

УДК 621.311.22.019.3.001.18

Оценка величины динамических напряжений паропровода острого пара блока 800 МВт

Красновский С.Я., ст. преп.

Приводится расчет напряженно-деформированного состояния паропровода острого пара блока №6 мощностью 800 МВт Рязанской ГРЭС, находящегося под действием динамических нагрузок, действующих в нормальном рабочем режиме станции.

Ключевые слова: компьютерная модель паропровода острого пара, эквивалентные удлинения моделей опор, вибрационные напряжения, усталостное разрушение материала.

Size definition of dynamic pressure of a reheat steam line of the block capacity 800 MVt

Krasnovskiy S.J.

Calculation of the is intense-deformed condition of a steam line of the block №6 800 MVt by the Ryazan state power station from the dynamic loadings operating in normal operating conditions of station is carried out.

Keywords: computer model vapour wire sharp pair, equivalent lengthenings of the models full tilt, vibratory voltages, fatigued destruction material.

Разработанная компьютерная модель паропровода острого пара с учетом известного пространственного положения, воздействия всего комплекса нагрузений позволяет решать задачу настройки опорно-подвесной системы. В ходе эксплуатации объекта первоначально настроенные пружинные опоры изменяют свое упругое состояние. Это приводит к перемещениям осевой линии паропровода и возникновению дополнительных статических деформаций и напряжений. Кроме того, необходимо рассматривать задачу расчета динамических напряжений, возникающих в материале трубы под действием переменных нагрузок, в деформированном состоянии паропровода. На основе полученных данных возможен параметрический анализ настройки упругого состояния пружин в целях оптимизации статического напряженно-деформированного состояния паропровода.

Для решения задачи проведены детальный анализ чертежей опор, представленных заказчиком, а также натурные измерения длин пружин основных опор паропровода в холодном состоянии. На основе проведенных измерений реальных длин пружин в каждой опоре были рассчитаны эквивалентные удлинения моделей опор. Числовые значения эквивалентных удлинений опор, полученные для монтажного состояния и текущего холодного состояния паропровода на дату проведения измерений (май 2008 г.), явились исходными данными для последующего моделирования.

Сравнивая значения эквивалентных удлинений опор, можно сделать вывод, что отклонения линейных параметров настройки опор от исходного монтажного состояния могут достигать существенных значений. Так, например, на опорах № 69 и № 70 отличия в

монтажных и реальных удлинениях достигают значений 78 и 88 % соответственно. Однако большинство значений находится в пределах 10–20 %. Среднее значение отклонения удлинений опор от монтажной величины составляет 19 %. Полученное значение может служить интегральной характеристикой отклонения осевой линии трубопровода от расчетного монтажного положения, произошедшего в результате действия долговременного термомеханического воздействия на конструкцию. Может быть рекомендовано проводить регулярные измерения длин пружин опор и расчет данного интегрального параметра с тем, чтобы следить за изменением положения трубопровода в пространстве.

Полученные эквивалентные удлинения опор были введены в конечно-элементную модель трубопровода, и был проведен численный расчет модели, находящейся под действием статической нагрузки собственного веса. На рис. 1 показано измененное положение трубопровода в пространстве в результате приложения актуальных удлинений опор и силы собственного веса в холодном состоянии. Наибольшие отклонения обеих веток паропровода от исходного состояния наблюдаются в средней части в зоне прохождения вертикальных труб и составляют 34 мм на ветке А. Кроме этой зоны, имеют место существенные перемещения верхней части ветки А, составляющие около 30 мм.

Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, возникающих в материале трубопровода при указанных условиях нагружения, показано на рис. 2. Наибольшие напряжения локализируются в верхней части веток А и Б в зоне тройников, обеспечивающих переход от горизонтального участка трубы к вертикаль-

ным патрубкам. Максимальное напряжение составляет 30,4 МПа.

Определенный интерес представляет сравнение актуального напряженно-деформированного состояния паропровода в холодном состоянии при действии силы собственного веса с напряженно-деформированным состоянием объекта в соответствии с монтажными настройками опор. На рис. 3 показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, возникающих в материале трубопровода при действии силы собственного веса в случае удлинений опор по монтажным чертежам.

