

Определение динамических характеристик вязкоупругого демпфера с использованием ANSYS Mechanical

П.Б. Забирохин

(ООО «ЦКТИ-ВИБРОСЕЙСМ», Санкт-Петербург)

Введение

Вязкоупругие демпферы предназначены для защиты оборудования и трубопроводов от любых динамических воздействий (вибрационных, сейсмических, ударных и т.п.). В 1987 году сотрудниками фирмы ЦВС были изобретены и запатентованы (Патент № 1689693 от 17.11.1987) демпферы серии ВД. В 1991 году вязкоупругие демпферы были рекомендованы к промышленному использованию, включая атомную энергетику, а в 1993 году ЦВС были разработаны первые ТУ [1], утвержденные Ростехнадзором и ведущими научно-исследовательскими и проектными институтами РФ. В 1995 году оригинальная конструкторская документация ЦВС на демпферы ВД была передана фирме GERB GmbH, Berlin. С тех пор ЦВС и фирма GERB совместно испытывают и совершенствуют конструкцию демпферов. В настоящее время демпферы ВД ЦВС широко используются во всем мире в различных индустриях, включая все страны с атомной энергетикой. С 2023 года предприятие ООО «ЦВС» в рамках государственной политики импортозамещения, восстановило производство демпферов ВД в России.

Объект исследования

Объектом исследования являются демпферы, содержащие вязкоупругую жидкость. К таким устройствам относятся и демпферы ВД, изготовленные в соответствии с требованиями ТУ [1]. Принципиальное отличие демпферов ВД от других конструкций заключается в возможности создавать демпфирующее усилие одновременно во всех степенях свободы, в отличие от распространённых линейных вязкоупругих демпферов. Общий вид упрощенной конструкции демпфера представлен на рисунке 1. Типовой демпфер состоит из цилиндрического корпуса 1, поршня 2 и внутренних элементов, погруженных в высоковязкую жидкость 3.

При движении поршня относительно корпуса демпфера высоковязкая жидкость создает нагрузку на поршень, демпфирующую динамическое движение поршня. Эта нагрузка воспринимается корпусом демпфера и может быть измерена в ходе его натурных испытаний. Конкретные динамические характеристики демпфера зависят от свойств рабочей жидкости, геометрии корпуса, поршня и внутренних элементов демпфера.

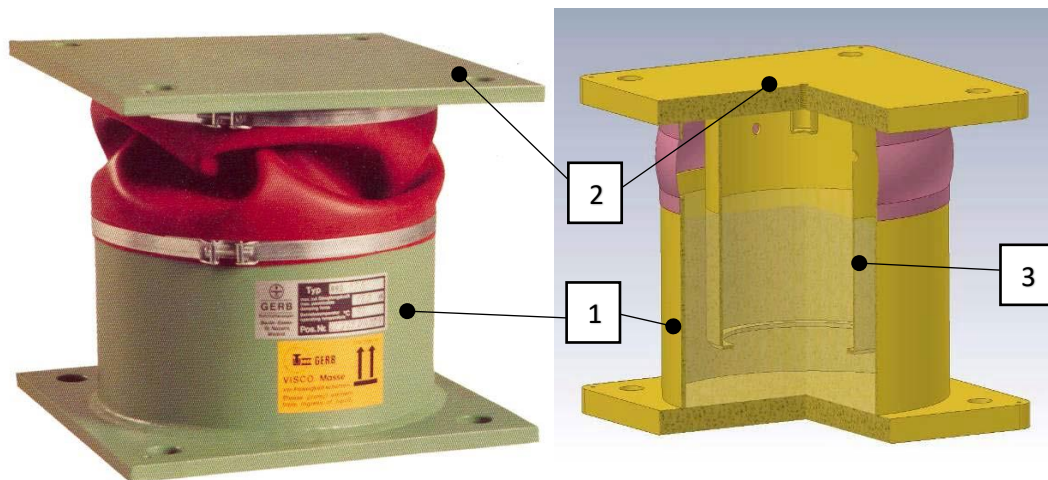


Рисунок 1 – Демпфер ВД (упрощенная схема)

Динамические характеристики всей номенклатуры демпферов типа ВД определены в ТУ на базе проведённых обширных экспериментальных и аналитических исследований.

Согласно ТУ, для каждого демпфера типа ВД разработана математическая модель – двухзвенная четырёхпараметрическая максвелловская модель [2] (см. рисунок 2), которая с необходимой точностью отображает их характеристики. Указанные математические модели используются при расчетах трубопроводов и оборудования на различные динамические воздействия, в частности, полная номенклатура демпферов и их характеристики приведены в базе данных программы dPIPE [3] (<https://www.dpipe.ru/ru/>).

Согласно рассматриваемой математической модели, каждый демпфер в каждом из направлений (горизонтальное, вертикальное) характеризуется четырьмя параметрами: k_1 , ω_1 , k_2 , ω_2 [2]. Здесь k_1 , k_2 – жесткости в реологических цепочках Максвелла, параметры ω_1 , ω_2 имеют размерность частоты и определяются через жесткости k_1 , k_2 и вязкости c_1 , c_2 модели Максвелла.

$$\omega_1 = \frac{k_1}{c_1}; \quad \omega_2 = \frac{k_2}{c_2} \quad (1)$$

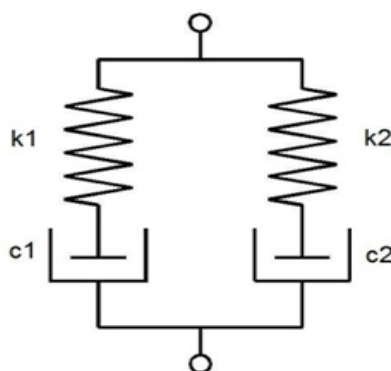


Рисунок 2 – Математическая модель вязкоупругого демпфера ВД: 4-х параметрическая максвелловская модель.

