высоковязкого демпфера имеет все преимущества практически по всему перечню вышеупомянутых требований, предъявляемых к амортизирующим устройствам. На атомных и тепловых станциях во всем мире работают нескольких тысяч подобных устройств. Чтобы продемонстрировать положительные возможности высоковязкого демпфера, приведем несколько фактических примеров применения демпфера /9, 10/.

Использование высоковязкого демпфера для динамической защиты системы трубопровода острого пара (560<sup>0</sup>С) 630 мм (Блок мощностью 1200 МВт Костромской ТЭС) уменьшило максимальный уровень рабочей вибрации, вызванной потоком, более чем в 20 раз (рис.11). В данном случае тепловые смещения трубопровода в некоторых точках превышали 200 мм в результате высокой температуры и длины системы (120 метров). В то же время высоковязкий демпфер не препятствовал тепловому расширению трубопровода, так как значенные реакции демпфера во время всего процесса холодного пуска блока не превышала 10 кгс.

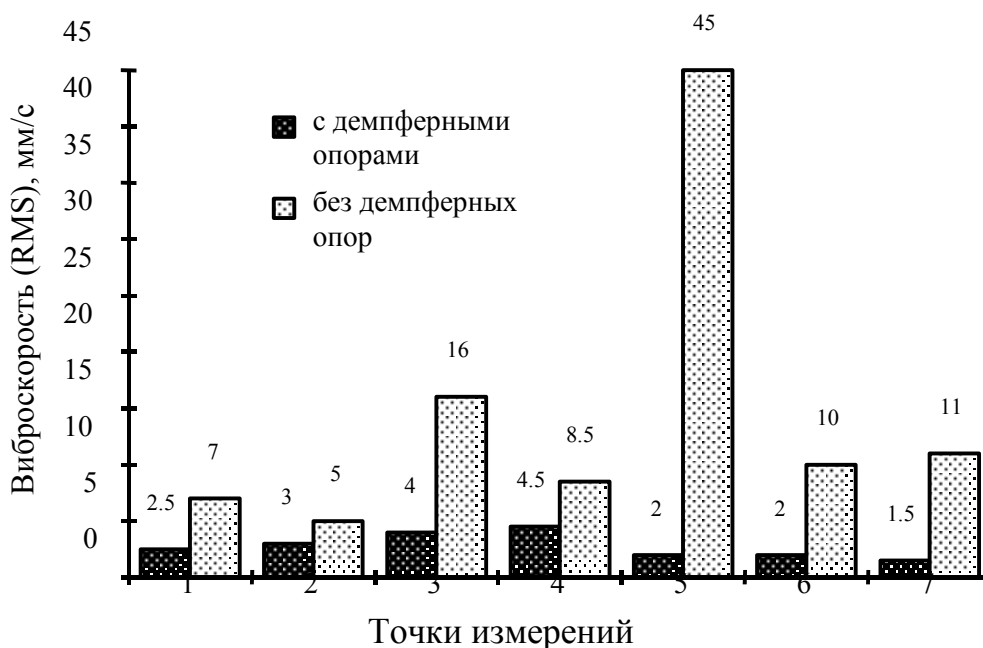


Рис. 11. Влияние установки демпферных опор на вибрацию системы паропроводов Ду 630 мм. Костромская ГРЭС, блок мощностью 1200 МВт.

Ниже дан пример использования демпферов для снижения вибрации паропровода Чернобыльской АЭС /11/. При наборе мощности блока в результате высокой вибрации происходило ложное срабатывание предохранительных клапанов и сброс пара. Были проведены замеры вибрации паропроводов, выполнены динамические расчеты и разработаны рекомендации по расстановке высоковязких демпферов, что позволило снизить уровень вибрации и набрать 100% мощности на блоке. Схема участка паропровода, точки замеров и места установки демпферов показаны на рис.12. На рис.13 приведены параметры вибрации (график спектральной плотности (PSD), пиковые и среднеквадратичные (RMS) значения виброскорости) предохранительного клапана до и после установки демпферов.

