

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПАРОПРОВОДА ОСТРОГО ПАРА БЛОКА 800 МВт РЯЗАНСКОЙ ГРЭС В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

КРАСНОВСКИЙ С.Я., ст. преп.

Рассматривается принципиально новый подход к определению напряженно-деформированного состояния паропровода острого пара блока №6 мощностью 800 МВт Рязанской ГРЭС как первый этап оценки остаточного ресурса паропровода и разработки способов продления сроков эксплуатации.

Ключевые слова: паропровод острого пара, погрешность системы, модель паропровода, расчет напряжений, напряженно-деформированное состояние паропровода.

THE EVALUATION OF DIRECT STEAM PIPE MODE OF DEFORMATION OF 800 MW RYAZANSKAYA HPP UNIT IN NONSTEADY STATE

KRASNOVSKY S.Ya., instructor

The article concerns a new approach to evaluation of direct steam pipe mode of deformation of Ryazanskaya hydro power plant unit №6 800 MW as the first step to estimation of remaining steam pipe working life and the development of the ways of its operation life extension.

Key words: direct steam pipe, system uncertainty, steam pipe model, stress analysis, steam pipe mode of deformation.

Продление ресурса паропроводов стареющих ТЭС остается важной задачей для обслуживающего персонала станций. Однако, за исключением системы реперных указателей температурных перемещений паропровода, практических методов оценки его состояния, остаточного ресурса и методов повседневного контроля за влиянием режимных факторов на процесс старения паропровода нет.

Для решения задачи продления срока эксплуатации паропроводов необходимо разработать методы контроля за напряженно-деформированным состоянием паропровода в процессе эксплуатации. В качестве первого шага к решению проблемы проведены исследования по применению метода пространственного моделирования напряженно-деформированного состояния паропровода на основе данных о пространственных перемещениях конструкции паропровода в нестационарном режиме.

Достаточно обоснованных методик слежения за температурными деформациями паропроводов не существует. В качестве аналога можно принять РД 34.39.301-87.

В реальных условиях эксплуатации паропровода экспериментальное определение напряжений с целью оценки соответствия фактических напряжений проектным практически невозможно. В связи с этим такая оценка осуществляется косвенным путем. Считается, что компенсационные напряжения в паропроводе близки к проектным, если фактические перемещения паропровода при изменении температуры близки к проектным. С учетом этого «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей» (М.: Энергия, 1977) и «Правилами устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды» (М.: Недра, 1971) предусмотрен контроль за тепловыми перемещениями паропроводов.

Целью контроля за тепловыми перемещениями паропроводов является:

- оценка соответствия фактических тепловых перемещений паропроводов проектным;
- предупреждение и своевременное выявление заземлений паропроводов;
- оценка исправности системы крепления паропроводов;

– выявление изменений пространственного положения паропроводов вследствие нарушения режимов прогрева и расхолаживания (коробление оси паропровода, гидравлические удары).

Предварительный осмотр системы контроля деформаций паропровода на станции показал необходимость анализа объективности ее показаний. Существующая система контроля зависит от большого количества факторов, не учитываемых на практике. Она основана на применении трехкоординатных индикаторов, установленных на различные располагающиеся вокруг котлов конструкции. Для верификации показаний системы контроля температурных перемещений паропровода проводилась оценка возможной погрешности существующей системы, вызванной следующими недостатками:

- две координатные плоскости имеют отклонения от перпендикуляра, причем в некоторых случаях отклонения весьма значительны (m_n) (в среднем ошибка может достигать 8 мм);
- конструкции креплений индикаторов подвергаются деформациям как механическим, так и температурным (m_d) (в среднем ошибка может достигать 5 мм);
- штоки имеют значительные диаметры на накопниках, примерно 8 мм (m_s) (в среднем ошибка может достигать 4 мм);
- имеется разница в температурных перепадах креплений координатных плоскостей и штоков (m_t) (в среднем ошибка может достигать 3 мм);
- все элементы рассматриваемых конструкций имеют значительные люфты (m_l) (в среднем ошибка может достигать 5 мм);
- фиксация положений наконечников штоков, по которым определяют температурные перемещения, выполняется не на координатные плоскости, а на металлические без системы координат (m_m) (в среднем ошибка может достигать 4 мм);
- индикаторы, установленные в различных частях здания котельного отделения, не фиксированы в единой системе координат, а представляют собой основу для слежения перемещений отдельной точки без системной связи между собой ($m_{отд}$) (в дальнейшем планировалось исследовать данный источник ошибок, но для предварительного расчета приняли величину ошибки, сравнимую по своей величине с предыдущими, то есть 5 мм);

• наличие погрешности, образующейся в результате разницы перемещений колонн корпуса и конструкции котла ($m_{p.n.}$). Величину погрешности можно выявить проводя анализ наблюдений за осадками зданий и сооружений и деформациями хребтовых балок (в среднем погрешность может достигать 20 мм).

