

ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ ГИДРОУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКА СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ТВЕРДОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО ТЕЛА

Сизарев В.Д., Смирнов А.В., Тимофеев С.В. (АО НИКИЭТ, Москва, Россия)

Введение

Сложность измерения параметров вибраций ТВС в потоке жидкометаллического теплоносителя вызывает необходимость поиска других косвенных методов измерения, позволяющих в той или иной степени дать оценку вибрационного состояния ТВС [1]. В данной статье приводится методика оценки вибрационного состояния ТВС по результатам измерения пульсаций давления потока теплоносителя.

1. Модель взаимодействия потока теплоносителя и ТВС

Рассмотрим модель взаимодействия потока теплоносителя и упругого тела в виде ТВС массой m , находящегося в потоке жидкой среды (в нашем случае это будет движущаяся вода или свинец, но для общего алгоритма построения решения – это не имеет значения), которая имеет распределенное по объему поле возбуждающих сил в виде пульсирующей составляющей давления и скорости движения потока. На элемент ТВС действует совокупность сил разного происхождения, а именно:

- $F_{ст} = m g$ – сила тяжести, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;
- $F_{ар} = \rho \cdot g \cdot V$ – сила Архимеда или вес теплоносителя, вытесненного ТВС, погруженной в него;
- $F_{сн} = 0,5 C_F \rho v^2 S$ – сила гидравлического сопротивления, пропорциональная площади S , плотности свинца ρ и квадрату скорости течения v^2 , C_F – безразмерный коэффициент сопротивления.

Силу, с которой свинец действует на каждый элемент поверхности ТВС, можно разложить на две составляющие – нормальную и касательную, т.е. силу давления и силу трения; $F_{тр} = 3\pi F\eta v$ – сила внутреннего трения в слоях свинца (сила сцепления – формула Стокса), F – площадь, η – коэффициент вязкости, v – средняя скорость по сечению.

На рисунке 1 изображена одномассовая система в двух проекциях: а) вид сбоку и б) вид сверху, состоящая из двух тел – теплоносителя в виде некоторых объемов массой свинца M и ТВС массой m , расположенной в центре каждого вида рисунка. В общем случае суммарный вектор поперечной силы, действующий со стороны потока в азимутальном направлении, направлен под углом 90° к вертикальной оси z тела.

Для общего рассуждения гипотетически представим себе частный случай, когда возмущающиеся силы, действующие со стороны потока теплоносителя в азимутальном направлении, будут равны по модулю и одинаковы по интенсивности. Совершенно очевидно, что в этом случае их равнодействующая сила будет равна нулю и тело останется в неподвижном состоянии.

Рассмотрим схему построения предложенной модели (см. рис.1):

- слева и справа деформируемого тела массой m расположено другое тело, условно обозначаемое объемы окружающего потока жидкой среды массой M , т.е. свинца;
- m – масса ТВС, включающая условно присоединенную массу свинца;
- M – масса единичного объема свинца, обозначаемая условно;
- k – жесткость на изгиб ТВС;
- α – суммарное демпфирование, включая вязкую составляющую;
- x_i – абсолютное перемещение деформируемого тела (ТВС);
- y – перемещение объема среды в поперечном направлении.

2. Уравнение движения упругого тела

Дифференциальное уравнение движения ТВС массой m , возбуждаемое потоком теплоносителя, относительно переменной x можно записать в виде [2]:

$$(m + \beta M)(\ddot{x} + \ddot{y}) + \alpha \dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

где точками в уравнении (1) обозначено дифференцирование по времени;
 β – коэффициент присоединенной массы свинца.