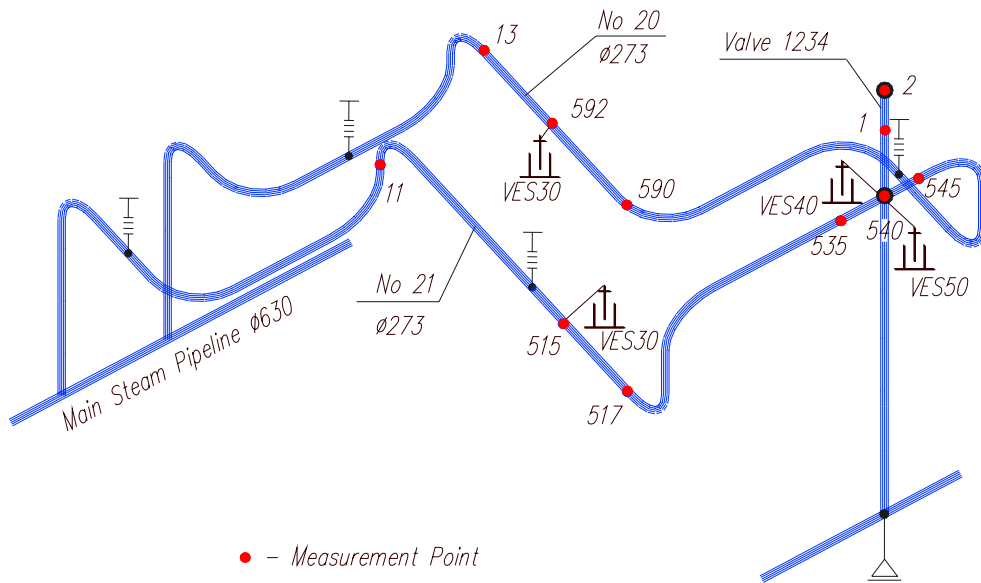


Рис. 12. Точки измерения вибрации и расположение демпферов (ЧАЭС, Блок 3)