Модель, представленная на рисунке 2, отражает в первую очередь вязкоупругие свойства демпферной жидкости, однако косвенно может учитывать и другие механические свойства системы, такие как податливости внутренних элементов, инерционные свойства на высоких частотах и т.п. Отметим, что в общем случае вязкоупругий демпфер может описываться более сложными моделями, включающими большее количество максвелловских цепочек, включением нелинейных элементов и пр.

Динамические характеристики демпфера ВД в каждом из двух взаимно независимых направлений (горизонтальном и вертикальном) описываются кривыми динамической жесткости, представляющими зависимости упругой K_E и вязкой K_V составляющих динамической жесткости, являющиеся вещественной и мнимой частями комплексной динамической жесткости демпфера \underline{K} . Эквивалентная динамическая жесткость определяется как модуль комплексной жесткости \underline{K} . Кривые динамической жесткости демпфера строятся на основе указанных четырех параметров математической модели. Пример кривых динамической жесткости (для горизонтального направления демпфера ВД325/159-7 с внешним диаметром 325 мм и параметром жесткости «7», приведен на рисунке 3.

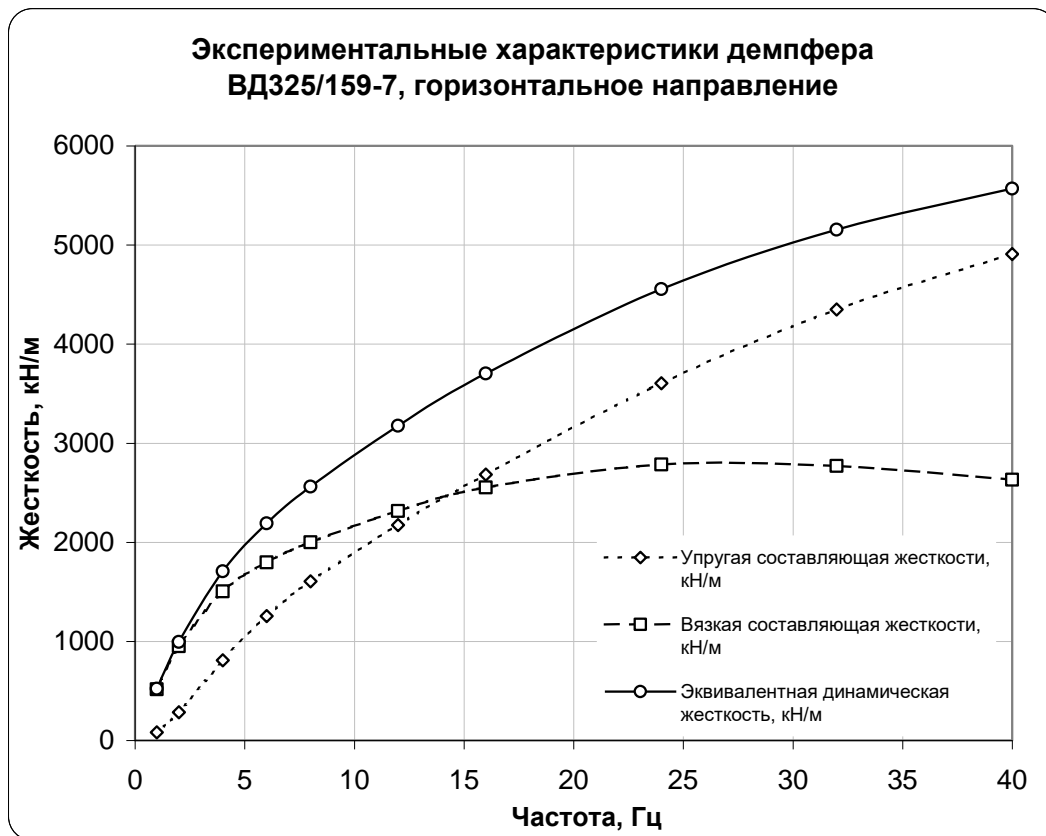


Рисунок 3 – Комплексная динамическая жесткость демпфера ВД

Комплексная динамическая жесткость \underline{K} определяется из четырехпараметрической максвелловской модели по формуле [2]:

$$\underline{K} = K_E + j \cdot K_V = \sum_{i=1}^2 k_i \cdot \left\{ \frac{(\omega/\omega_i)^2}{1+(\omega/\omega_i)^2} + j \cdot \frac{(\omega/\omega_i)}{1+(\omega/\omega_i)^2} \right\} \quad (2)$$

Каждому типу демпфера однозначно соответствуют два независимых друг от друга коэффициента вязкого сопротивления: в горизонтальном направлении - B_h , в вертикальном направлении - B_v , которые определяют поведение демпфера при постоянной скорости движения поршня или низких частотах воздействия. Данные коэффициенты определяются отношением установившегося значения силы, действующей на поршень демпфера F к скорости движения поршня v :

$$B = \frac{F}{v} \quad (3)$$

Эти коэффициенты B для горизонтального и вертикального направлений ($B=B_h$ либо $B=B_v$ соответственно) определяются четырьмя коэффициентами четырехпараметрической максвелловской модели по формуле:

$$B = c_1 + c_2 = \frac{k_1}{\omega_1} + \frac{k_2}{\omega_2} \quad (4)$$

Вычисление коэффициентов вязкого сопротивления является первоочередной задачей при конструировании демпферов и определении их динамических характеристик.