Приняв примерные величины возможных ошибок, можно определить вероятную величину средней ошибки по формуле

$$m_{\text{общ}} = \sqrt{m_{\text{п}}^2 + m_{\text{д}}^2 + m_{\text{д}}^2 + m_{\text{т}}^2 + m_{\text{п}}^2 + m_{\text{м}}^2 + m_{\text{отд}}^2 + m_{\text{р.п.}}^2} = \sqrt{8^2 + 5^2 + 4^2 + 3^2 + 5^2 + 4^2 + 5^2 + 20^2}.$$

В ориентировочном расчете с учетом всех этих условий получилось, что средняя квадратическая ошибка может составить $m_{\text{общ}} = \pm 24$ мм. В действительности проведенные измерения существенно изменили представление о величине возможной ошибки при существующем штатном способе слежения за перемещениями паропровода. Ошибка, вызываемая суммарными температурными перемещениями конструкций корпуса котла и паропровода, может достигать 20 см. Поскольку получить объективную картину перемещений реперных указателей паропровода при существующем способе невозможно, в дальнейшем применялась более точная методика оценки пространственных перемещений точек паропровода.

Проверка существующего способа показала, что полностью отказываться от штатной системы слежения на сегодняшний день не нужно. В дополнение к нему предложен способ исследования деформаций, позволяющий объективно оценить происходящие перемещения и в дальнейшем определить возможные величины поправок для внесения в данные, определяемые традиционным способом.

Для поверочного контроля штатной системы слежения за температурными перемещениями паропровода предлагается геодезический метод, основанный на определении полярных координат точек паропровода. Основное отличие предложенного метода заключается в определении перемещений точек паропровода в независимой системе координат, нулевая точка которой не связана с конструкциями котла, здания котельного отделения. Метод предполагает использовать теодолит и установленный на нем лазерный безотражательный дальномер.

Средством контроля за перемещениями паропроводов является индикатор перемещений. Он позволяет регистрировать и измерять пространственные перемещения паропровода относительно независимой точки пространства.

Анализ мест установки реперных индикаторов показал, что конструкции, на которые они установлены, не могут обеспечить неподвижность координатных плоскостей индикаторов при различных условиях эксплуатации. Более того, по повреждениям на «рубашке» паропровода были обнаружены перемещения, значительно отличающиеся от перемещений, получаемых на реперных индикаторах. Поэтому создание независимой системы координат стало главной задачей при выполнении начального этапа измерений (рис. 1).

За основной базис была принята линия на отметке 41 м. На концах этой линии установлены площадки 8, 9 для установки геодезического прибора. Оценка неподвижности базиса осуществляется путем его привязки к намеченным станциям 1, 2 на отметке 11 м. Их стабильность определяется относительно станции, намеченной на поверхности земли 0. Это позволит однозначно ответить на вопрос о перемеще-

ниях в пространстве основного базиса и необходимости его привязки к «земле». Смещения опорных знаков на отметке 11 м имели место, но величины этих смещений оказались минимальными. Эти перемещения были сравнимы с требованиями, предъявляемыми к точности при восстановлении станций основы (если станции снимались, перемещались и устанавливались в исходное положение вновь). При определении требований, предъявляемых к точности измерений, руководствовались кроме РД 34.39.301-87 СП 11-104-97 (Инженерно-геодезические изыскания для строительства. – М.: ГОССТРОЙ России, 1997) и СНиП 3.01.03-84 (Геодезические работы в строительстве. – М., 2001).

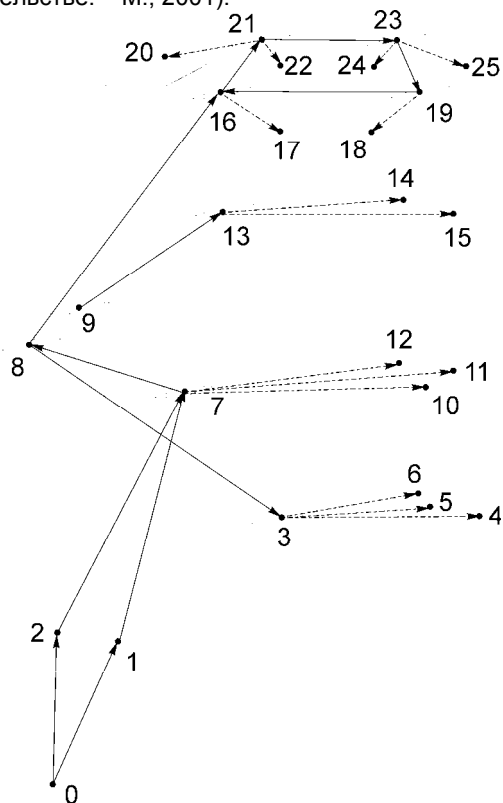


Рис. 1. Схема расположения точек измерения и базисов геодезической сети в котельном отделении блока №6 мощностью 800 МВт Рязанской ГРЭС

С базиса на отметке 41 м определены координаты точек на паропроводе. В средней части также определены координаты точек паропровода с дополнительных площадок 14, 15. Такая же дополнительная площадка 16 установлена на конструкциях лифтовой шахты на отметке 56 м. Координаты индикаторов, установленных на верхней части паропровода, определены с устроенных площадок 16, 21, 23, 19, которые образуют замкнутый теодолитный ход, состоящий из 4 углов и 4 сторон. В этой части системы возможна наибольшая погрешность при измерениях. В результате натурных работ была получена угловая невязка равная $0^{\circ}01'45''$, что является допустимой величиной погрешности измерений. По измеренным расстояниям получили относительную ошибку измерений $1/2080$. По результатам решения замкнутого теодолитного хода линейная невязка составила $1/3041$. Максимальная погрешность, с которой были определены начальные координаты индикаторов, установленных на верхней части паропровода, составила ± 14 мм [4, 9].