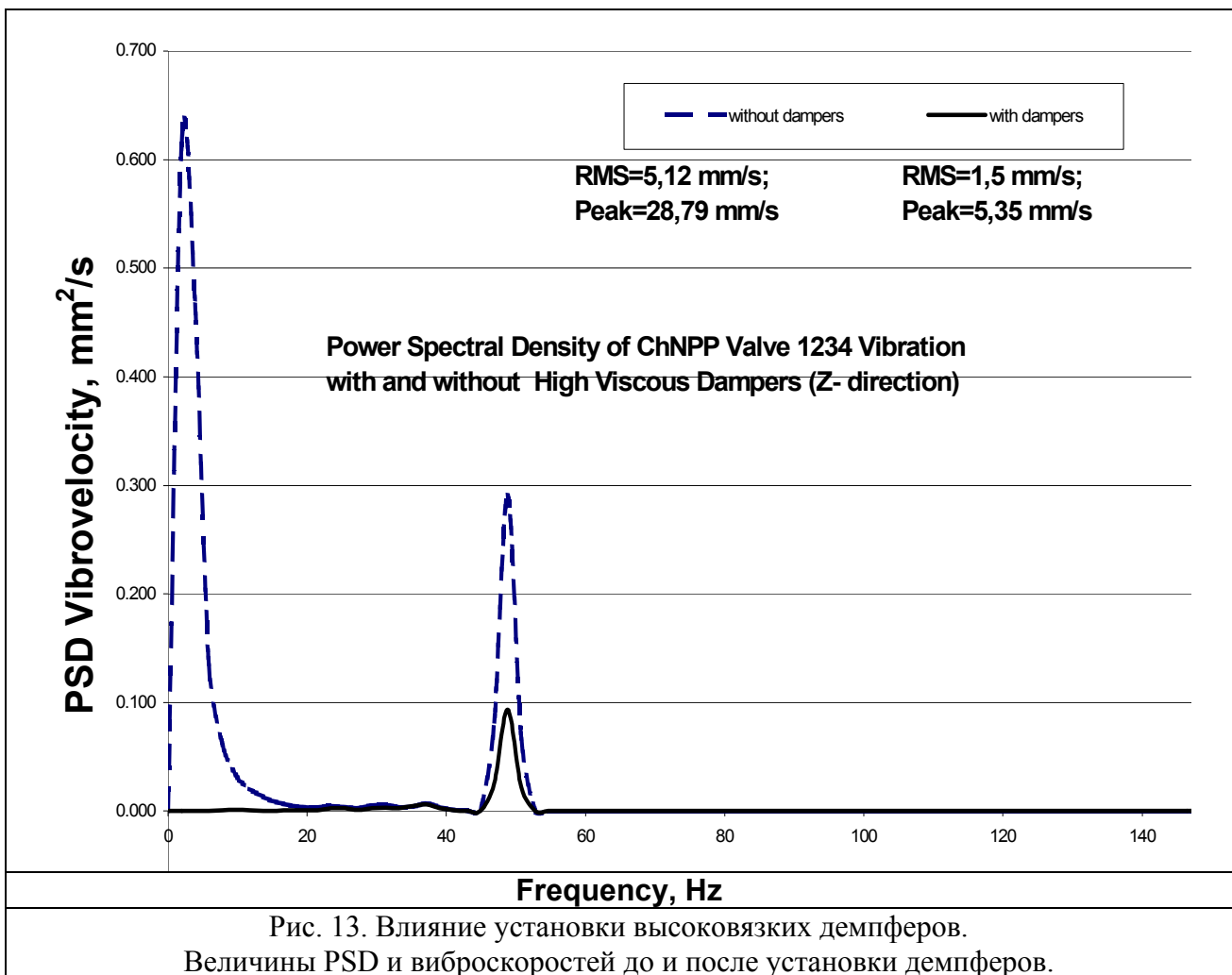