Помимо определения вязкого сопротивления демпфера, определяющего свойства демпфера при постоянных скоростях, необходимо получить кривые динамической жесткости $K_E(f)$ и вязкой $K_V(f)$ демпфера, образующие его свойства в диапазоне рабочих частот f .

Численное моделирование демпферов

Коэффициенты вязкого сопротивления и кривые динамической жесткости определяются экспериментально в рамках проведения динамических испытаний демпферов. В случае изменения конструкции демпфера по сравнению со стандартной, конструировании новых типов демпферов, сравнительного анализа различных конструкций актуальной становится задача предсказания свойств демпфера до экспериментального получения его характеристик. Для выполнения данной задачи возможно применение численного моделирования. Численное определение динамических характеристик вязкоупругих демпферов позволяют прогнозировать их поведение под действием различного рода нагрузок, а также оптимизировать конструкцию демпферов, улучшая их свойства, снижая затраты времени и средств на разработку и тестирование изделия.

Детальная математическая модель вязкоупругого демпфера в полной мере, описывающая его поведение во всем диапазоне возможных динамических нагрузок, может быть получена с использованием специализированных CFD-пакетов. Такого рода расчеты представляют собой сложную задачу, решение которой требует значительных вычислительных и временных ресурсов. Анализ возможностей различных современных CAE-систем показал, что альтернативой применению CFD-пакетов может служить использование широко распространённых КЭ программ, моделирующих твердые деформируемые тела, таких как ANSYS Mechanical.

Использование ANSYS Mechanical позволяет описать демпфер в упрощенной постановке. В рамках возможностей используемого КЭ пакета жидкость моделируется вязкоупругим материалом, без возможностей больших перемещений. При этом основные свойства демпфера, а именно его вязкость (коэффициенты вязкого сопротивления) и жесткость (кривые динамических жесткостей) могут быть успешно оценены в рамках предлагаемой постановки. Численное решение такой задачи не требует значительных ресурсов и предоставляет возможности быстрой оценки основных характеристик демпфера, а также сравнительного анализа различных конструкций демпфера.

Целью настоящего доклада является демонстрация возможностей такого подхода, а именно применения ANSYS Mechanical для моделирования поведения демпферов, содержащих вязкоупругую жидкость.

В пакете ANSYS Mechanical содержатся несколько моделей вязкоупругого материала. В случае моделирования демпферной жидкости наиболее удобна в применении модель Prony. Эта модель вязкоупругого материала аналогична использованию набора максвелловских цепочек для дискретной модели (рисунок 4). Максвелловские цепочки в данном случае описывают связь касательных напряжений и деформаций/ скоростей касательных деформаций жидкости.

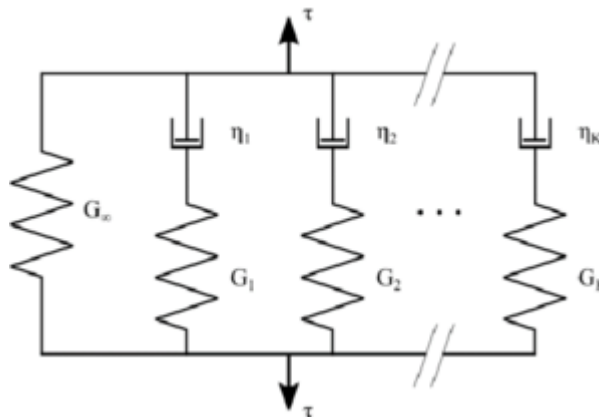


Рисунок 4 – Модель Prony

Известны методики, позволяющие определять коэффициенты модели вязкоупругого материала Prony на основании экспериментальных данных [4].

В общем случае материал, описываемый моделью Prony, имеет упругую составляющую G_∞ и k максвелловских цепочек. При $k = 2$ и $G_\infty \cong 0$ модель Prony полностью аналогична дискретной двухзвенной модели вязкоупругого демпфера, представленной на рисунке 2.

Демпферная жидкость предполагается несжимаемой, что учитывается введением коэффициента Пуассона $\nu = 0.5$.

При моделировании демпферов поршень и корпус могут моделироваться линейно-упругим материалом либо абсолютно жестким. Неподвижный корпус может полностью исключаться из рассмотрения и заменяться граничными условиями на своих внутренних поверхностях, контактирующих с жидкостью. Соединение демпферной жидкостью с корпусом и другими жесткими элементами могут моделироваться через соединение соответствующих узлов сеток или задаваться в виде линейного контакта типа «bonded».

Задача считается в линейной постановке, что автоматически означает, что рассматриваются только малые перемещения. Такое допущение справедливо при рассмотрении высоковязких жидкостей при перемещениях поршня на небольшие расстояния – порядка нескольких миллиметров. Эти ограничения не позволяют предсказывать поведение демпфера при высоких скоростях и нагрузках, однако предложенный подход позволяет определять базовые характеристики демпфера. Указанный подход идеологически хорошо соотносится с линейной моделью демпфера, представленной на рисунке 2.