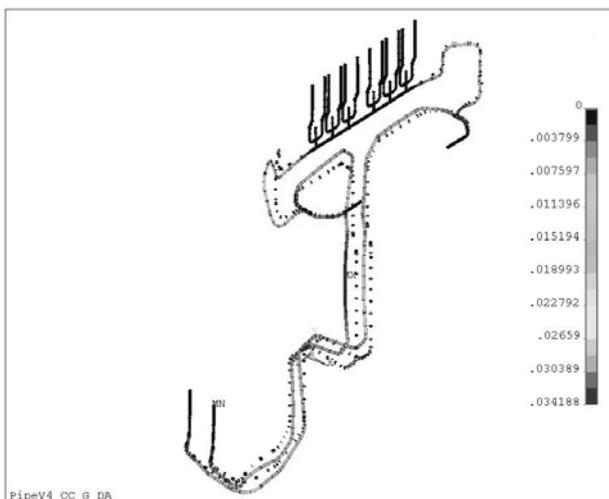


Рис. 1. Изменение пространственного положения паропровода в холодном состоянии по измерениям длин пружин в актуальном состоянии (май 2008 г.) под действием собственного веса: точками показано исходное положение паропровода согласно монтажным чертежам; МХ – зона максимальных перемещений, м

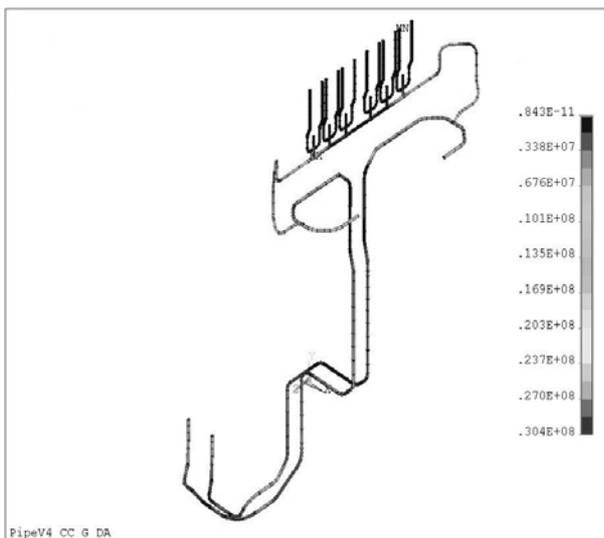


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа, возникающих в материале трубопровода в холодном состоянии под действием собственного веса по измерениям длин пружин опор в актуальном состоянии (май 2008 г.): МХ – зона максимальных напряжений

Согласно проведенному анализу, максимальные напряжения достигают значения

20,7 МПа. Это означает, что действительные напряжения в материале трубы в 1,5 раза больше проектных напряжений, рассчитанных при проектировании станции. Более того, область наибольших напряжений, согласно проектным данным, находится в зонегиба при переходе от длинного вертикального участка веток А и Б к горизонтальному участку. Отметим, что смещение зоны наибольших напряжений из проектной области на другой участок трубопровода может привести к разрушению этого участка, если данный участок, согласно первоначальному проекту, не был рассчитан на прочность по повышенным напряжениям.

Таким образом, построенная уточненная модель паропровода учитывает действительное состояние пружин опор и будет использоваться в дальнейших расчетах.

Уточненная компьютерная модель паропровода острого пара была использована для статического расчета напряженно-деформированного состояния объекта при заданной постоянной температуре. Данный этап необходим для последующего анализа динамического состояния паропровода в рабочем режиме, вызванного переменным давлением. При этом предполагается, что температурная нагрузка в рабочем режиме является стационарной, а динамические эффекты вызваны только колебаниями давления пара в трубах.