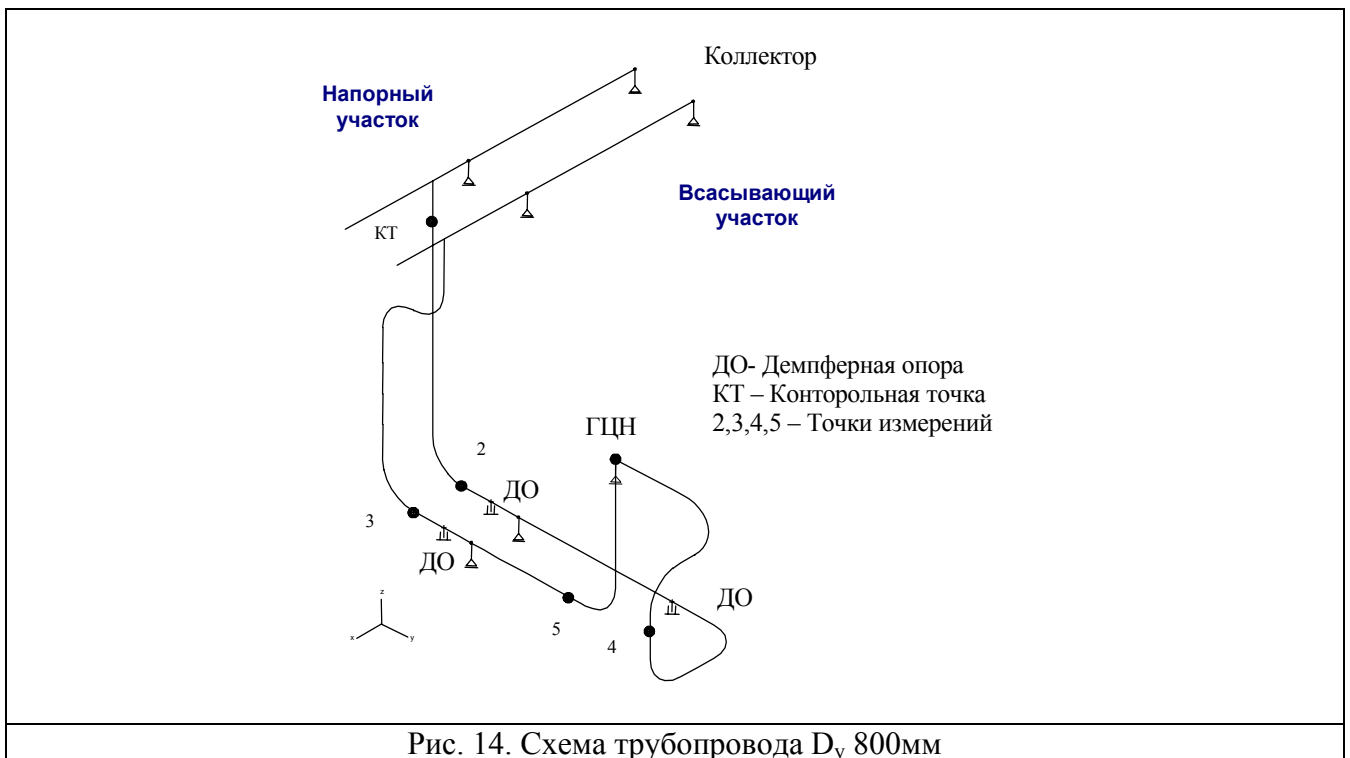