Рассмотрим реализацию предлагаемого подхода на примере тестовой задачи о простейшем демпфере в виде кольцевого зазора между двумя концентрическими цилиндрическими поверхностями. Предполагаем, что наружная цилиндрическая поверхность (корпус демпфера) неподвижная, а внутренняя поверхность (поршень) движется по заданному закону. Промежуток между цилиндрическими поверхностями заполнен вязкоупругой жидкостью и ограничен сверху и снизу двумя плоскостями. Нижняя поверхность объема жидкости (дно демпфера) ограничивается в вертикальном направлении, верхняя поверхность жидкости предполагается свободной от нагрузок. Рассматривается половина общего объема, с установлением соответствующего условия симметрии. Здесь и далее жидкость задается с использованием одной максвелловской цепочки по модели Prony.

В качестве базового численного эксперимента, позволяющего продемонстрировать возможности описываемого метода моделирования, можно рассмотреть синусоидальное воздействие поршня по горизонтали, задаваемое с использованием инструмента Transient Structural.

На рисунке 5 показана КЭ сетка и распределение давлений в жидкости в процессе синусоидальных колебаний. В каждый момент времени давление растет со стороны, в которую движется поршень, с противоположной стороны от поршня давление падает. Давление в данном случае определяется как среднее напряжение в материале жидкости.

I: Transient Structural
 User Defined Result
 Expression: (S1+S2+S3)/3
 Time: 0.5
 Custom Obsolete
 Max: 57803
 Min: -57803
 10.03.2025 13:56

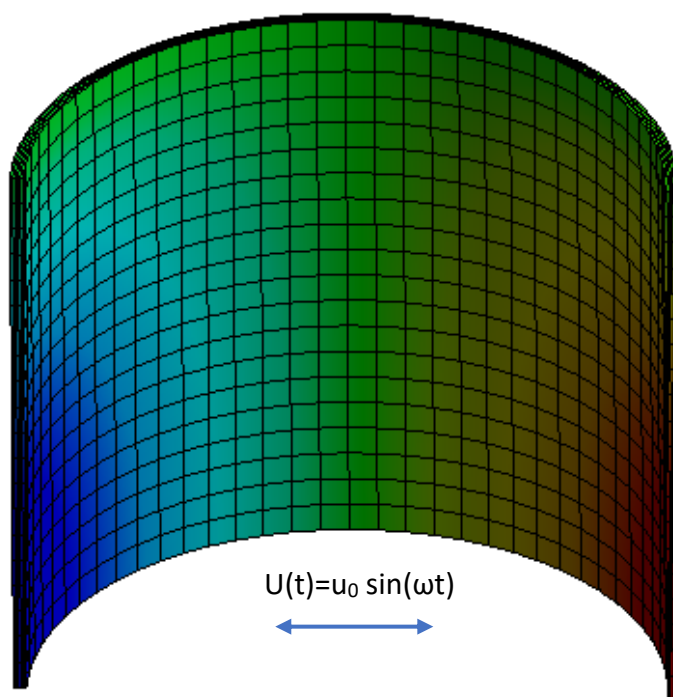
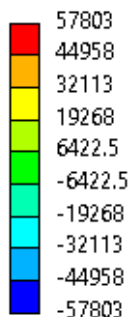
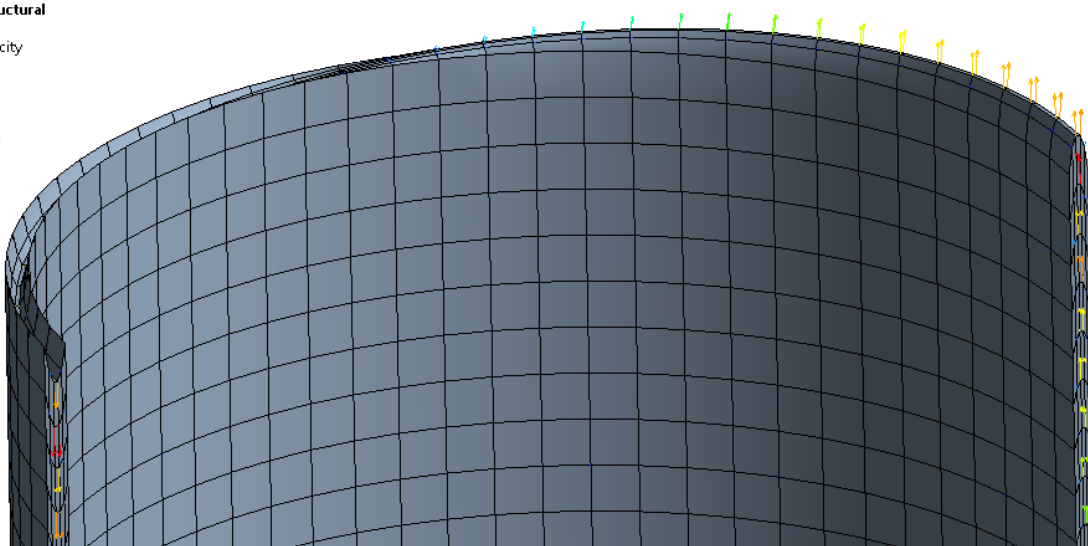
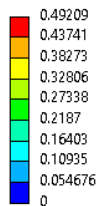


Рисунок 5 – Распределение давлений в цилиндрическом зазоре

На рисунке 6 показано деформированное состояние системы и распределение скоростей в жидкости в процессе синусоидальных колебаний. В каждый момент времени жидкость движется вверх, образуя “гребень” со стороны, в которую движется поршень, с противоположной стороны от поршня образуется впадина.

