

Содержание

| | |
|---|-----------|
| Общие положения..... | 3 |
| 1. Расчет трубопроводных систем комплексов холодоснабжения АЭС “Куданкулам” при действии статических, сейсмических и ударно-волновых нагрузок..... | 4 |
| 2. Трубопроводная система ГКС газопровода “Сахалин-Хабаровск-Владивосток”. Расчеты по Нормам ПНАЭ Г-7-002–86 (2008-2009 гг.)..... | 18 |
| 3. Опыт применения ПК АСТРА-АЭС'2009 в практике проектных расчетов трубопроводных систем АЭУ (ОАО “Атомэнергопроект”, 2001-2009 гг.)..... | 35 |
| 4. Высокотемпературные трубопроводные системы (ОКБ “Гидропресс”, 2002-2009 гг.)..... | 53 |
| 5. Разветвленная трубопроводная система (Киевский “Энергопроект”)..... | 64 |
| 6. Разветвленный трубопровод, трубная решетка (Подольский машзавод, 2008 г.) ... | 69 |
| Литература..... | 75 |

Общие положения

Настоящее Приложение 3 (том 4) – незапланированный “ребенок”, ставший одним из равно необходимых в семье документов, составляющих “АСТРА-АЭС'2009. Верификационный отчет”.

Действительно, именно на проектируемых-эксплуатируемых трубопроводных системах большой размерности и на нетривиальных задачах можно и должно показать реальные возможности конкретного “промышленного” программного комплекса и прогресс в численном моделировании вообще.

Приведенные примеры моделирования весьма сложных (пространственных разветвленных, протяженных, с включением оборудования и опорных конструкций) трубопроводных систем позволяют также развеять миф о недостижимом в проектно-конструкторской организации уровне требований к квалификации пользователей.

И, кроме того (для нас, ценителей прекрасного, прежде всего), это красиво.

Авторы отчета выражают искреннюю благодарность специалистам ОАО “Атомэнергопроект”, ОАО “ОКБ Гидропресс”, ПКФ “Росэнергоатом”, ЗАО “Сельэнергопроект”, ОАО “Киевский Энергопроект”, ОАО “Харьковский Энергопроект”, ОАО ЗИОМАР, ОАО “Подольский машзавод” и других организаций-пользователей АСТРА-АЭС за многолетнее плодотворное сотрудничество и предоставленные ценные материалы.

1. Расчет трубопроводных систем комплексов холодоснабжения АЭС “Куданкулам” при действии статических, сейсмических и ударно-волновых нагрузок

1.1 Описание объекта и задач расчетных исследований

Расчетные исследования проводились (ЗАО НИЦ СтаДиО, 2003 г.) в обоснование прочности трубопроводов и для определения нагрузок на опорные строительные конструкции и на патрубки оборудования комплексов холодоснабжения *неответственных* и *ответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”.

В состав проекта (единой модели) входят:

- контур холодной воды, включающий в себя трубопроводы от потребителей, насосы теплой воды, испаритель, насосы холодной воды потребителей и трубопроводы к потребителям до неподвижной опоры на стене здания;
- контур морской воды, включающий в себя конденсатор и трубопроводы, подводящие и отводящие морскую воду до неподвижных опор на стене здания;
- промсосуд (экономайзер), компрессор и трубопроводы их обвязки.

Из перечня разделов, который включает в себя поверочный расчет низкотемпературного трубопровода АЭУ в соответствии с [1], были выполнены:

- 1) расчет на статическую прочность;
- 2) расчет на циклическую прочность;
- 3) расчёт на сейсмические воздействия уровней ПЗ и МРЗ, заданные трехкомпонентными спектрами ответа (рис.1.1 – 1.2);
- 4) расчет на воздействие ВУВ, заданное спектрами ответа (рис. 1.2).

1.2 Расчетные модели

Построенные в ПК АСТРА-АЭС расчетные суперэлементные модели пространственных разветвленных трубопроводных систем, показанные на рис. 1.3 – 1.4, детально учитывают совместную статическую и динамическую работу опорных конструкций (сечение некольцевое), оборудования и трубопроводов.

Основные количественные параметры моделей:

- трубопроводной системы комплекса холодоснабжения *неответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”
 - узлов стыковки суперэлементов – 383;
 - участков (суперэлементов) – 501;
 - динамических степеней свободы (масс) – 3030;
- трубопроводной системы комплекса холодоснабжения *ответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”
 - узлов стыковки суперэлементов – 104;
 - участков (суперэлементов) – 141;
 - динамических степеней свободы (масс) – 1995.

1.3 Результаты расчетов

Некоторые результаты расчетных исследований НДС и прочности – относительные напряжения (отношения расчетных приведенных к допускаемым) различных групп и собственные формы колебаний – представлены на рис. 1.5 – 1.12. Для модели ТС *неответственных* потребителей определены блочным методом Ланцоша и учтены в сейсмических расчетах все значимые частоты (в диапазоне от 0 до 50 Гц) и формы собственных колебаний (см. таблицу 1.1), модели ТС *ответственных* потребителей – 275 сейсмически значимых собственных частот (в диапазоне до 200 Гц) и форм колебаний.

1.4 Выводы и рекомендации

1.4.1 Выполненные расчетные исследования показали, что трубопроводы комплекса холодоснабжения *неответственных* потребителей АЭС “Куданкулам” удовлетворяют нормативным критериям статической, сейсмической и циклической прочности при выбранной компоновке трубопроводов и оборудования, расстановке и типе опор.

Расчетные нагрузки на неподвижные, скользящие и скользящие направляющие опоры от статических и сейсмических нагрузок не превышают допускаемых.

Определены также расчетные нагрузки (силы и моменты) на патрубки оборудования и на опорные конструкции оборудования, необходимые для проектирования и оценки прочности оборудования и строительных конструкций.

1.4.2 Для ТС *ответственных* потребителей анализ полученных результатов показал высокую подвижность применяемой рамной конструкции для значимых частот и, как следствие, высокий уровень напряжений в элементах трубопроводов и значительные нагрузки на патрубки.