Оценка измерений на разогретом паропроводе показала, что они были выполнены с ещё большей точностью. Относительная ошибка линейной невязки соста-

вила 1/4655. Максимальная погрешность, с которой нами определены координаты реперных индикаторов верхней части паропровода, составила ± 9 мм.

Полученные погрешности являются допустимыми по требованиям СНиПа на проведение инженерных изысканий. Анализ результатов на данном этапе показал, что имеются возможности значительного повышения точности производимых измерений за счет развития постоянной геодезической сети в котельном отделении. Расчеты показывают, что все эти меры позволят повысить точность производимых измерений минимум в 2 раза.

Для производства работ были использованы следующие приборы:

- теодолит ЗТ2КП точностью 2";
- теодолит Theo 010B точностью 1";
- лазерный дальномер точностью $\pm 1,5$ мм;
- переходник дальномера к теодолиту;
- специальные визирные цели (2 шт.);
- отражающие пластины к дальномеру;
- треггеры к теодолитам (10 шт.).

Сложность подбора приборов состояла в том, что повторные измерения производились при сложных температурных условиях. Температура в верхней части котельного отделения составляет $+57^{\circ}$ – $+64^{\circ}\text{C}$. В таких условиях возможно использование только оптических приборов. К сожалению, последние модели тахеометров, уже имеющих функцию безотражательного дальномера, могут отказаться, поскольку их техническими характеристиками предусмотрен верхний предел температуры окружающего воздуха $+40^{\circ}\text{C}$. Используемый лазерный дальномер может выдерживать температуры, достигающие $+70^{\circ}\text{C}$.

Для повышения точности работ произведена модернизация комплекта визирных целей, которая позволила значительно уменьшить ошибки. Она заключается в оборудовании визирных целей вращающимися центральными пластинами в двойном подвесе, что позволило поворачивать визирную цель к зрительной трубе теодолита при визировании с большими вертикальными углами.

На рис. 2 представлена схема проведения измерений по отношению к некоторой точке паропровода.

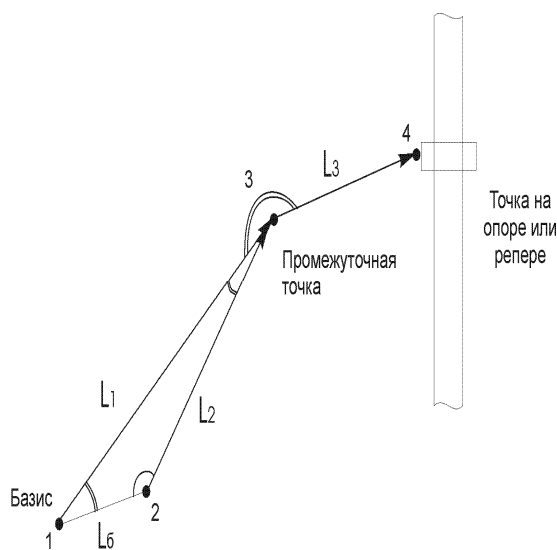


Рис. 2. Схема замеров расстояний и пространственных углов положения на точку паропровода

Зная расстояние между точками базиса L_6 и вертикальный и горизонтальный углы, с точки 2 на точку 1 ориентируем нивелир на промежуточную точку 3. В результате получаем расстояние L_2 и углы с точки 2 на точку 3. Решение образовавшегося пространственного треугольника дает относительные пространственные координаты точки 3. Перенеся нивелир в точку 3, пространственный угол и расстояния L_1 и L_2 перепроверяются наведением на точки 1 и 2 базиса, а затем наведением на точку 4 паропровода определяются углы и расстояние L_3 . Для оценки точности положение точки 4 измеряется относительно точек базиса 1 и 2 поочередно, другими словами, пространственные атрибуты точки 4 включают показания дальномера, вертикальный и горизонтальный углы на точку базиса 1, вертикальный и горизонтальный углы на точку базиса 2. Такой метод дает достаточно точные результаты, позволяет оценить погрешность измерений, исключить влияние невязки приборов на измерения, оценить методику и дать рекомендации по ее дальнейшему применению.

Независимая система координат, в которой выполнено определение параметров изменения геометрии паропровода, назначается единой относительно начального базиса. Намеченный базис был проверен на предмет его стабильного положения при различных температурных условиях. Оказалось, что его пространственное положение при нестационарных режимах изменяется, поэтому все полученные координаты измеряемых точек были пересчитаны относительно базиса, имеющего непосредственную связь с «землей». Это позволило определить перемещения каждого индикатора относительно общей системы, что ранее установить было невозможно.