I: Transient Structural
 Total Velocity
 Type: Total Velocity
 Unit: mm/s
 Time: 0.44954
 Max: 0.49209
 Min: 0
 22.09.2025 16:00



$$U(t) = u_0 \sin(\omega t)$$

Рисунок 6 – Распределение скоростей в цилиндрическом зазоре

На рисунке 7 представлен график, выражающий зависимость реакции F в поршне тестового демпфера от перемещения поршня u .



Рисунок 7 – Расчетная зависимость реакции от перемещения при синусоидальной нагрузке

Характерная форма наклонного эллипса соответствует максвелловской модели демпфера. Нагрузка, соответствующая максимальному перемещению u определяет упругую составляющую K_E динамической жесткости демпфера, нагрузка, соответствующая перемещению $u=0$ – вязкую составляющую K_V . Площадь эллипса определяет рассеиваемую демпфером энергию.

Если вместо синусоидального воздействия приложить к поршню постоянную во времени скорость v , то через короткий промежуток времени релаксации значение реакции F в поршне выйдет на постоянный уровень F^* (см. рисунок 8). Расчетное вязкое сопротивление демпфера в этом случае рассчитывается по формуле (3) при подстановке в нее $F=F^*$.

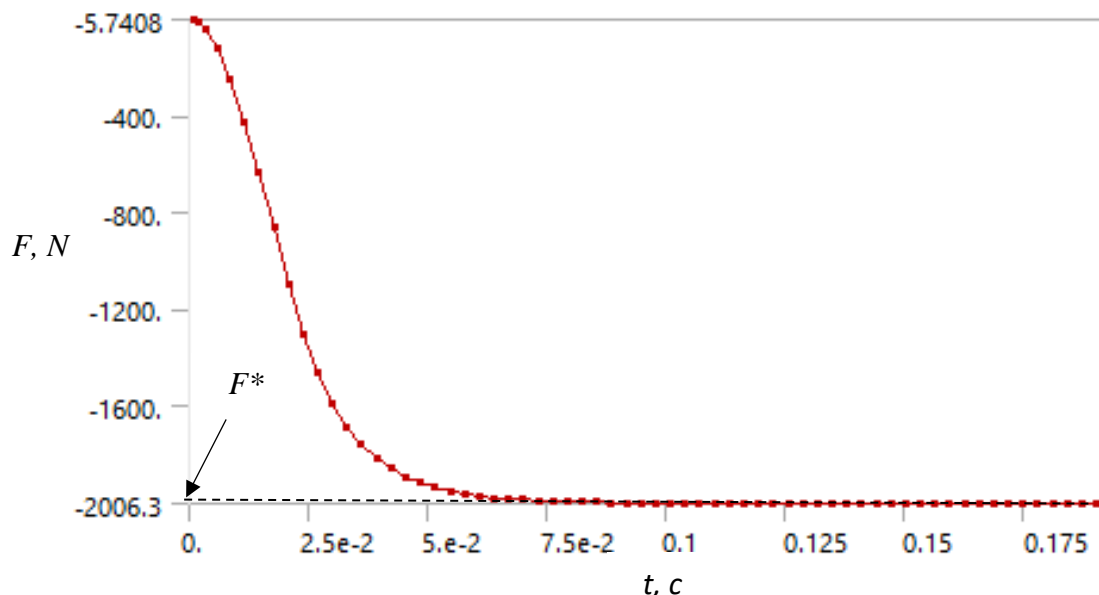


Рисунок 8 – Расчетная зависимость реакции от времени при постоянной скорости поршня

Помимо инструмента Transient Structural для определения характеристик демпфера, возможно использование инструмента Harmonic Response, позволяющего провести гармонический анализ системы. В этом случае кинематическая нагрузка прикладывается аналогично тому, как это делалось в динамическом анализе, рассмотренном выше, однако задается постоянная амплитуда колебаний поршня и диапазон частот. Результатом служит реакция в корпусе демпфера на установившемся режиме колебаний в заданном частотном диапазоне. Комплексная величина реакции в поршне может быть разложена на вещественную

(синфазную с перемещением) и мнимую (находящуюся в противофазе с перемещением). Если амплитуда колебаний единичная, то соответствующие компоненты реакции численно равны динамическим жесткостям демпфера K_E и K_V . Графики указанных величин получаются непосредственно из гармонического анализа, без дополнительных вычислений.

На рисунке 9 приведены расчетные кривые упругой и вязкой составляющих для тестовой модели демпфера в виде кольцевого зазора.