Для обеспечения прочности трубопроводной системы без изменения опорной рамной конструкции были расставлены скользящие направляющие опоры, а для снижения напряжений в тройниках последние были заменены на толстостенные штампованные тройники высокого давления соответствующих диаметров. Также была заменена труба 219х6 на трубу 219х9 на участке 44-80.

Трубопроводы комплекса холодоснабжения *ответственных* потребителей АЭС “Куданкулам” удовлетворяют нормативным условиям сейсмостойкости при исходной расстановке и типе опор, а также замене используемых тройников на тройники штампованные высокого давления и замене трубы 219х6 на 219х9.

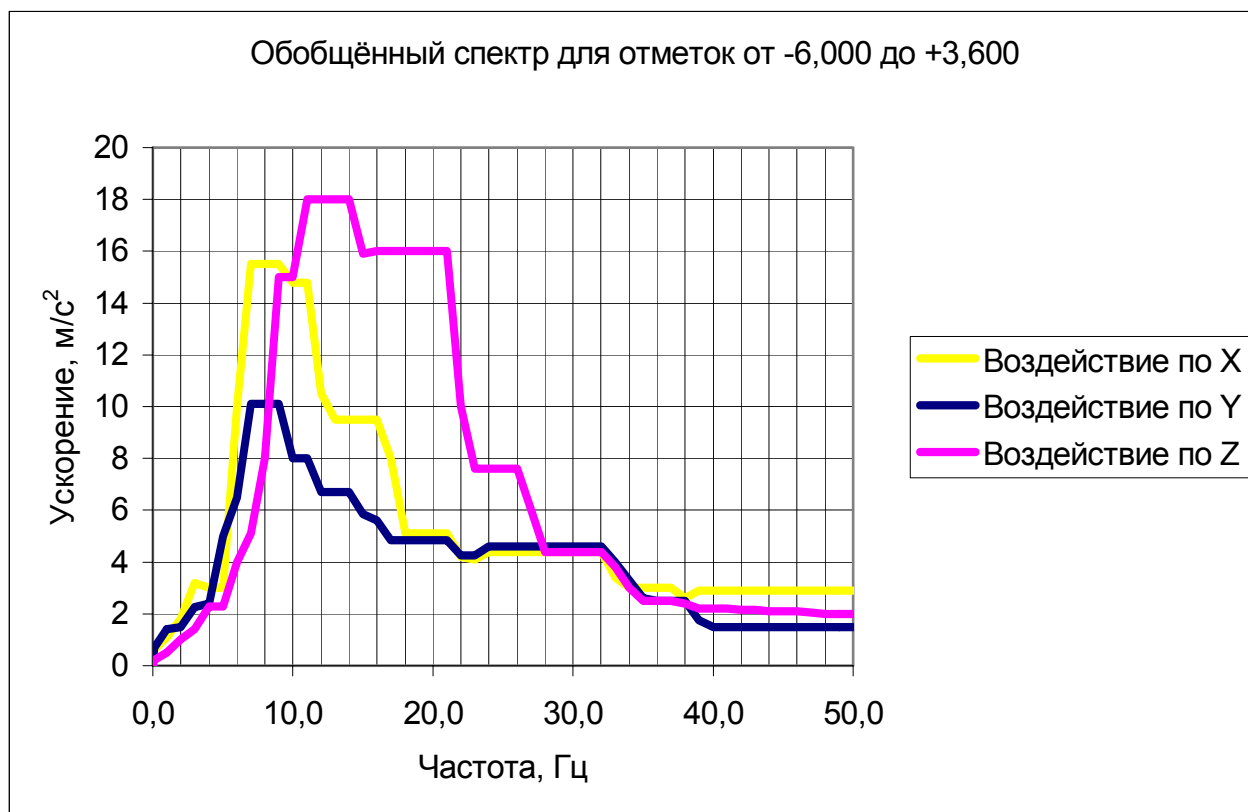


Рис. 1.1 Расчетные сейсмические спектры ответа для трубопроводной системы комплекса холодоснабжения *неответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”