Расчет перемещений базовых точек геодезической сети котельного отделения, имеющих непосредственный контакт с конструкциями котла, позволил отследить фактор, который ранее вообще не принимался во внимание и практически никак не определялся. Речь идет о перемещении самих конструкций корпуса котла. Результаты расчета (табл. 1) показали, что эти перемещения существенны. Это означает, что оценивать перемещения паропровода необходимо во всей системе сооружения котельного цеха. Особенно эти перемещения проявили себя по оси Y, что было замечено даже визуально по повреждениям на теплоизоляционной «рубашке» паропровода.

Предложенная методика измерений на практике показала, что ее использование дает весьма достоверный результат при решении задачи определения влияния различных режимов работы блока на напряженно-деформированное состояние паропровода. Более того, результаты выполненных измерений доказывают возможность систематического слежения за перемещениями паропровода с использованием стационарной геодезической сети и независимой от конструкций котельного отделения системы координат.

В табл. 1 приведены результаты измерений перемещений доступных точек паропровода и базовых площадок геодезической сети в соответствии с позициями, обозначенными на рис. 1. Для измеряемых точек приведены координаты в холодном и горячем состоянии паропровода, результирующее перемещение по осям X, Y и Z.

Анализ данных, полученных при нивелировании точек паропровода в нестационарном режиме, зависимость их пространственного поведения при переходе блока из расхоложенного состояния в горячее определили алгоритм исследования напряженно-деформированного состояния паропровода методом пространственного моделирования.

Таблица 1. Сводная таблица перемещений координат точек паропровода и промежуточных станций геодезической сети котельного отделения блока №6 в холодном и горячем состояниях

№ индикатора	Наименование индикатора	Фактическое перемещение (мм) вдоль осей								
		X			Y			Z		
		Координата		Перемещение (мм)	Координата		Перемещение (мм)	Координата		Перемещение (мм)
		Хол. (мм)	Горяч. (мм)		Хол. (мм)	Горяч. (мм)		Хол. (мм)	Горяч. (мм)	
0	Земля	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	Репер1	+14128	+14131	+3	+9684	+9684	0	+11425	+11428	+2
3	Ст. 4	+36437	+36359	-78	+16785	+17043	+258	+30405	+30420	+15
4	Ин.низ.3 - б	+38730	+38414	-316	+29680	+29984	+304	+30405	+30490	+85
5	Ин.низ.2 - б	+38205	+37880	-325	+27495	+27835	+340	+30536	+30498	-38
6	Ин.низ.1 - б	+38406	+38087	-319	+26907	+27246	+339	+30529	+30491	-38
7	Ст.3	+37912	+37928	+16	+8821	+9092	+271	+37758	+37779	+21
8	Ст.1	+21246	+21292	+46	+5806	+5884	+78	+42489	+42492	
9	Ст.2	+30923	+30976	+53	+5806	+5904	+98	+42832	+42838	+6
10	Ин. 2	+38920	+38645	-275	+29689	+29924	+235	+42724	+42735	+11
11	Ин. 1	+38427	+38152	-275	+27356	+27684	+328	+41898	+41873	-25
12	Ин. 0	+38844	+38585	-259	+26648	+26978	+330	+42641	+42657	+16
13	Ст. 5	+38096	+38120	+24	+8945	+9142	+197	+58443	+58460	+17
14	Ин. опора 1	+39117	+39030	-87	+23565	+23828	+263	+59367	+59403	+36
15	Ин опора 2	+39123	+38934	-189	+33107	+33941	+834	+59138	+59207	+69
16	Ст. 6	+37986	+37987	+1	+8845	+9113	+268	+64197	+64198	+1
17	Индик 2	+31727	+31714	-13	+13474	+13597	+123	+61201	+61196	-5
18	Индик. 1	+32468	+32133	-333	+44711	+45018	+307	+61273	+61345	+72
19	Ст. 9	+41222	+40781	-441	+48059	+48393	+334	+64495	+64571	+76
20	Индик. 14	+34517	+34541	+24	+7822	+7899	+77	+67450	+67477	+27
21	Ст. 7	+37748	+37670	-78	+16468	+16796	+328	+69722	+69780	+58
22	Индик. 12	+39765	+39726	-39	+14159	+14440	+281	+66033	+66079	+46
23	Ст. 8	+38534	+38178	-356	+41017	+41359	+342	+69254	+69319	+65
24	Индик. 11	+40346	+39990	-356	+43607	+44027	+420	+66016	+66066	+50
25	Индик. 13	+35705	+35305	-400	+50225	+50653	+428	+67462	+67516	+54

Принципиальное отличие алгоритма верификации напряженно-деформированного состояния паропровода заключается в оценке дополнительных напряжений, вызванных нестабильным положением в пространстве точек паропровода на выходе из котла.

Было замечено, что перемещение конструкции котла (колонн хребтовых балок, площадок перекрытий) носит ярко выраженный режимный характер. В свою очередь, перемещения площадок вносят существенную погрешность в показания штатной системы реперных указателей.

При построении модели паропровода в программе ANSYS использовались следующие элементы [1]:

1. «Упругая прямая труба».

Упругая прямая труба является элементом модели, подобным стержню или балке с поддержкой расчета на растяжение/сжатие, изгиб и кручение. Элемент имеет шесть степеней свободы в каждом из двух узлов: перемещения в направлении осей X, Y и Z и вращения вокруг осей X, Y и Z. Геометрия, расположение узлов и система координат показаны на рис. 3.