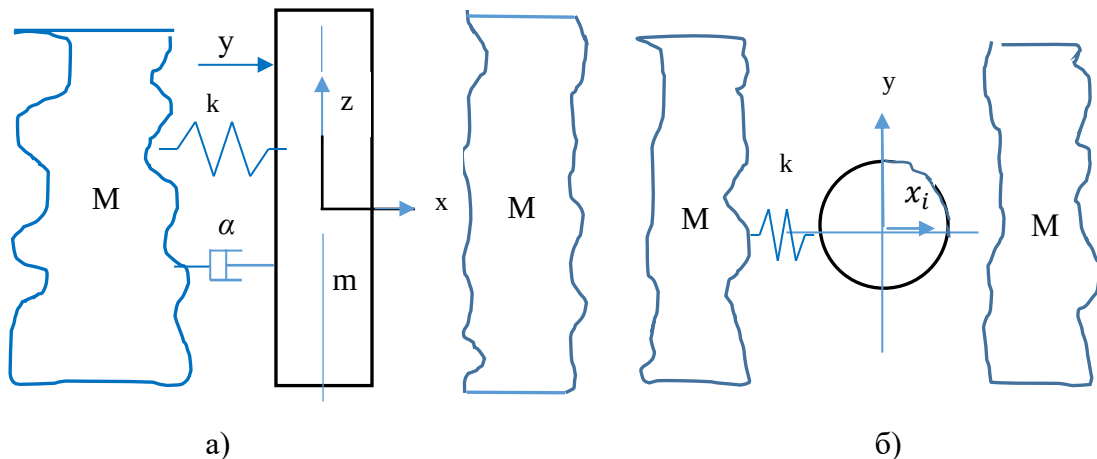


Рис. 1. Модель взаимодействия свинцового теплоносителя и модели ТВС

Значение переменной x запишется в виде $x = x_i - y$, определяемое относительным движением ТВС в потоке свинца в поперечном направлении.

Поясним введение разности двух составляющих $x_i - y$. С позиций физического трактования взаимодействия двух тел стоит отметить, что конечное значение разности двух физических величин может приобретать разные знаки в зависимости от рассматриваемой среды взаимодействия. Для водяной среды эта разность может быть, как положительной, так и отрицательной, для свинцовой среды разность может приобретать лишь положительное значение и уменьшаться до нулевого значения. Наиболее вероятная схема, когда разность имеет нулевое значение. Такая ситуация объясняется тем, что массово-инерционные характеристики колеблющихся сред разные – масса воды и свинца одного и того же объема отличаются примерно на порядок. Силы инерции несоизмеримо разные, при этом отметим, что плотности среды и материала ТВС существенно отличаются. Для справки приведем значения удельных весов тел, участвующих в колебаниях, которые составляют для свинца $\rho_{\text{Pb}} = 10,5 \text{ г/см}^3$ при температуре 450°C , для воды $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1,0 \text{ г/см}^3$ и материала ТВС $\rho_{\text{Fe}} = 7,8 \text{ г/см}^3$. При таком соотношении колеблющихся масс колебания ТВС в водяном потоке носят автономный характер и могут приобретать в зависимости от режима движения потока разный характер колебаний – от вынужденного до автоколебательного. В случае колебаний в свинцовой среде наблюдается совершенно иная картина – колебательные движения массы потока свинца вовлекают, а точнее – захватывают в свой режим движения более легкое тело и, по существу, вынуждают совершать совместные синфазные колебательные движения. Независимые колебания более легкого тела, чем среда, в которой оно находится, физически не могут происходить. Проскальзывание тела так же маловероятно, кроме случаев жесткого крепления тела к опорным конструкциям, которые создают повышенное гидравлическое сопротивление. Таким образом для

колебательных движений тел в свинцовой среде наиболее вероятен режим вынужденных колебаний. Однако нельзя исключать режим автоколебаний связанной системы в виде тела ТВС и массы свинца в замкнутом объеме. Идентификацию режима колебаний ТВС в свинцовом потоке в условиях стенда при использовании методов корреляционного анализа по сигналам датчиков пульсаций давления и вибраций в свинцовом потоке предполагается уточнить на последующих этапах проводимого расчетно-экспериментального анализа вибраций макета ТВС для РУ БР-1200 на теплофизическом стенде.

Возвращаясь к уравнению движения (1), приведем его к упрощенной записи. Производя деление всех членов уравнения (1) на $(m+\beta M)$, получим классическую форму записи уравнения движения в виде

$$\ddot{x} + 2\Omega\xi\dot{x} + \Omega^2x = -\ddot{y}, \quad (2)$$

где $\Omega^2 = \frac{k}{m+\beta M}$ – собственная частота ТВС в среде;

$2\Omega\xi = \frac{\alpha}{m+\beta M}$ – член, учитывающий линейную диссипацию колебательной энергии;

ξ – относительное демпфирование.