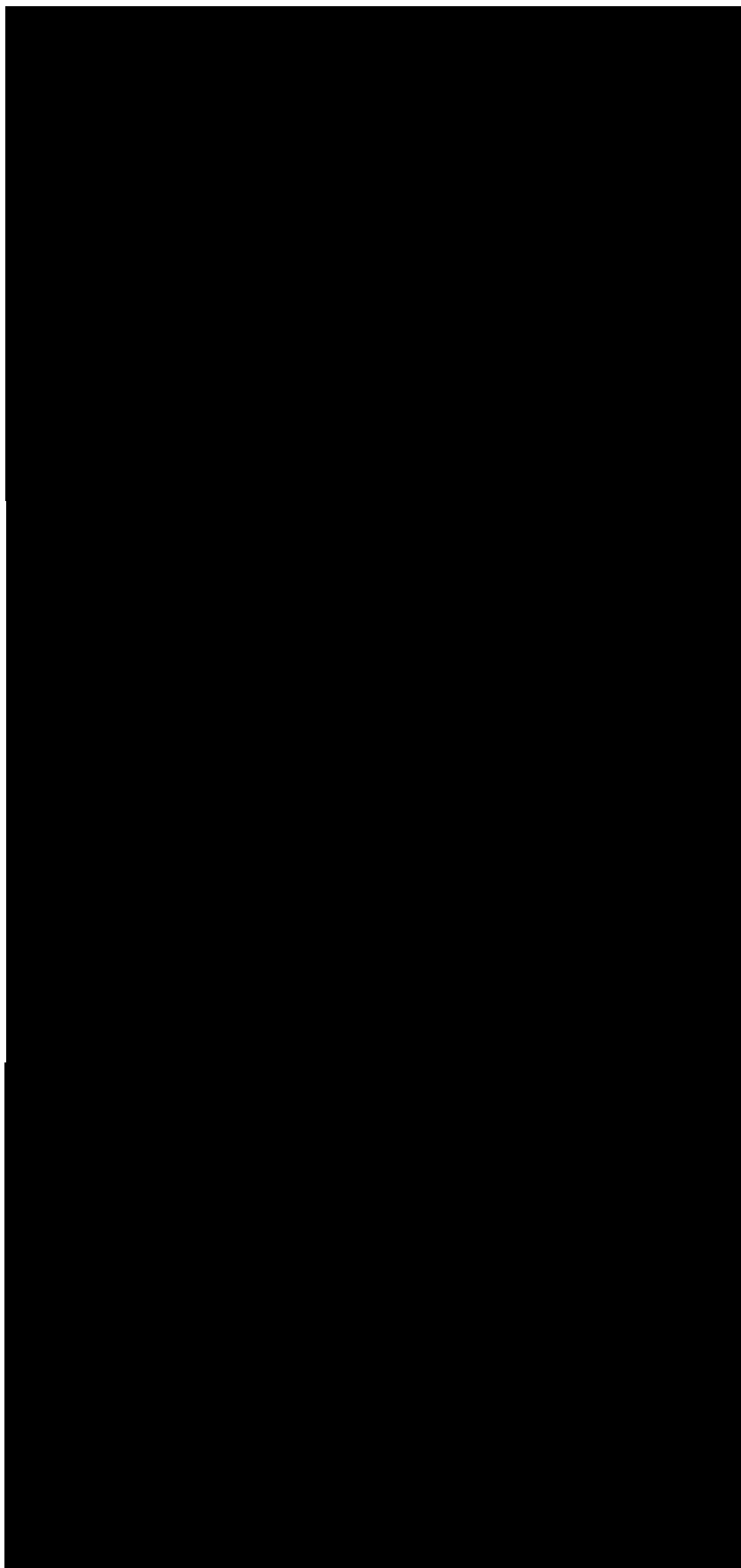
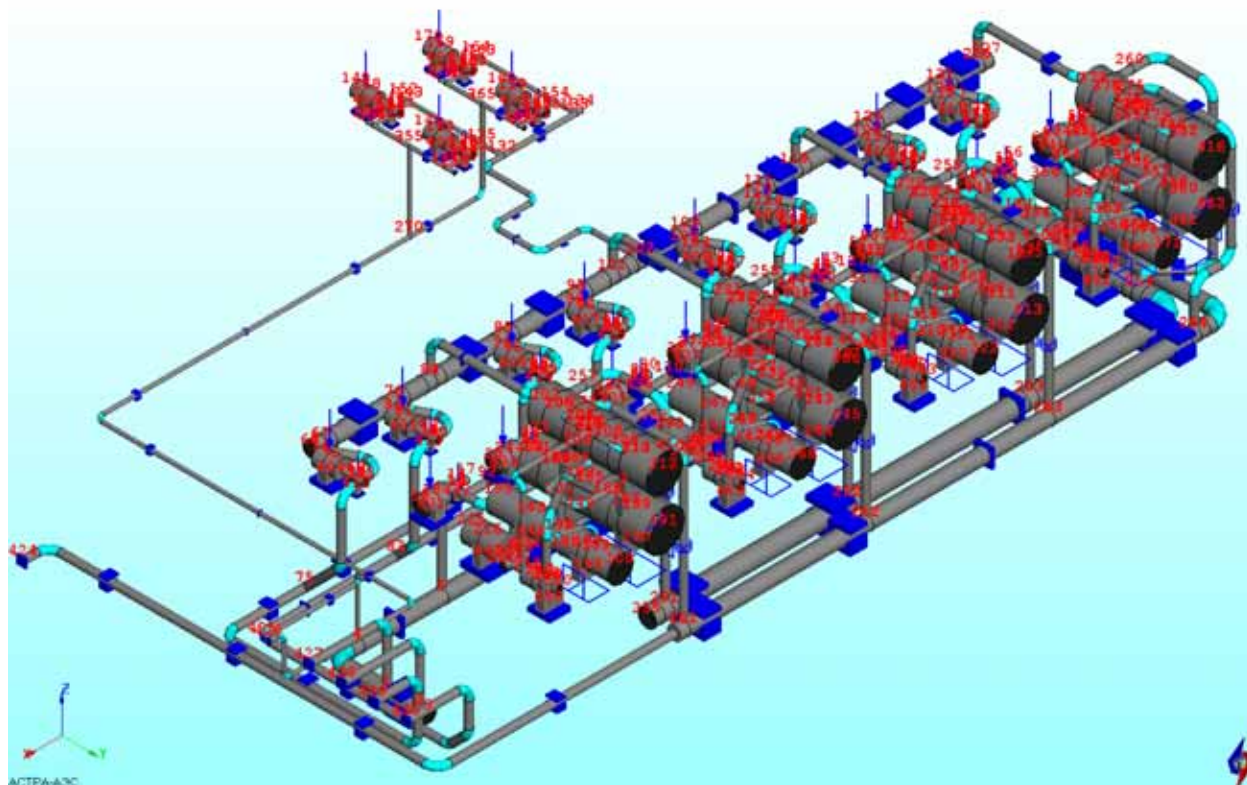


Рис. 1.2 Расчетные сейсмические и ВУВ спектры ответа для трубопроводной системы комплекса холодоснабжения *ответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”