Исходные данные элемента включают: два узла; диаметр трубы и толщину стенки; коэффициенты концентрации напряжений и гибкости; площадь поверхности, покрытую изоляцией; массу стенок тру-

бы; массовые характеристики изоляции; осевую жесткость трубы; динамическую жесткость на кручение; свойства изотропного материала и его температуру. Масса элемента автоматически вычисляется на основе массы стенок трубы, массы изоляции и протекающего потока. Осевое напряжение учитывает эффект внутреннего давления.

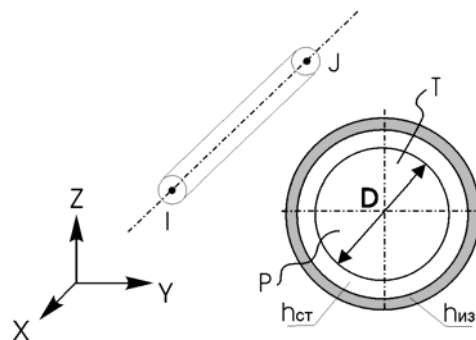


Рис. 3. Схема элемента «Упругая прямая труба»

2. «Упругий тройник».

Элемент является комбинацией трех одноосевых упругих трубчатых элементов (рис. 4), объединенных в конфигурацию тройника с поддержкой расчета на растяжение/сжатие, изгиб и кручение.

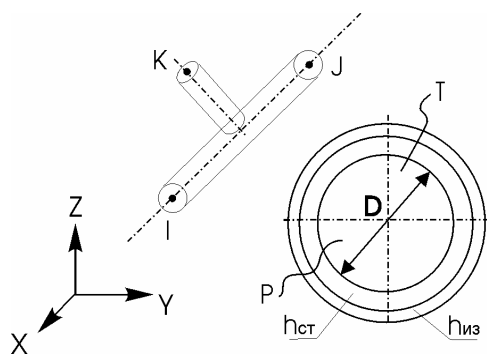


Рис. 4. Схема элемента «Упругий тройник»

Элемент имеет шесть степеней свободы в каждом из трех узлов: перемещения в направлении осей X, Y и Z и вращения вокруг осей X, Y и Z. Для расчета гибкости тройника имеются специальные опции для указания диаметров сочленяемых труб. В остальном исходные данные элемента полностью соответствуют исходным данным элемента «Упругая прямая труба».

3. «Упругая искривленная труба (колени)».

Элемент является изогнутым по дуге окружности одноосным аналогом элемента «Упругая прямая труба» с поддержкой расчета на растяжение/сжатие, изгиб и кручение. Элемент имеет шесть степеней свободы в каждом из трех узлов: перемещения в направлении осей X, Y и Z и вращения вокруг осей X, Y и Z. Геометрия, расположение узлов и система координат показаны на рис. 5. Для расчета гибкости колена имеются специальные опции для указания радиуса кривизны. Несмотря на то, что элемент изогнутой трубы имеет только две конечные точки I и J, третий узел K определяет плоскость, в которой находится элемент.

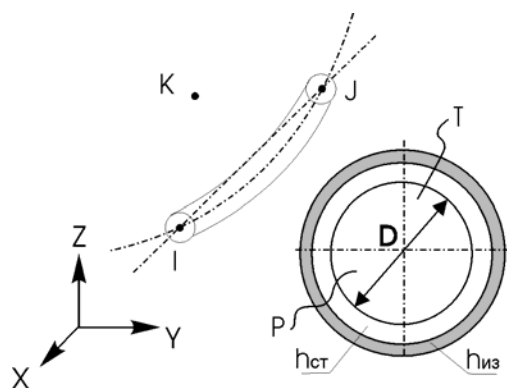


Рис. 5. Схема элемента «Упругая искривленная труба (колени)»

4. «Пружинный амортизатор».

Элемент имеет продольные свойства и возможность привязки к точке контакта с основным объектом (рис. 6). Это позволяет использовать его в решении трехмерных задач. Элементу может быть присвоена определенная жесткость K. Одна из точек элемента может быть зафиксирована в пространстве (точка крепления пружинного подвеса), а вторая перемещается в трех координатах X, Y и Z вместе с точкой привязки к основному объекту (паропроводу). Элемент может быть ограничен в перемещениях по любой из осей и обладать нулевой жесткостью, что

позволяет на его основе вводить параметры скользящих опор, жестких заделок и пр.

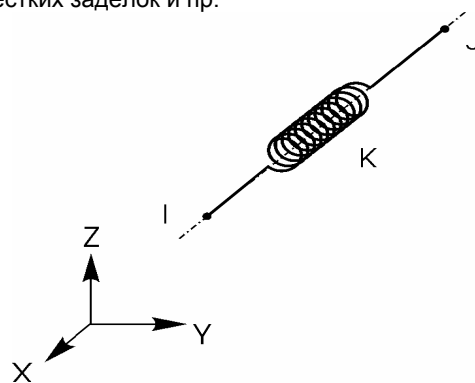


Рис. 6. Схема элемента «Пружинный амортизатор (упругий демпфер)»

Используя стандартные элементы программы и присваивая им атрибуты реального паропровода методом последовательного наращивания количества элементов, можно построить исходную модель паропровода и имитировать условия закрепления, соответствующие реальным. Принципиальная схема построения модели паропровода приведена на рис. 7.