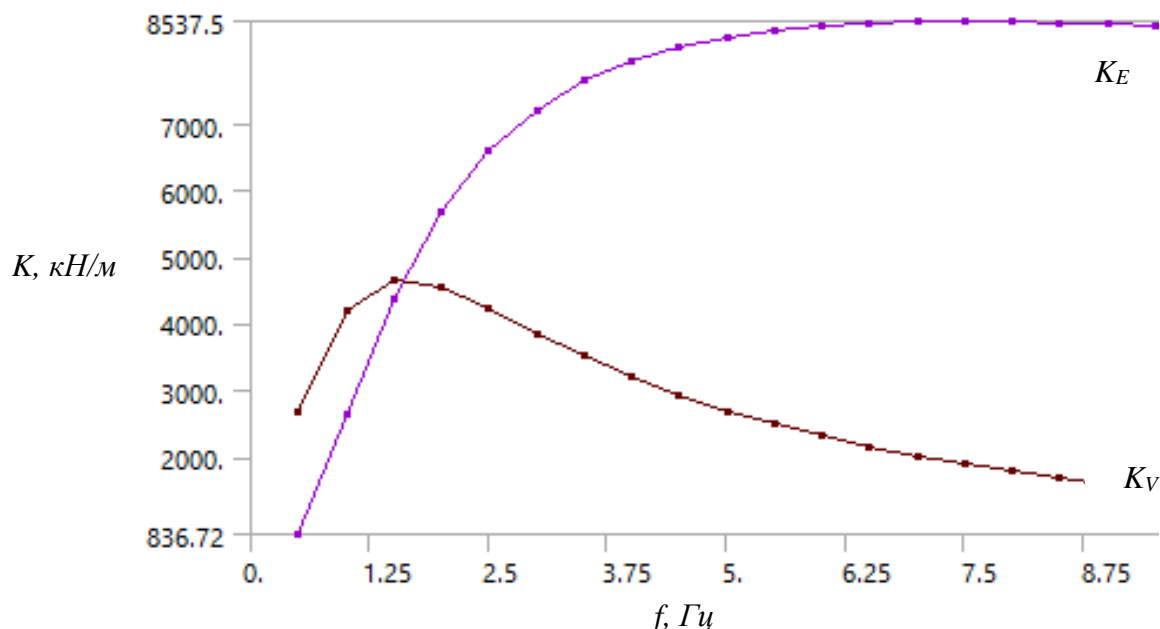


Рисунок 9 – Расчетные кривые динамической жесткости

Сравнив рисунок 9 с рисунком 3, можно убедиться, что даже простейшая модель материала высоковязкой жидкости в виде одной максвелловской цепочки может позволить получить зависимости динамических жесткостей демпфера, соответствующие экспериментальным данным на качественном уровне. Для одного максвелловского звена в модели материала и демпфера в виде кольцевого зазора - форма этих кривых совпадает с “классической формой” для однозвенной максвелловской модели [2].

В случае моделирования демпфера, конструкция которого обладает вертикальной осью симметрии, а нагрузка приложена в вертикальном направлении возможно рассмотрение задачи в осесимметричной постановке. Осесимметричная постановка позволяет существенно сократить время счета и использовать достаточно подробную сетку.

Рассмотрим вертикальное движение поршня на примере простейшего тестового демпфера, состоящего из цилиндрического корпуса и цилиндрического поршня с плоским дном (рисунок 10).