Суперэлементная модель

ПРЕПРОЦЕССОР



Динамическая модель

Расположение насос

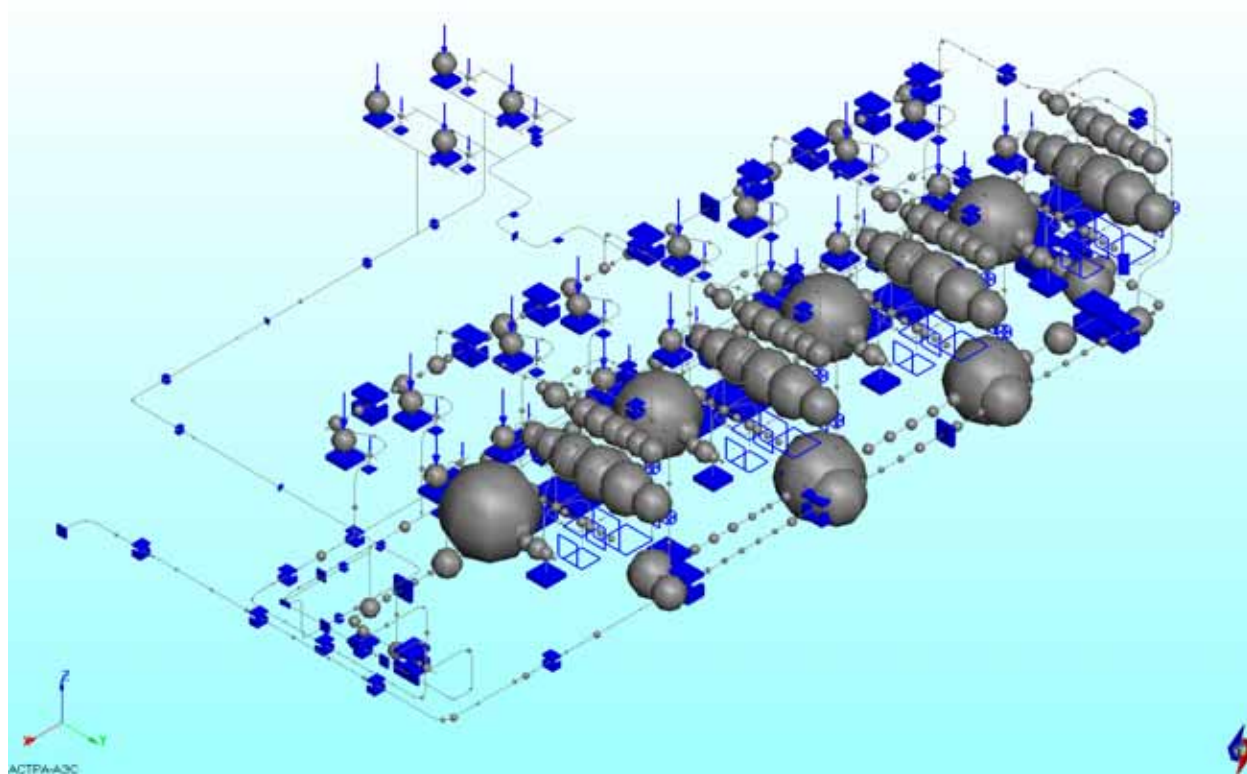


Рис. 1.3 Расчетная АСТРА-модель системы “оборудование на опорах - трубопроводы”
неответственных потребителей

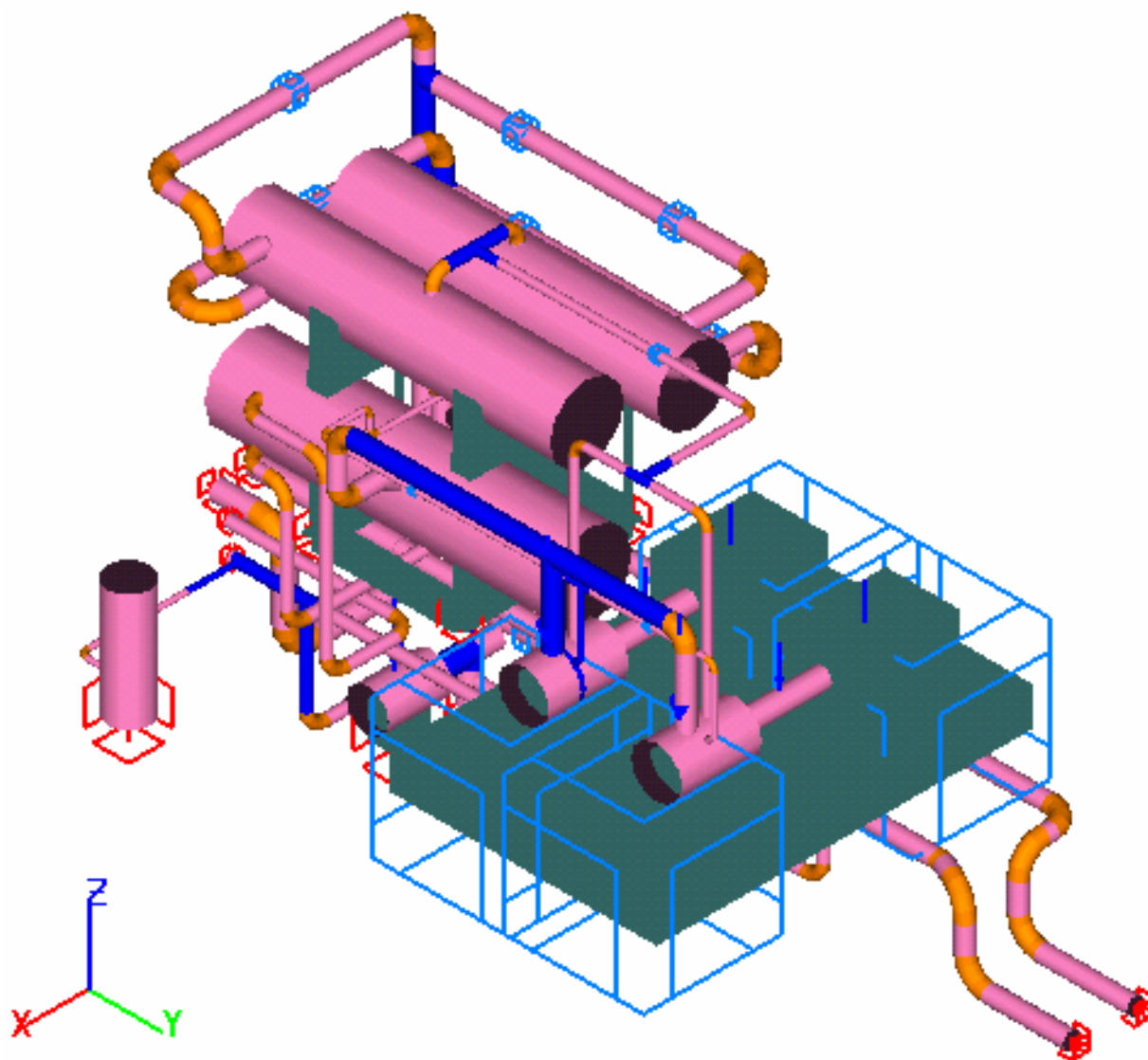


Рис. 1.4 Расчетная АСТРА-модель системы “оборудование на опорах–трубопроводы”
ответственных потребителей АЭС “Куданкулам”