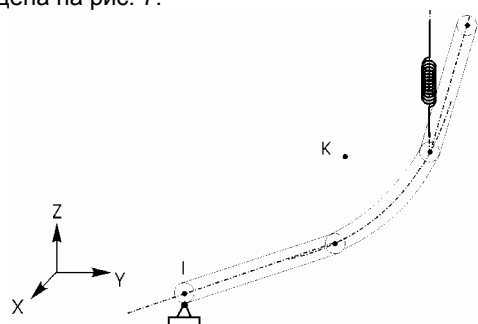


Рис. 7. Принципиальная схема построения модели паропровода

Построение модели паропровода проводилось по монтажным чертежам с учетом разбиения укрупненных деталей заводской поставки на отдельные составляющие участки. Учитывались радиусы гибов, длины монтажных участков, переходы.

Построение модели первоначально велось в координатах монтажного чертежа методом пошагового приращения координат последующего элемента к координатам конца предыдущего элемента. Для уменьшения погрешности при дальнейших расчетах монтажные детали паропровода протяженностью более 2000 мм разбивались дополнительно на более мелкие элементы программы. Эта операция оправдана тем, что программа расчета ANSYS пошагово разбивает отдельные фрагменты модели на конечные элементы и укрупненные узлы паропровода автоматически были бы разбиты на более крупные конечные элементы. Это могло привести к увеличению погрешности расчетов на первом этапе моделирования. Решение вводных задач показало, что оптимальная разбивка деталей модели на конечные элементы достаточно равного объема возможна при размере элемента модели, соответствующем размеру чертежной детали протяженностью не более 2000 мм по любой из координат.

Построенная ось модели в координатах монтажного чертежа приводилась к системе координат натуральных измерений, полученных в результате нивелирования, следующим образом. Координаты по высоте опор №6 и №22 паропровода блока №6 указаны на монтажном чертеже:

$Z = +43200$ мм для обеих опор; по натурным измерениям в холодном состоянии для опоры №6 $Z = +42641$, для опоры №22 $Z = +42724$. Среднее значение измеренных координат $Z_{ср}$ сравнивалось с координатой чертежа, и полученная разница учитывалась как поправка ΔZ для всех базовых точек оси модели скорректированы на полученную величину.

$$Z_{ср} = \frac{42641 + 42724}{2} = 42682,5$$

$$\Delta Z = 43200 - 42682,5 = 517,5$$

Построенная модель паропровода была подвергнута дальнейшей оптимизации в целях получения адекватной программной модели. Методом автоматизированной оптимизации первоначальная модель разбита на дополнительные участки и представляет собой единый массив из 496 элементов, каждый из которых является конструктивным элементом программы. Совокупность этих элементов составляет законченную исходную модель паропровода.

С этого момента формирование модели по монтажному чертежу считается законченным и приведенным к координатам, в которых проводились первоначальные геодезические измерения точек паропровода. Элементам модели присваивались геометрические характеристики реальной трубы паропровода, описывались свойства материала, из которого сделана труба, массовые характеристики, свойства и толщина слоя изоляции, что позволило приступить к расчетам с учетом свойств материала трубы и перейти к режиму трехмерной визуализации.

В программу вводились параметры пружинных подвесок в соответствии с проектными чертежами, конструкцией, жесткостями, высотой подвесов, координатами точек крепления опор. По чертежам конструкций подвесок и указанным в спецификации жесткостям определялись суммарные параметры пружинных блоков. Для каждой пружинной опоры вводились степени свободы и высота подвеса. Для скользящих опор указывались координаты ограничения степени свободы в точках опор.

В результате была получена объемная модель паропровода, которая соответствовала холодному состоянию конструкции паропровода, построенной по монтажным чертежам с введенными характеристиками пространственного закрепления. Для пружинных опор применены условия закрепления верхней части подвесов, запрещающие перемещение в пространстве, но не исключающие свободных углов поворота относительно вертикальной оси в любой плоскости.

На следующем этапе расчета вводились параметры протекающей среды и условий горячего состояния. К модели применяются параметры действующего паропровода в рабочем состоянии и моделируется процесс деформации паропровода в горячем состоянии при устоявшемся температурном режиме. Величины дополнительных параметров соответствуют режиму работы блока №6 в период проведения измерений перемещений точек паропровода. Данные о режиме работы блока, связанные с состоянием паропровода в период производимых измерений, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры блока №6 во время измерений: 19/08/05 11:00 – 19/08/05 19:00

Время	1	2	3	4	5	6	7
11-00	643.3	207.9	204.2	1055	1277	544.0	541.6
12-00	477.7	160.3	157.8	918	1093	544.2	541.6
13-00	406.2	134.1	131.2	846	1030	547.2	541.6
14-00	523.8	170.6	167.4	955	1163	544.8	541.6
15-00	411.9	136.8	134.2	853	1037	542.6	541.6
16-00	407.3	134.4	131.9	846	1028	542.5	541.6
17-00	406.4	134.1	131.4	845	1026	543.6	541.6
18-00	404.9	133.6	131.0	842	1025	544.0	541.6
19-00	405.9	133.2	130.3	843	1022	544.4	541.6

Примечание:

1. Активная мощность генератора, [МВт]
2. Давление острого пара на выходе из котла (нитка А), [кгс/см²]
3. Давление острого пара на выходе из котла (нитка Б), [кгс/см²]
4. Расход острого пара (нитка А), [т/ч]
5. Расход острого пара (нитка Б), [т/ч]
6. Температура острого пара за пусковым впрыском (нитка А), [град]
7. Температура острого пара за пусковым впрыском (нитка Б), [град]

Для расчета действия внутренних усилий и весовых нагрузок среды использованы исходные параметры: плотность пара в паропроводе – 40,79 кг/м³; температура стенки паропровода – 545 °С / 818 К; давление в паропроводе – 14000000 Па.