Рис. 13. Влияние установки высоковязких демпферов.  
Величины PSD и виброскоростей до и после установки демпферов.

Использование демпферов для продления межремонтного периода эксплуатации трубопроводов показано на примере трубопровода Ду800 АЭС /12/. На рис. 14 показано размещение высоковязкого демпферов в системе принудительной циркуляции АЭС для снижения эксплуатационной вибрации. В данном случае, применение высоковязких демпферов позволило снизить уровень вибрации в 2 раза, в результате чего был увеличен срок межремонтной эксплуатации трубопровода. На рис. 15 показаны графики зависимости изменения повреждаемости аварийного сварного стыка в зависимости от уровня вибрации трубопровода и срока эксплуатации.



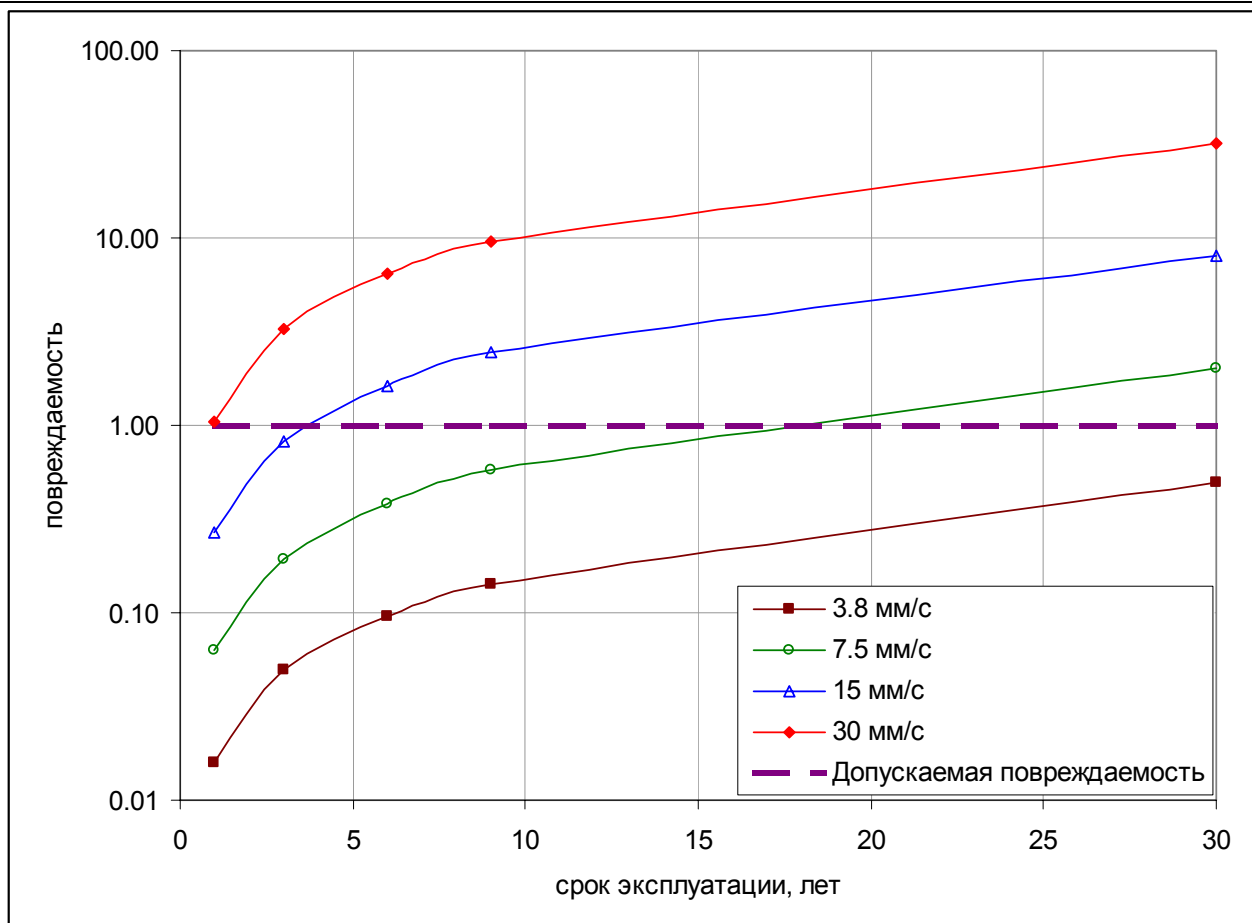


Рис. 15. Зависимость повреждаемости сварного соединения трубопровода  $D_y 800$  мм от срока эксплуатации при различных уровнях виброскорости.

Наиболее широкое применение демпферы серии ВД получили при решении задач обеспечения сейсмостойкости трубопроводных систем. Например, эти демпферы используются на всех АЭС в Восточной Европе /10, 13/.

Применение технологии высоковязких демпферов может быть показано на примере повышения сейсмостойкости трубопроводов АЭС. Конечно-элементная модель паропровода показана на рис. 16. На рис 17 приведен график, на котором показано сравнение уровня напряжений в тройниках при максимальном расчетном землетрясении (МРЗ).