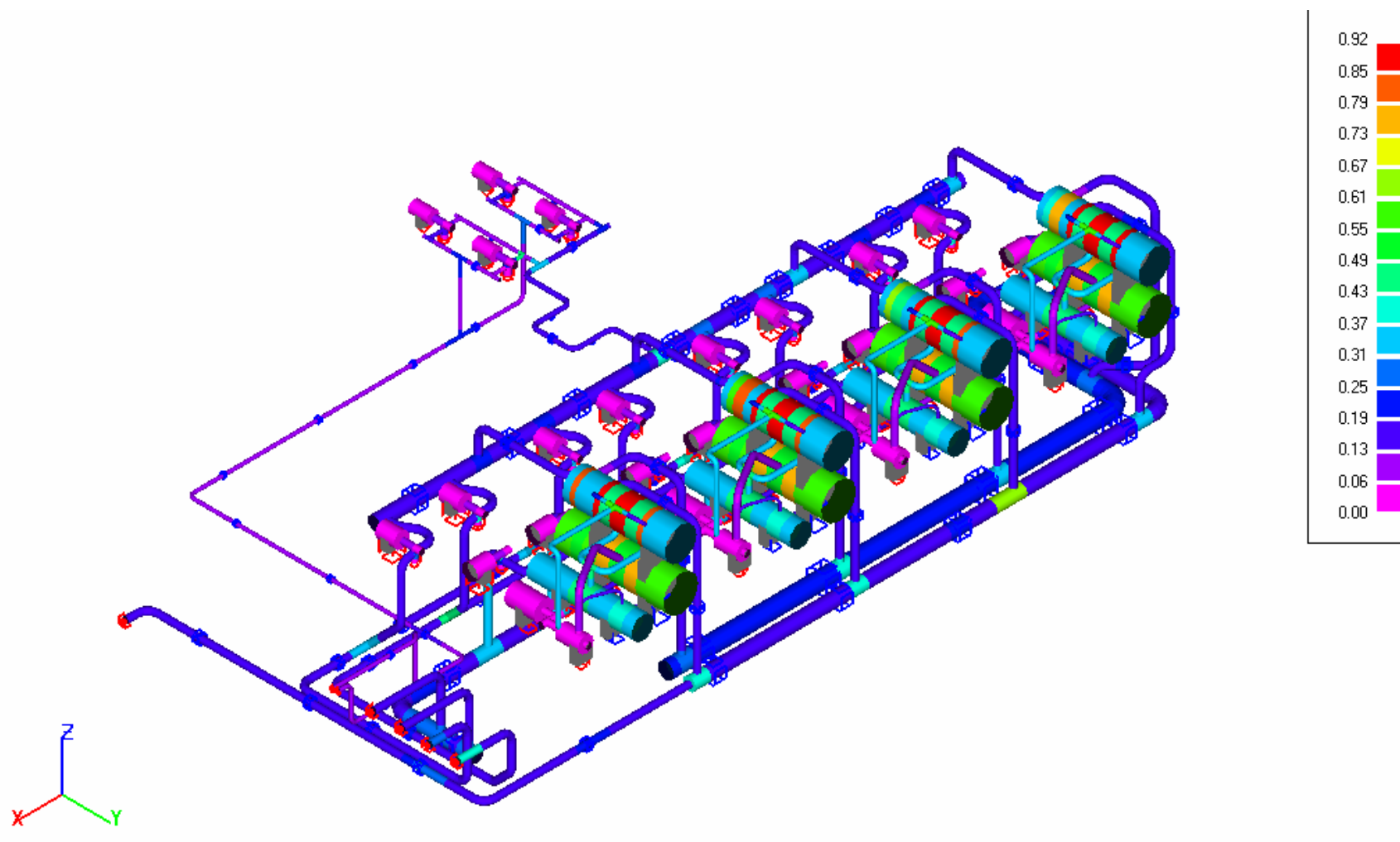


Рис. 1.5 Относительные мембранные и общие изгибные напряжения от веса и давления (группа 2).
Трубопроводная система комплекса холодоснабжения *неответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”