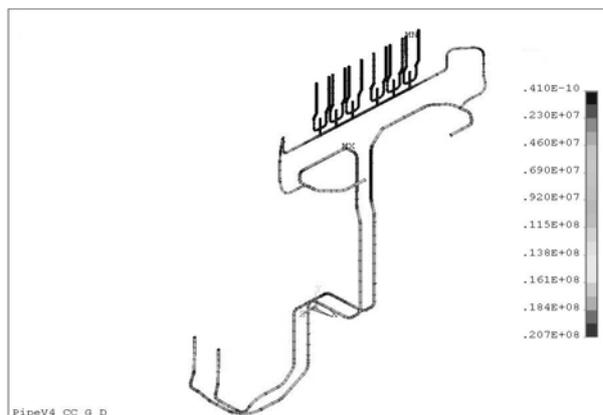


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа, возникающих в материале трубопровода при действии силы собственного веса в случае удлинений опор по монтажным чертежам: МХ – зона максимальных напряжений

Согласно представленной технической документации и собственным измерениям, проведенным на предыдущем этапе выполнения договора, были выбраны следующие значения температурной нагрузки и механических свойств материала стали 15Х1М1Ф:

- температура стенки паропровода – 540 °С;
- модуль Юнга стали – 214–169 ГПа в диапазоне температур 20–600°С;
- коэффициент линейного расширения стали принят постоянным и равным $1,37e-5$ 1/°С.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния объекта представлены на рис. 4, 5. Наибольшие перемещения испытывают две области паропровода: во-первых, верхняя горизонтальная перемычка, соединяющая ветки А и Б, и во-вторых, центральные протяженные вертикальные участки обеих веток конструкции.

В верхней зоне максимальные перемещения достигают значения 83 см, а в средней зоне перемещения приблизительно в два раза меньше. Напряженное состояние паропровода, находящегося под действием установившейся температурной нагрузки, можно считать равномерным на обеих ветках паропровода.

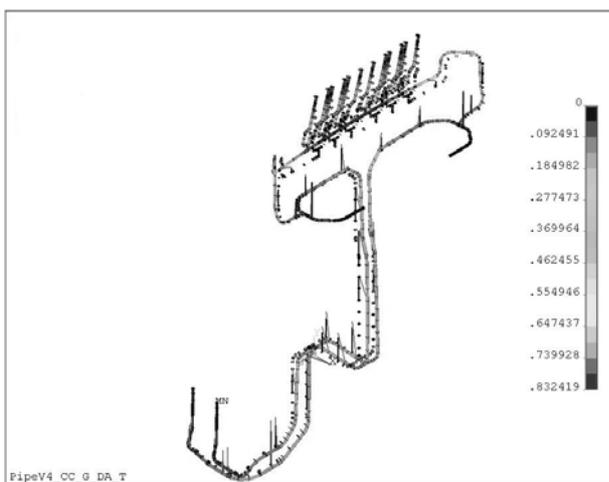


Рис. 4. Пространственное положение паропровода в горячем состоянии при наличии силы собственного веса на уточненной модели, т.е. с учетом действительного упругого состояния пружин, по проведенным измерениям (май 2008 г.): точками показано исходное положение паропровода согласно монтажным чертежам; МХ – зона максимальных перемещений, м

Напряжения на ветках А и Б на многих участках находятся в пределах 10–30 МПа и не превышают 50 МПа в отдельных зонах. Повышенный уровень напряжений 80–150 МПа наблюдается на криволинейных участках труб, соединяющих ветки А и Б с горизонтальной перемычкой, а также на крайних вертикальных патрубках, в которых и возникают максимальные напряжения, равные 186 МПа.

Полученное деформированное состояние паропровода рассматривалось как исходная конфигурация модели при проведении динамического анализа состояния паропровода, находящегося под действием быстропеременного давления в рабочем режиме работы станции.

Численный расчет вибраций паропровода ГРЭС был проведен на промежутке времени 65 с при условии, что давление пара в трубах энергетической системы изменяется согласно найденной зависимости от времени. Выполненное компьютерное моделирование показало, что имеют место существенные колебания трубопровода в низкочастотной части

спектра. Кроме того, при анализе результатов повышенное внимание было уделено точкам соединения пружинных опор с трубами, а также зонам наибольших динамических напряжений, возникающих при вибрации паропровода от переменного давления.

Ранее были проведены натурные измерения линейных ускорений вынужденных колебаний паропровода в рабочем режиме на опорах № 1, 2, 7 и 14 ветки А и опорах № 16, 18, 23, 29 и 30 ветки Б. Поэтому для верификации компьютерного моделирования были выбраны те же самые опоры, наиболее информативно представляющие движение обеих веток паропровода по всей длине. В соответствии с поставленными целями проекта, основное внимание было уделено диапазону частот от 0 до 25 Гц.