Расчет напряженного состояния и соответствующих ему перемещений первоначально предполагалось вести исходя из условий закрепления. На стадии разработки методики оценки напряженного состояния с учетом перемещений предполагалось, что паропровод безусловно имеет два обязательных граничных условия:

- незначительные перемещения на выходе из котла, соответствующие условиям жесткой заделки;
- жесткое закрепление на входе в турбину, где перемещения в точке входа в турбину можно пренебречь.

Предполагалось, что картина напряженного состояния паропровода при переходе из холодного в некоторое установившееся горячее состояние, соответствующее режиму работы блока, будет складываться из распределения полей напряженного состояния под действием температурного расширения материала паропровода, веса пара, проходящего через паропровод в данный момент времени, и деформации в пружинных опорах. В процессе нивелирования паропровода было определено, что алгоритм расчета требует глубокой коррекции по условиям закрепления. Обработка данных нивелирования показала нестабильность положения котла, здания котельного отделения и площадок котельного отделения в пространстве. В табл. 3 приведены изменения координат реперных точек на выходе из котла по трем координатам. Последующие повторные геодезические измерения показали определенную зависимость положения конструкций котла от мощности блока и повторяемость результатов измерения.

Для дальнейшей работы с моделью следовало учесть значительные перемещения в точках выхода паропровода из котла и, изменив алгоритм расчета напряженного состояния, ввести в расчет дополнительные перемещения в этих точках. Узлам модели, соответствующим точкам выхода из котла, вместо условий жесткого закрепления были присвоены атрибуты узла модели, имеющей все шесть степеней свободы. Тем самым имитировано действие сил, заставляющих эти точки перемещаться вместе с конструкцией котла. Поэтому напряженное состояние паропровода в зависимости от давления и температуры вычислялось с учетом заданного перемещения точек на выходе из котла в пространстве по трем координатам, со-

ответствующим перемещениям реперных указателей паропровода на выходе из котла.

Таблица 3. Приращения координат в точках реперных указателей на выходе из котла

Приращение по X	Приращение по Y	Приращение по Z	Примечания
-13	+123	-5	Репер на выходе из котла, нитка Б
-353	+307	+72	Репер на выходе из котла, нитка А

Для оценки влияния перемещений на выходе из котла на общую картину напряженно-деформированного состояния паропровода первый этап моделирования был проведен без их учета.

На следующем этапе был произведен расчет напряжений, вызванных вынужденными перемещениями точек паропровода на выходе из котла. Это позволило количественно определить, какую долю напряжений такой вид деформации вносит в общую картину напряженного состояния паропровода, и оценить зоны максимальных напряжений. Точкам входа в турбину были присвоены атрибуты, соответствующие жесткой заделке. Параметры опор паропровода были оставлены без изменения. Температура, давление и вес среды (перегретого пара), размеры и плотность изоляции соответствуют предыдущему этапу расчета.

Результаты моделирования показали, что дополнительные деформации, вызванные изменением пространственного положения котла в горячем состоянии, существенно влияют на напряженное состояние паропровода. Кроме того, по максимальным значениям они превышают результаты расчетов, произведенных с учетом только температуры и давления в паропроводе как основных факторов напряженно-деформированного состояния.

Следует отметить, что картина распределения напряжений по длине паропровода получилась более равномерной по сравнению с результатами предыдущего этапа. Однако значительные перемещения в верхней части паропровода и высокое максимальное значение напряжений говорят о том, что исследуемый фактор существенно влияет на общую картину напряженно-деформированного состояния паропровода.

Заключительный этап моделирования проводился с учетом совместного воздействия на модель паропровода факторов, независимое действие которых исследовалось в двух предыдущих этапах.

Для точек модели, соответствующих входу паропровода в турбину, были сохранены условия жесткой заделки, параметры опор оставлены без изменений, указаны перемещения на выходе из котла. Введены параметры давления, температуры, веса среды и изоляции. В результате расчетов было получено графическое изображение модели с отображаемой информацией о напряженно-деформированном состоянии паропровода.

Напряженно-деформированное состояние паропровода в нестационарном режиме под воздействием всех совместно действующих исследуемых факторов приведено на рис. 8.