Решение уравнения будем искать в виде $x_0 e^{j\omega t}$ при возмущении такого же вида $\ddot{y} = Q_0 \cdot e^{j\omega t}$. Подставляя эти выражения в (2) получим

$$(-\omega^2 + 2j\xi\Omega + \Omega^2)x_0 \cdot e^{j\omega t} = -Q_0 e^{j\omega t}.$$

Функция, определяемая отношением «входного» процесса к «выходному» x_0/Q_0 , запишется в виде

$$H(\omega) = \frac{x_0}{Q_0} = \frac{-1}{\Omega^2[1 - (\omega/\Omega)^2 + 2j\xi(\omega/\Omega)]}.$$

Реакция ТВС на возмущение потоком в виде квадрата параметра определяется из соотношения:

$$\langle \ddot{x}^2 \rangle = \int_0^\infty |H(\omega)|^2 \cdot \Phi_{QQ}(\omega) d\omega, \quad (3)$$

где $\Phi_{QQ}(\omega)$ – спектральная плотность знакопеременной пульсационной нагрузки, действующей на ТВС.

При условии, когда рассматривается случай равенства $\omega = \Omega$, вычисление с помощью выражения (3) может быть упрощено, полагая при этом, что спектральная плотность возмущения $\Phi_{QQ}(\omega)$ достаточно гладкая функция в области резонансной частоты и равна $\Phi_{QQ}(\Omega)$. Поэтому ее можно вынести за знак интеграла. Тогда средний квадрат виброускорений запишется в виде:

$$\langle \ddot{x}^2 \rangle = \int_0^\infty \frac{\Phi_{QQ}(\omega) d\omega}{(\Omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{2\xi\omega}{\Omega_0}\right)^2} = \frac{\Phi_{QQ}(\Omega)}{\Omega_0^4} \int_0^\infty \frac{d\omega}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\Omega_0}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{2\xi\omega}{\Omega_0}\right]^2}, \quad (4)$$

где $\Phi_{QQ}(\omega)$ – спектральная плотность переменной составляющей давления и скорости потока. По существу она является функцией силовой нагрузки, действующей на ТВС. Значение спектральной функции зависит от характера обтекания ТВС потоком и его параметров;

Ω – собственная частота реализуемой формы колебаний ТВС;

ω – основная частота спектральной плотности входного процесса. Может назначаться в качестве частоты верхней границы, ограничивающей высокие частоты спектральной плотности. Наиболее точный расчет может быть выполнен лишь по экспериментально замеренному значению. Вместе с тем используемые формы и значения спектральной плотности для расчетов могут приниматься на основе известных экспериментальных данных и их аналогов;

ξ – относительное трение ТВС. Фактическое значение определяется известными методами или экспериментальным путем. Что касается жидкометаллического теплоносителя, то при выборе коэффициентов трения изделий активной зоны можно использовать экспериментальные данные, полученные в процессе стендовых испытаний всего ряда ТВС, БЗ и БО РУ.

Анализ соотношения (4) для прогнозной расчетной оценки уровня вибраций ТВС в виде среднего квадрата, определяемого параметра $\langle \ddot{x}^2 \rangle$ позволяет отметить влияние на конечный результат каждого члена формулы. При этом предполагается относительная стабильность параметров потока – температуры, установившегося режима движения одного и того же вида среды, расхода, скорости, их критериев подобия, а именно числа Рейнольдса, определяющего связь между силами инерции и силами трения в движущейся жидкой среде; критерия Эйлера, характеризующего соотношение сил давления и сил инерции; критерия Фруда характеризующий подобие процессов и выражает соотношение сил тяжести и сил инерции; числа Струхала или критерий гомохронности и другие критерии, фактически не влияющие на конечный результат расчетного прогнозирования уровней вибраций.

Экспериментальные исследования пульсаций давления на теплофизических стендах всей линейки ТВС показали, что интенсивность как пульсаций давления, так и вибраций сосредоточена в низкочастотной области в диапазоне частот от 0 до 20 Гц.

Подынтегральное выражение в (4) представляет собой передаточную функцию, практически состоящую лишь из соотношения двух частот – основной частоты спектральной плотности возбуждения ω и собственной частоты Ω_0 ТВС. Трение ξ в данной формуле тоже играет заметную роль. Совершенно очевидно, что чем выше трение колебательной системы, тем ниже уровень ответной реакции. Стоит отметить, что колебания в свинцовой среде имеют высокий коэффициент вязкого трения.