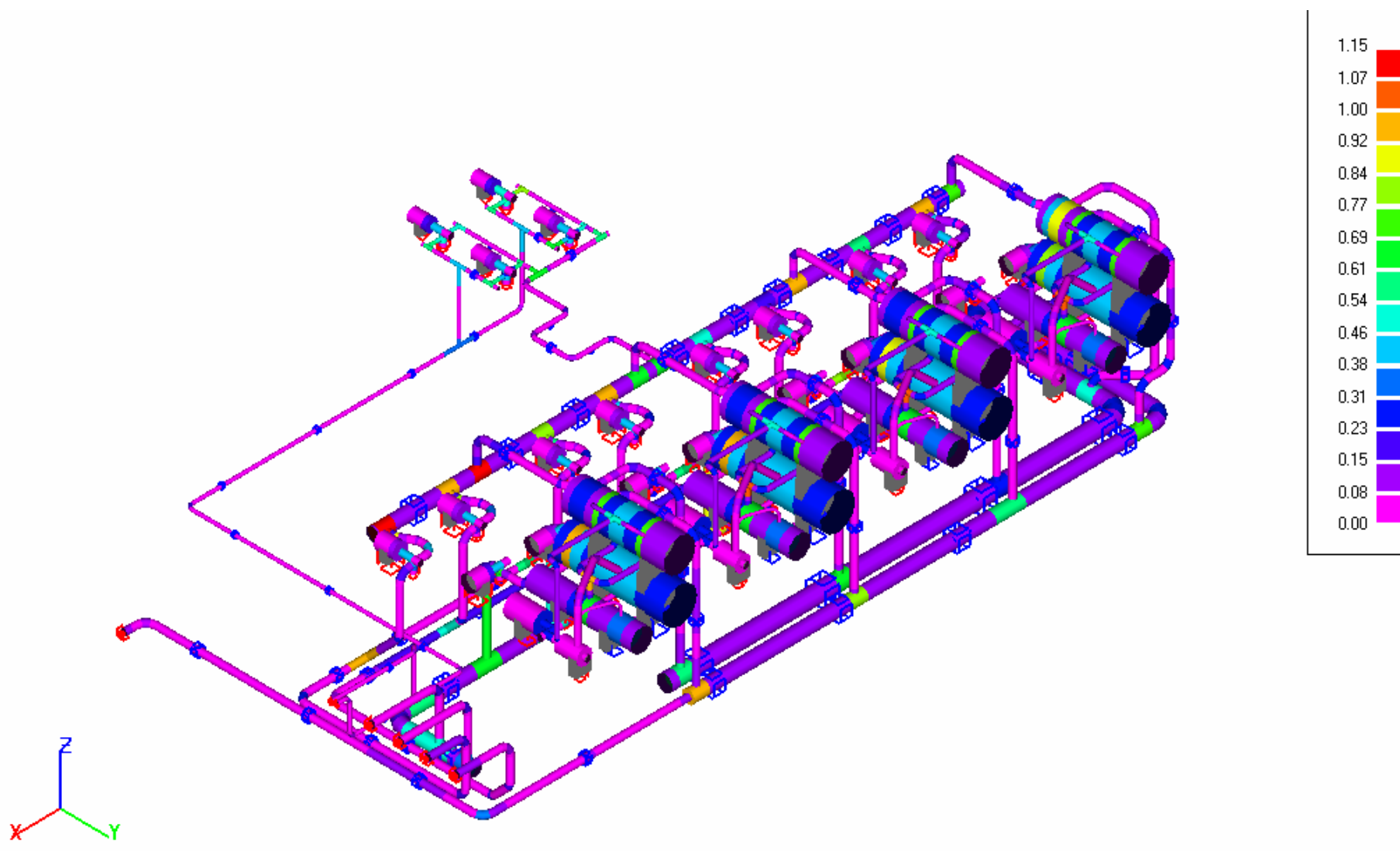


Рис. 1.6 Размах местных мембранных и изгибных напряжений (группа 3)
Трубопроводная система комплекса холодоснабжения *неответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”

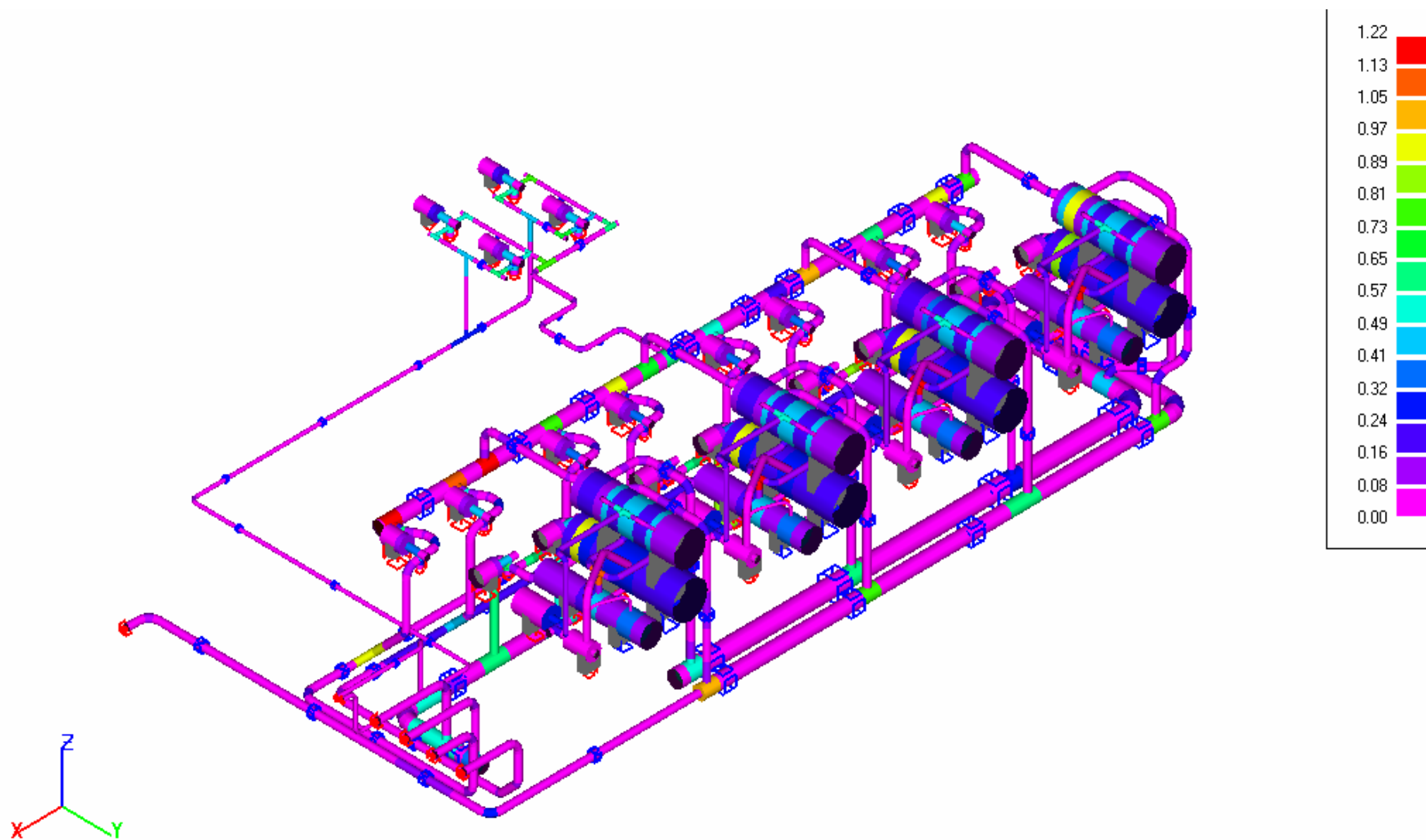


Рис. 1.7 Относительные амплитуды местных мембранных и изгибных напряжений (группа 4)
Трубопроводная система комплекса холодоснабжения *неответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”