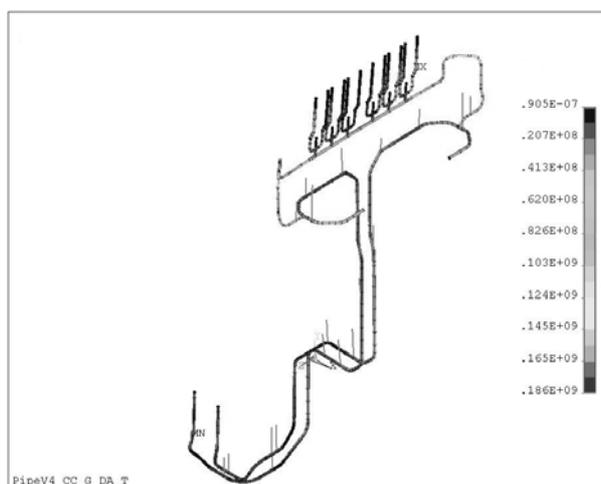


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа, возникающих в материале трубопровода в горячем состоянии при наличии силы собственного веса, на уточненной модели, т.е. с учетом действительного упругого состояния пружин, по проведенным измерениям (май 2008 г.): МХ – зона максимальных напряжений

Анализируя полученные расчетные графики, можно сделать следующие выводы:

- осредненный по характерным точкам паропровода уровень низкочастотной вибрации по среднеквадратичному отклонению составляет в направлении X – 0,804 м/с², в направлении Y – 0,852 м/с², в направлении Z – 0,846 м/с²;
- эквивалентный общий уровень низкочастотной вибрации по среднеквадратичному отклонению, рассчитанный как среднее от модуля вектора амплитуд, равен 1,541 м/с². При этом обе ветки паропровода имеют практически одинаковый уровень вибраций: 1,542 м/с² для ветки А и 1,540 м/с² для ветки Б;
- вибрации в вертикальном направлении Y, наибольшие в зоне опор №14 (ветка А) и №30 (ветка Б), составляют по среднеквадратичному отклонению 1,234 и 1,209 м/с² соответственно. Следовательно, нижняя часть паропровода

подвержена преимущественно вертикальным вибрациям;

- вибрации в горизонтальном направлении X (перпендикулярно плоскости, проходящей через пару протяженных вертикальных участков паропровода), наибольшие в зоне опор №7 (ветка А) и №23 (ветка Б), составляют по среднеквадратичному отклонению 1,262 и 1,187 м/с² соответственно. Следовательно, средняя протяженная часть паропровода подвержена значительным горизонтальным вибрациям в перпендикулярном к плоскости, проходящей через вертикальные участки, направлении;

- вибрации в горизонтальном направлении Z (коллинеарно плоскости, проходящей через пару протяженных вертикальных участков паропровода), наибольшие в зоне нижних опор №14 (ветка А) и №30 (ветка Б), составляют по среднеквадратичному отклонению 1,168 и 1,041 м/с² соответственно. Кроме того, значительная вибрация в направлении Z наблюдается на верхних опорах №1 (ветка А) и №16 (ветка Б) и составляет по среднеквадратичному отклонению 0,906 и 0,980 м/с² соответственно. Следовательно, как нижняя, так и верхняя части паропровода испытывают значительную горизонтальную вибрацию в вертикальной плоскости;

- спектральный анализ временного сигнала показал наличие большого числа возбуждаемых гармоник в диапазоне частот от 0 до 25 Гц. Это согласуется с ранее проведенным исследованием собственных частот и форм колебаний модели паропровода. Амплитуды соответствующих гармоник достигают значений 0,2–0,3 м/с². В некоторых случаях отдельные гармоники достигают уровня 0,3–0,35 м/с². Таким образом, случайные пульсации давления пара в трубе приводят к возбуждению определенных собственных частот, что повышает общий уровень вибрации объекта.