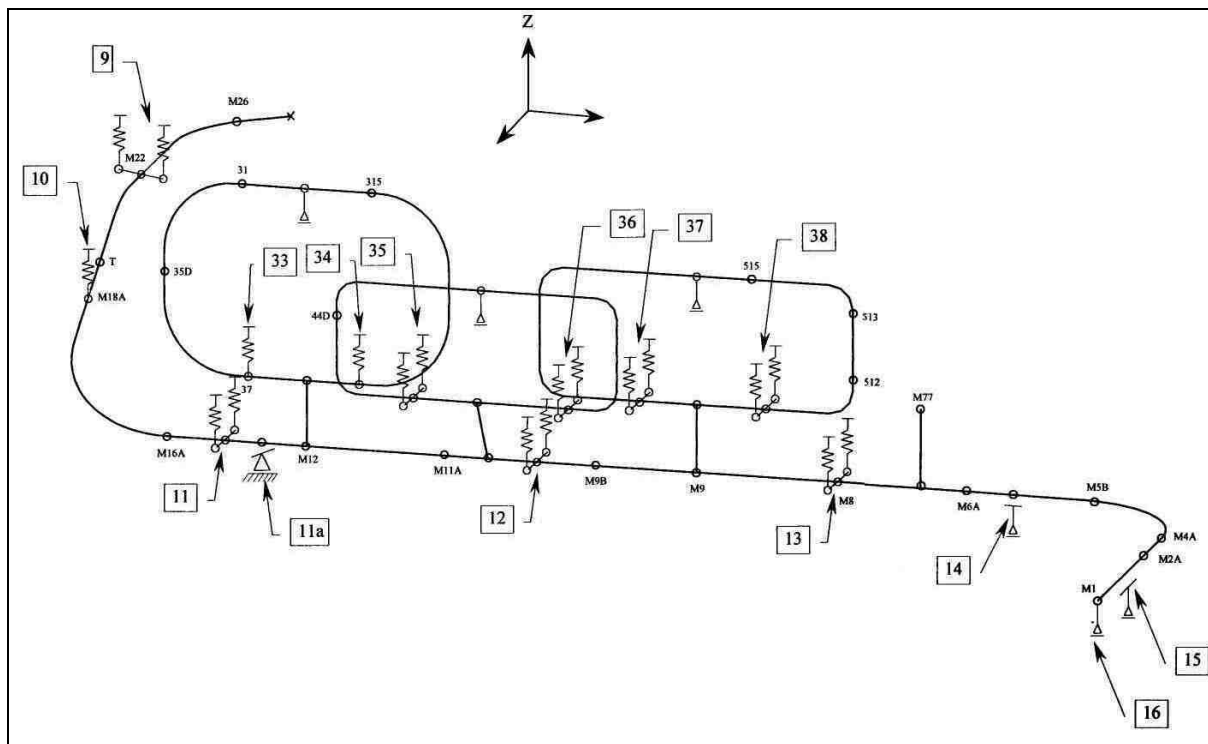


Рис. 16. Расчетная модель паропровода

Напряжения в тройниках паропровода ТХ50201, НУЗ+МРЗ

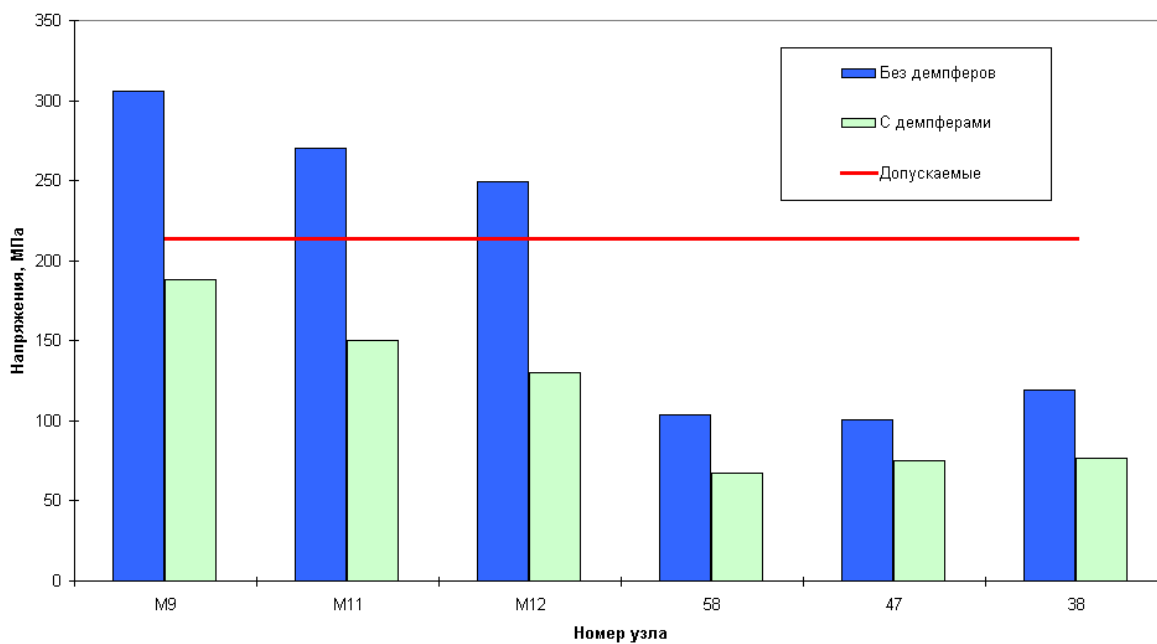


Рис. 17.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Исследования и опыт эксплуатации подтвердили преимущества использования технологии высоковязкого демпфера для защиты систем АЭС и ТЭС от эксплуатационной вибрации, сейсмических и ударных воздействий.
2. Высоковязкие демпферы могут быть рекомендованы для повышения динамической надежности и увеличения срока службы трубопроводов при всех видах динамических нагрузок.
3. При защите трубопроводов и оборудования от динамических нагрузок использование технологии высоковязкого демпфера дает существенные преимущества в обеспечении надежности и безопасности защищаемых трубопроводов, позволяет снизить число устанавливаемых устройств, а также первичную и эксплуатационную стоимость системы защиты.
4. Разработанная математическая модель демпфера и программный комплекс “dPIPE” позволяет выполнять расчеты на все виды динамических нагрузок с учетом реальных характеристик демпферов типа ВД /14/.



## ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, Энергоатомиздат, М., 1989.
2. РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. ГОСГОРТЕХНАДЗОР РОССИИ, М, 1999.
3. РТМ 38.001-94, Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. ВНИПИНефть, 1994.
4. Requirements for Pre-operational and Initial Start-up Vibration Testing of Nuclear Power Plant Piping Systems. ASME OMa S/G-1991 STANDARD Part 3.
5. V. Kostarev, A. Berkovski, et. al.. Application of mathematical model for high viscous damper to dynamic analysis of NPP piping. Proc. of 10th ECEE, 1994, Vienna, Austria.