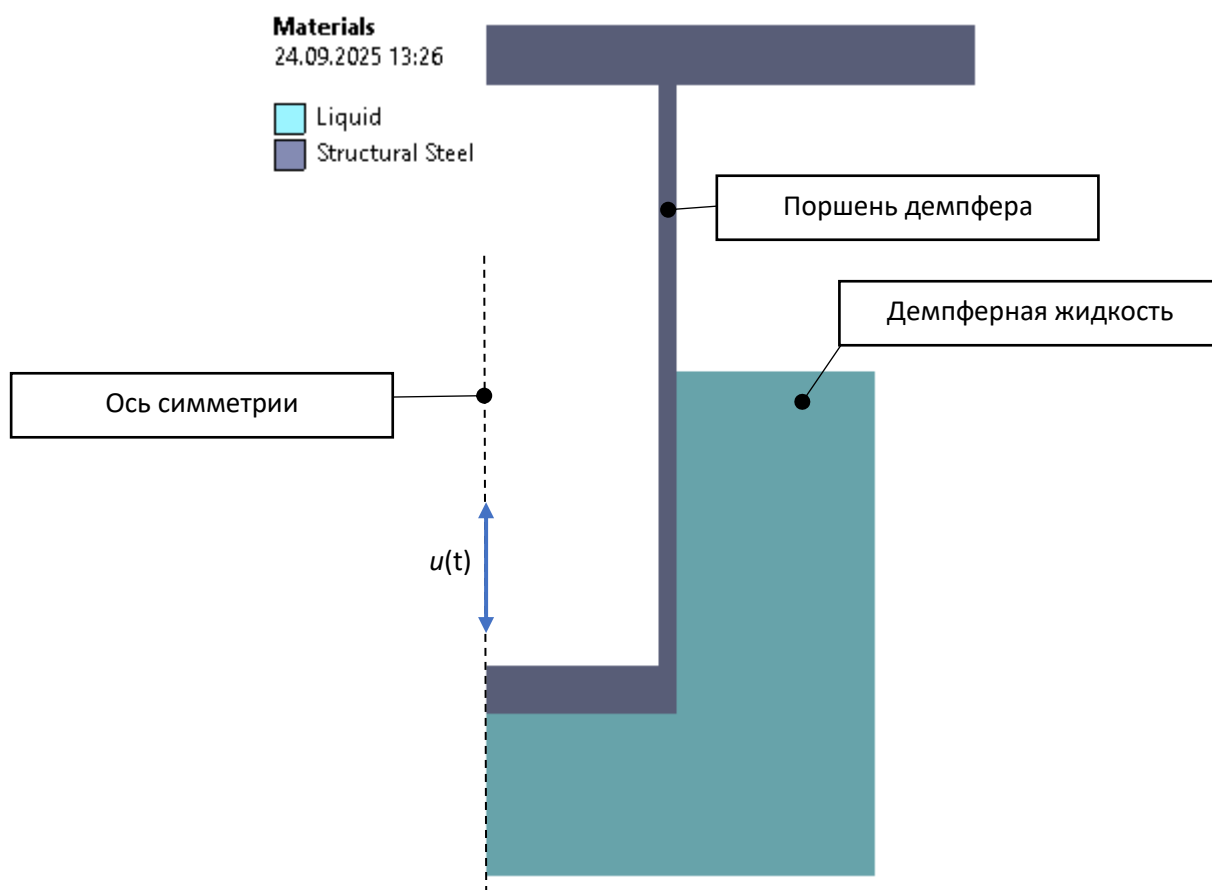
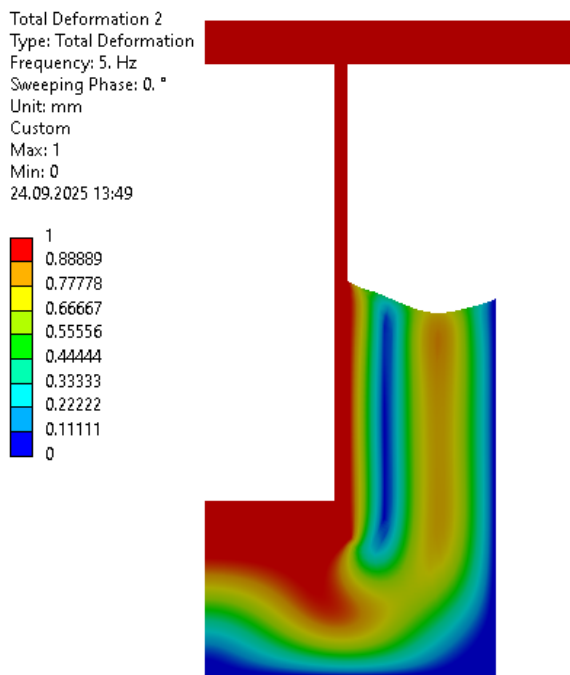


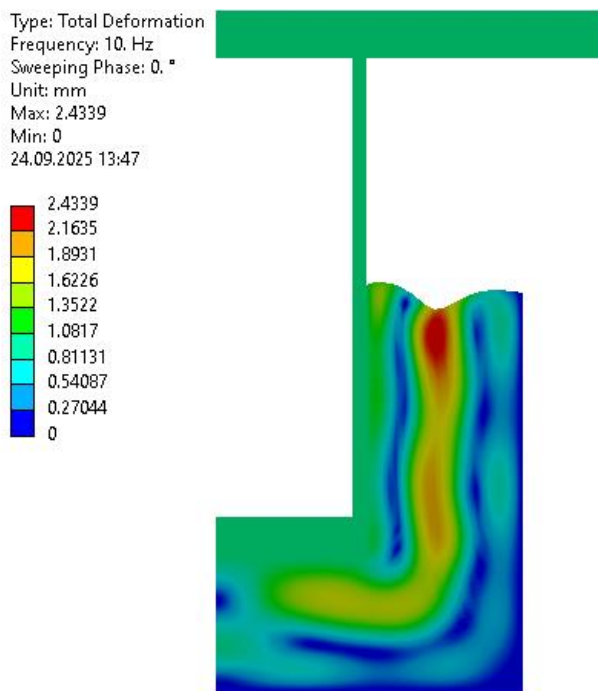
Рисунок 10 – КЭ модель осесимметричного демпфера под действием вертикальной нагрузки

Методика определения вязкого сопротивления B_v с использованием инструмента Transient Structural аналогична численному определению B_h , рассмотренной ранее. Аналогично и определение частотных зависимостей динамических жесткостей с использованием инструмента Harmonic Response.

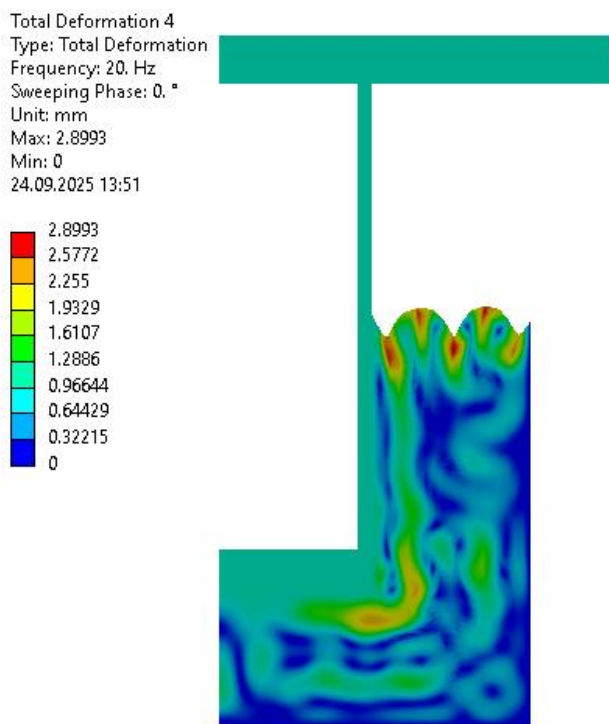
На рисунке 11 приведены результаты гармонического анализа модели работы демпфера в осесимметричной постановке на различных частотах – от 5 Гц до 30 Гц. Отметим, что численный анализ может предсказывать достаточно сложные формы колебаний жидкости на высоких частотах с образованием стоячих волн на ее поверхности, чем выше частота воздействия, тем сложнее форма установившихся колебаний.