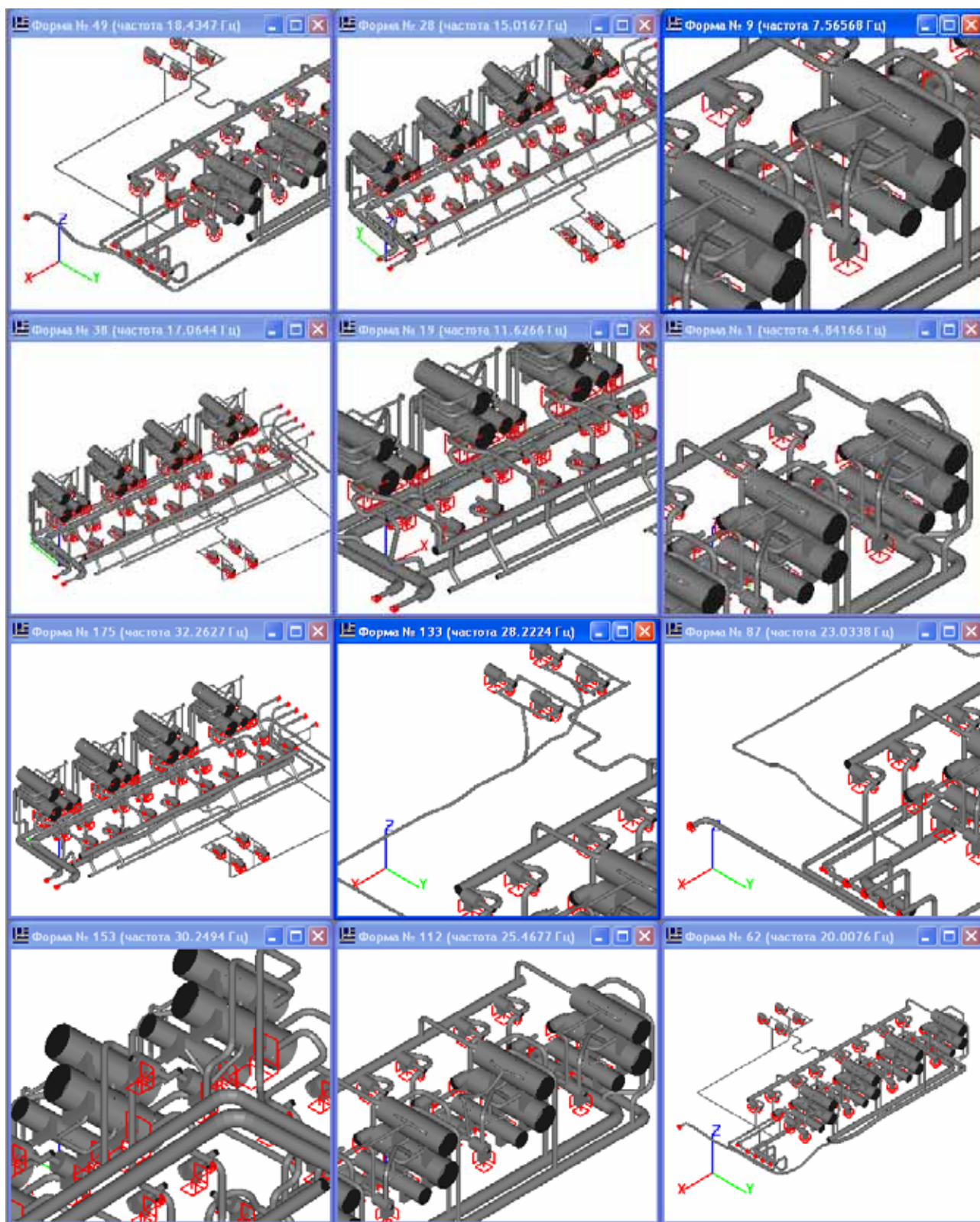


Рис. 1.8 “Галерея” собственных форм колебаний системы “оборудование-трубопроводы” комплекса неотвественных потребителей

Таблица 1.1

Расчетные собственные частоты и формы колебаний
ТС комплекса холодоснабжения *неответственных* потребителей

| N | (/) | () | () | | | | |
|-----|--------|--------|----------|----|--------|--------|--------|
| | | | / | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 31.256 | 4.9746 | 254- 260 | 14 | -1.000 | -0.178 | -0.040 |
| 2 | 39.422 | 6.2742 | 261- 424 | 15 | | 0.000 | 1.000 |
| 3 | 40.800 | 6.4935 | 83- 430 | 24 | -1.000 | -0.059 | 0.375 |
| 4 | 41.244 | 6.5642 | 75- 429 | 23 | -1.000 | -0.159 | 0.192 |
| 5 | 45.926 | 7.3093 | 270- 426 | 29 | -0.683 | 0.026 | -1.000 |
| 6 | 48.084 | 7.6528 | 238- 306 | 11 | 0.132 | -1.000 | -0.028 |
| 7 | 48.084 | 7.6529 | 214- 215 | 11 | 0.132 | -1.000 | -0.028 |
| 8 | 48.084 | 7.6529 | 288- 289 | 11 | -0.132 | 1.000 | 0.028 |
| 9 | 48.084 | 7.6529 | 337- 338 | 11 | -0.132 | 1.000 | 0.028 |
| 10 | 49.994 | 7.9569 | 75- 429 | 21 | 0.418 | -1.000 | 0.004 |
| 11 | 50.702 | 8.0695 | 83- 100 | 4 | | 1.000 | |
| 12 | 50.850 | 8.0930 | 270- 426 | 29 | 0.550 | -0.019 | -1.000 |
| 13 | 54.750 | 8.7138 | 270- 426 | 16 | | 0.000 | 1.000 |
| 14 | 65.840 | 10.479 | 270- 365 | 7 | -0.001 | 1.000 | -0.032 |
| 15 | 66.631 | 10.605 | 83- 430 | 23 | | -1.000 | -0.843 |
| 16 | 68.757 | 10.943 | 254- 260 | 10 | -0.198 | 1.000 | -0.137 |
| 17 | 69.240 | 11.020 | 83- 430 | 24 | -0.951 | 0.614 | -1.000 |
| ... | | | | | | | |
| 273 | 303.72 | 48.339 | 226- 349 | 14 | -0.028 | | -1.000 |
| 274 | 304.46 | 48.456 | 39- 236 | 5 | | 1.000 | -0.062 |
| 275 | 304.88 | 48.523 | 39- 236 | 5 | | -1.000 | 0.066 |
| 276 | 305.03 | 48.546 | 65- 353 | 5 | | -1.000 | 0.046 |
| 277 | 305.08 | 48.555 | 26- 66 | 5 | | -1.000 | 0.062 |
| 278 | 305.23 | 48.579 | 270- 426 | 24 | -1.000 | | 0.001 |
| 279 | 305.84 | 48.676 | 52- 304 | 5 | | -1.000 | 0.060 |
| 280 | 305.85 | 48.678 | 261- 424 | 37 | -0.001 | -0.001 | 1.000 |
| 281 | 307.47 | 48.936 | 130 | | 0.024 | -0.544 | -1.000 |
| 282 | 307.99 | 49.018 | 12- 60 | 5 | -1.000 | 0.444 | |
| 283 | 308.20 | 49.052 | 135- 143 | 7 | -1.000 | | |
| 284 | 308.32 | 49.071 | 101- 232 | 3 | 1.000 | -0.174 | |
| 285 | 309.28 | 49.224 | 270- 426 | 24 | 0.001 | | 1.000 |
| 286 | 311.26 | 49.539 | 83- 430 | 11 | -0.004 | 0.056 | 1.000 |
| 287 | 311.37 | 49.556 | 26- 66 | 5 | | 1.000 | -0.137 |
| 288 | 311.38 | 49.557 | 254- 464 | 5 | 1.000 | 0.149 | -0.019 |
| 289 | 311.49 | 49.576 | 88- 92 | 5 | -0.225 | 0.471 | -1.000 |
| 290 | 312.90 | 49.800 | 194- 248 | 6 | -1.000 | 0.142 | -0.168 |
| 291 | 313.91 | 49.960 | 262- 273 | 12 | 0.097 | -1.000 | 0.008 |