6. Berkovski, V. Kostarev, et. al.. Seismic Analysis of VVER NPP primary coolant loop with different aseismic devices. Transactions of SMIRT 13, Porto Alegre, Brazil, 1995.
7. Y. Ochi, A. Kashiwazaki, V. Kostarev. Application of HVD on piping system and Isolation Floor System. Proc. of 9th EAEE, Vol. 3, 1990, Moscow, Russia.
8. V.V.Kostarev, D.J.Pavlov. Application of CKTI Damper for Protecting Piping Systems, Equipment and Structures Against Dynamic and Seismic Response. SMIRT 11 Transactions, Vol. K, Tokyo, Japan, 1991, p.p. 505-510.
9. T.Katona, S.Ratkai, K.Delinic, W.Zeitner. Reduction of operational vibration of feed-water piping system of VVER-440/213 at PAKS. Proc. of 10th European Conf. on Earthquake Engineering. p.p. 2847-2852.
10. R. Masopust, G. Hueffmann, J. Podrouzek. GERB Viscous dampers in applications for pipelines and other components in Czechoslovak nuclear power plants. ASME PVP-Vol.237-2, Seismic Engineering, p.p.17-22.
11. Fomin V., Kostarev V., Reinsch K.-H.. Elimination of Chernobil Npp Unit 3 Power Output Limitation Associated with Higt Main Steam Piping Flow Induced Vibration. Transactions of the 16th SMIRT, Washington DC, August 2001
12. Костарев В.В. и др. Повышение динамической надежности и продление службы трубопроводов при использовании технологии высоковязкого демпфера, «Тяжелое машиностроение» №8, август 2000.
13. Berkovski, et. al. Seismic analysis of the safety related piping and PCLS of the WWER-440 NPP. Transactions of the 14th SMIRT, Lyon, France, August 1997.
14. Малов М.Ю., Берковский А.М. и др., Верификация программных комплексов для анализа прочности и сейсмостойкости технологических трубопроводов АЭС, Труды ЦКТИ, 2002, вып.282, с.236-240.