Анализ вибрационных напряжений был проведен по статически наиболее нагруженным участкам трубопровода. Статические напряжения возникают под действием веса паропровода, установившейся температуры и среднего давления пара в трубе. Дополнительно был проведен статический расчет состояния модели, находящейся под действием равномерного среднего давления величиной 22,6 МПа (рис. 6). Заметим, что внутреннее давление в трубе, согласно известному решению теории упругости, приводит к значительным тангенциальным напряжениям в материале трубопровода, а также к значительным осевым напряжениям, ввиду того что концы трубопровода подразумеваются закрытыми. Эти два типа практически равномерно распределенных по длине паропровода напряжений, равных 39,2 и 19,9 МПа соответственно, вносят основной вклад в эквивалентные напряжения, которые достигают значения 34 МПа.

Дополнительный вклад ($\approx 0,13$ и $0,6$ МПа) вносят сдвиговые и изгибающие напряжения, вычисляемые относительно среднего осевого значения.

Сравнивая распределения статических напряжений от различных факторов, можно сделать вывод, что верхняя часть объекта является наиболее нагруженной. Следовательно, именно в этой части действие относительно небольших динамических напряжений может оказывать наибольший эффект и приводить к усталостному разрушению материала паропровода. Кроме того, проведенный динамический анализ состояния паропровода, находящегося под действием переменного давления, также показал, что зона максимальных напряжений находится в верхней части паропровода.

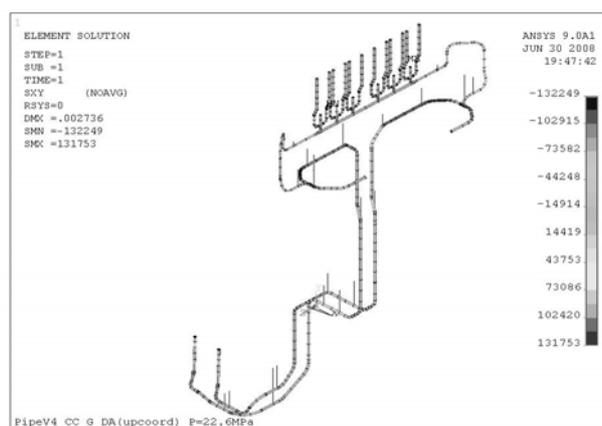


Рис. 6. Распределение сдвиговых напряжений, возникающих в стенке трубопровода от постоянного равномерного давления, равного 22,6 МПа: МХ – зона максимальных напряжений

Анализируя полученные расчетные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Характер изменения эквивалентных напряжений во всех исследуемых точках паропровода практически не зависит от координаты наблюдения. Это коррелирует с распределением статических напряжений от постоянного среднего давления в трубе, которые принимают постоянные значения практически во всех точках паропровода.

2. Спектр напряжений не демонстрирует каких-то особых частот и форм колебаний. Возможным объяснением этому может являться то, что эквивалентные напряжения вычисляются по сложной нелинейной формуле как комбинация составляющих тензора напряжений. В результате такой обработки информация об особенных формах колебаний может оказаться утерянной. Поэтому в дальнейшем рекомендуется проводить анализ спектра напряжений по отдельным компонентам тензора напряжений.

3. Среднее значение напряжений от заданного переменного давления составляет

33,15–33,93 МПа, в зависимости от точки наблюдения. Это согласуется с проведенным статическим расчетом.

4. Значение среднеквадратичного отклонения напряжений при заданном переменном давлении составляет 0,1435–0,1470 МПа, в зависимости от точки наблюдения.

Список литературы

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

2. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. Утв. ГТН РФ №50 от 25.08.1998 г. Введены в действие с 01.09.1999 г.

3. Самарин А.А. Вибрации трубопроводов энергетических установок и методы их устранения. – М.: Энергия, 1979.

4. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. – М.: Энергосервис, 2001.

5. Светлицкий В.А. Механика трубопроводов и шлангов. – М.: Машиностроение, 1982.

6. Ильгамов М.А., Мишин В.Н. Поперечные колебания трубы под действием бегущих волн в жидкости // Изв. АН. МТТ. – 1997. – № 1. – С.181–192.

7. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975.

Красновский Сергей Ярославович,
Ивановский государственный энергетический университет,
старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной механики,
телефон 45-35-28,
e-mail: tipm@tipm.ispu.ru