На рисунке 2 представлены совмещенные спектральные плотности мощности виброускорений средней части ТВС (красный цвет) и пульсаций давления (синий цвет). Численные значения спектральных плотностей определяются путем интегрирования площадей под кривыми в диапазоне частот от 0 до значимой частоты, для которой значения плотности близки к нулевому. Интеграл в полосе частот от 0 до верхней частоты позволяет получить значение спектральной плотности мощности сигнала виброускорений и пульсаций давления в этом диапазоне частот, фактически принимаемую за нагрузку, что в принципе не мешает вести расчетные оценки с соблюдением размерности сигналов. После процедуры интегрирования и учета исходных данных окончательная запись (4) приобретет вид:

$$\langle \ddot{x}^2 \rangle = \frac{\Phi_{QQ}(\omega)}{\Omega^4} \cdot \frac{\pi\Omega}{4\xi^2}. \quad (5)$$

Для расчета определяются значения параметров: низшая собственная частота колебаний ТВС; спектральная плотность «входного» сигнала $\Phi_{QQ}(\omega)$ в полосе частот; относительное трение $\xi = 0,048$.

Собственная частота колебаний ТВС РУ определяется расчетным путем при этом принимается, что инерционные силы колеблющейся ТВС и силы упругости превышают силы трения. Относительное трение ξ принимается для более точного вычисления по результатам экспериментальных исследований ТВС для РУ в потоке теплоносителя.

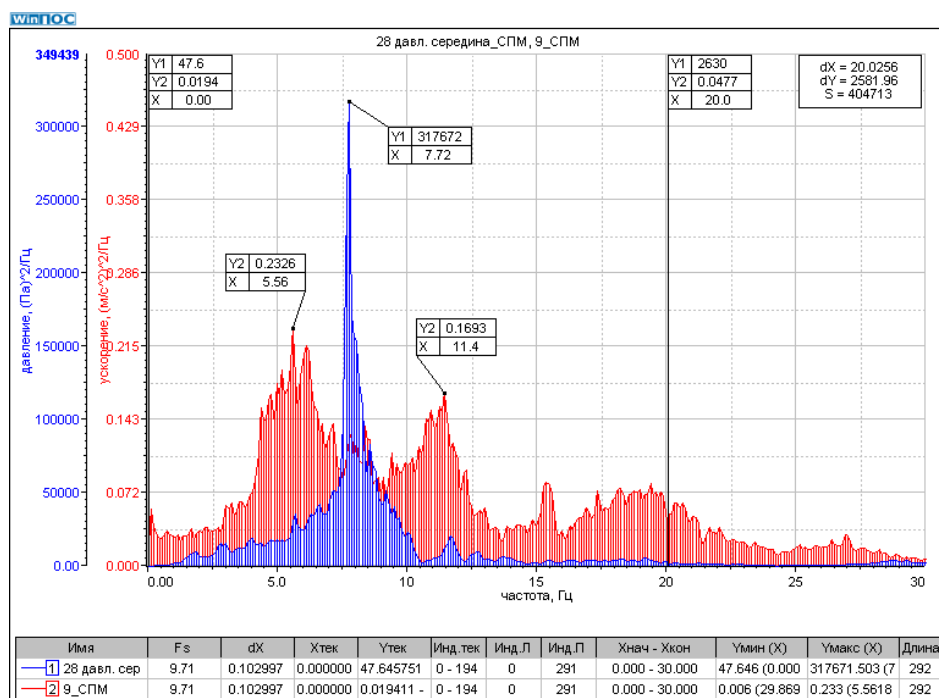


Рис. 2. Спектральная плотность мощностей виброускорений (красный цвет) и пульсаций давления (синий цвет) средней части ТВС для спектральной плотности пульсации давления, расход свинца $60 \text{ м}^3/\text{ч}$ (скорость потока $\sim 1,0 \text{ м/с}$)

Заключение

При проведении пусконаладочных испытаний и в процессе эксплуатации реакторной установки со свинцовым теплоносителем косвенную оценку вибрационного состояния ТВС в условиях отсутствия соответствующих средств измерений можно осуществлять по контрольным измерениям пульсаций давления. Использование надежных современных средств измерений пульсаций давления, которые по сравнению с датчиками измерения вибраций для данных условий испытаний имеются на рынке, позволит вести вибрационную диагностику технического состояния ТВС реакторной установки со свинцовым теплоносителем в процессе ее эксплуатации.

Список литературы

1. В.Д. Сизарев, С.В. Столотнюк, С.В. Тимофеев. Особенности гидроупругих колебаний тепловыделяющих сборок в потоке свинцового теплоносителя. Сб. трудов V МНТК-2018, АО «НИКИЭТ», г. Москва.
2. В.В. Болотин Статистические методы в строительной механике. М. Стройиздат, 1965.
3. R.G.J.Robinson. Measurements of the flow – induced vibration of an LMFBR free – standing fuel element in a Water Loop. Proc. of the Intern. conf. “Vibration in nuclear Plant” UK Keswick 1978.