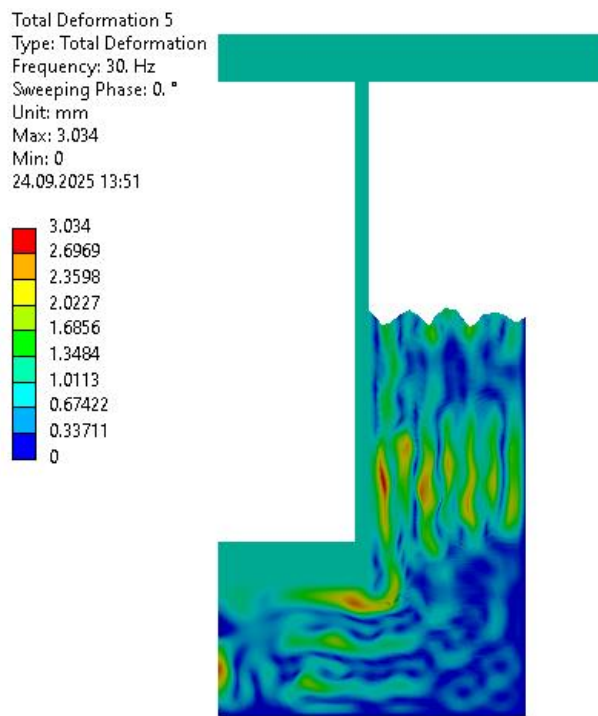
Частота воздействия $f = 5$ Гц



Частота воздействия $f = 10$ Гц



Частота воздействия $f = 20$ Гц



Частота воздействия $f = 30$ Гц

Рисунок 11 – Результаты расчета осесимметричного демпфера под действием вертикальной нагрузки

Сравнение с экспериментальными данными

Испытания демпферов проводятся на стенде ЦВС СДО. Конструкция стенда предусматривает жесткое крепление корпуса демпфера на раме и нагружение поршня в горизонтальном либо вертикальном направлении соответствующими гидроцилиндрами. В горизонтальном положении имеется возможность приложения как нагрузки с постоянной скоростью движения поршня, так и динамической нагрузки с определенной частотой. КЭ модели реальных демпферов различных типов более сложные чем представленные выше тестовые модели и включают в себя подробные модели поршней и внутренних элементов демпферов.

В качестве примера получаемых экспериментальных данных в таблице 1 приведены данные сопоставления расчетных и экспериментально определенных коэффициентов вязкого сопротивления для вертикального движения поршня для различных типов демпферов. В таблицу сведены данные по относительной величине расчетных коэффициентов вязкого сопротивления B^* , вычисляемых по формуле:

$$B^* = \frac{B_{Ansys}}{B_{test}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Здесь B_{Ansys} – численное значение, B_{test} – экспериментальное значение коэффициента вязкого сопротивления.

При построении численной модели использовались данные по вязкости демпферной жидкости, предоставленные поставщиком.

Таблица 1. Сравнение некоторых результатов численного моделирования и экспериментальных данных

Тип демпфера	B^* , %
ВД 325/219-7	119
ВД 426/219-15	118
ВД 630/426-15	122

Как видно из представленных данных, расчетные коэффициенты вязкого сопротивления в вертикальном направлении несколько выше экспериментальных на величины в пределах 22%.

Модель демпфера ВД в более сложном с точки зрения численного анализа - горизонтальном направлении нуждается в дополнительном уточнении.

По мере получения новых экспериментальных данных предлагаемый подход к численному определению динамических характеристик вязкоупругих демпферов будет дополнительно верифицироваться и уточняться.

Выводы

- Использование ANSYS Mechanical позволяет в упрощенной постановке решать сложные гидродинамические задачи, связанные с определением динамических характеристик вязкоупругих демпферов без применения специализированных CFD пакетов.
- Проведенные численные эксперименты демонстрируют широкие возможности предложенного подхода и достаточно хорошо подтверждаются данными натурных испытаний.
- Предложенный подход к численному определению динамических характеристик вязкоупругих демпферов будет верифицироваться и уточняться.

Литература

1. Вязкоупругие демпферы серии ВД, Технические условия, ТУ 4192-001-20503039-01
2. Alexey Berkovsky, Peter Vasilyev, Oleg Kireev, Different Approaches for the Modelling of High Viscous Dampers in Piping, Dynamic Analysis. Acceptable Limits for Simplifications, 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20), 2009.
3. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин “Программный комплекс dPIPE”. Регистрационный № 265 от 20.10.2019.
4. Tzikang Chen, Determining a Prony Series for a Viscoelastic Material from Time Strain Data, NASA / TM-2000-210123 ARL-TR-2206, May 2000