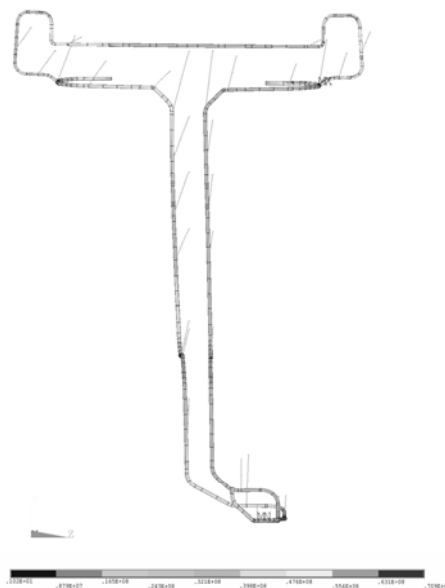


Рис. 8. Схема трехмерной напряженно-деформированной модели паропровода

Следует отметить, что координаты большинства исследуемых точек паропровода по результатам моделирования совпадают по направлению перемещений с результатами натуральных измерений. Вместе с тем абсолютного совпадения в координатах точек не наблюдалось. Наибольшее несоответствие в точке Индик. 13 (табл. 1) по координате Z составляет 190 мм. Это может объясняться рядом причин:

- возможным несоответствием монтажного чертежа реальному паропроводу, которое на действующем объекте выявить не удалось;

- изменением геометрии реального паропровода в период эксплуатации за счет нарастания деформаций вследствие ползучести [3];

- естественным локальным ухудшением упругих свойств объекта из-за изменений структуры материала паропровода [3];

- отклонением от заданных упругих свойств подвешенной системы в период длительной эксплуатации (один из способов локализации дефектов подвешенной системы паропровода) [2];

- разницей между численным решением модели для данной точки, находящейся по условиям описания элементов модели на осевой линии паропровода, и проводимыми натурными измерениями, где точка наносится на видимые участки находящиеся в прямом контакте элементов: опоры, штанги реперов, приваренные объекты. Например, точки для визуальных натуральных измерений на штангах реперов располагаются на расстоянии 600–900 мм от центра трубы;

- углом поворота большинства точек модели около $\varphi = 0,3E-02$ радиан относительно осевой линии элемента модели, что на каждый метр удаления точки натурального измерения от центра трубы паропровода дает дополнительное перемещение в пространстве на 17 мм;

- погрешностью не более 3%, с которой программа ANSYS при решении сложных геометрических моделей большой протяженности определяет напряженное состояние элементов, что после решения сравнительной аналитической задачи соответствует возможному отклонению в расчете перемещений на 19 мм на каждые 10 м паропровода [1].

Далее анализировались результаты расчетов напряженного состояния паропровода по данным моделирования. Номинальные допускаемые напряжения для стали паропровода марки 15X1M1Ф при эксплуатационной температуре 545 °С составляют $\sigma_{доп} = 0,87E+08$ МПа [5]. Шкала напряженного состояния паропровода без учета перемещений на выходе из котла под действием температуры и давления имеет максимальное значение $\sigma_{P,t} = 0,289E+08$ МПа. При сравнении с допускаемыми напряжениями явно заметен коэффициент запаса, равный 3 [5]. Однако, при оценке напряженного состояния паропровода в зависимости от перемещений на выходе из котла, по полученным значениям расчетов было установлено, что максимальное напряжение должно возрасти еще на $\sigma_{пер} = 0,420E+08$ МПа. На паропроводе появляются участки с напряжениями, равными $\sigma_{общ} = 0,709E+08$ МПа (рис. 8). По напряженному состоянию эти участки довольно близки к допускаемым напряжениям для используемого материала. Очевидно, наибольшие остаточные изменения в геометрии участков паропровода и структуре материала соответствуют именно этим зонам, что планируется исследовать для верификации предложенного метода моделирования.

Заключение

В рамках общей постановки задачи, отличающейся принципиальной новизной и практической актуальностью как по методам, так и по средствам решения проблемы живучести ТЭС, выполнены следующие работы:

– завершена метрология и обработка полученных геодезическим методом данных статических температурных деформаций при нестационарном режиме работы блока №6;

– проведена оценка состоятельности геодезического метода для верификации основных параметров деформированного нестационарного состояния паропроводов ТЭС в условиях котельного отделения и ограниченного доступа к объекту исследования;

– разработан алгоритм определения напряженно-деформированного состояния паропровода методом моделирования;

– получены и оценены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния паропровода методом конечных элементов с построением пространственных трехмерных моделей распределения напряженного и перемещенного состояния по паропроводу.

Список литературы

1. **ANSYS**: Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
2. **Детяшев Б.Д.** Повышение живучести паропроводов ТЭС на основе совершенствования опорно-подвесной системы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2000. – 20 с.
3. **Живучесть** паропроводов стареющих тепловых станций / Ю.Л. Израилев, А.Я. Копсов, Ф.А. Хромченко и др. – М.: Изд. Торус пресс, 2002. – 616 с.
4. **Инженерно-геодезические изыскания для строительства**: Нормативная документация СП 11-104-97, ГОССТРОЙ России. – М., 1997.
5. **Нормы** расчета элементов паровых котлов на прочность, 1965 г.
6. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей. – М.: Энергия, 1977.
7. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. – М.: Недра, 1971.
8. **Рабочий документ** РД 34.39.301-87.
9. **СНИП 3.01.03-84** Геодезические работы в строительстве. – М., 2001.