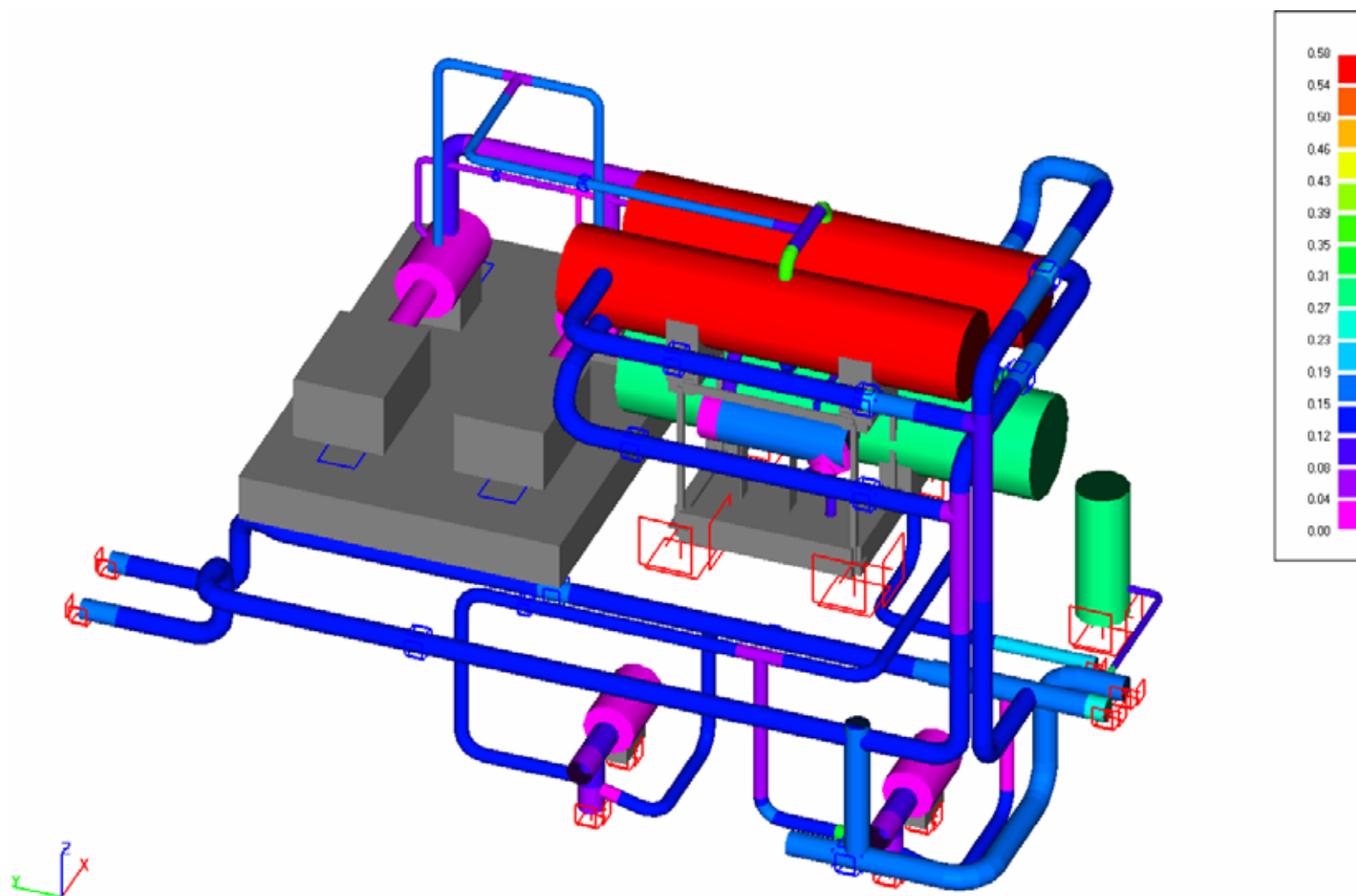


Рис. 1.9 Относительные мембранные и общие изгибные напряжения от веса и давления (группа 2).
Трубопроводная система комплекса холодоснабжения *ответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”

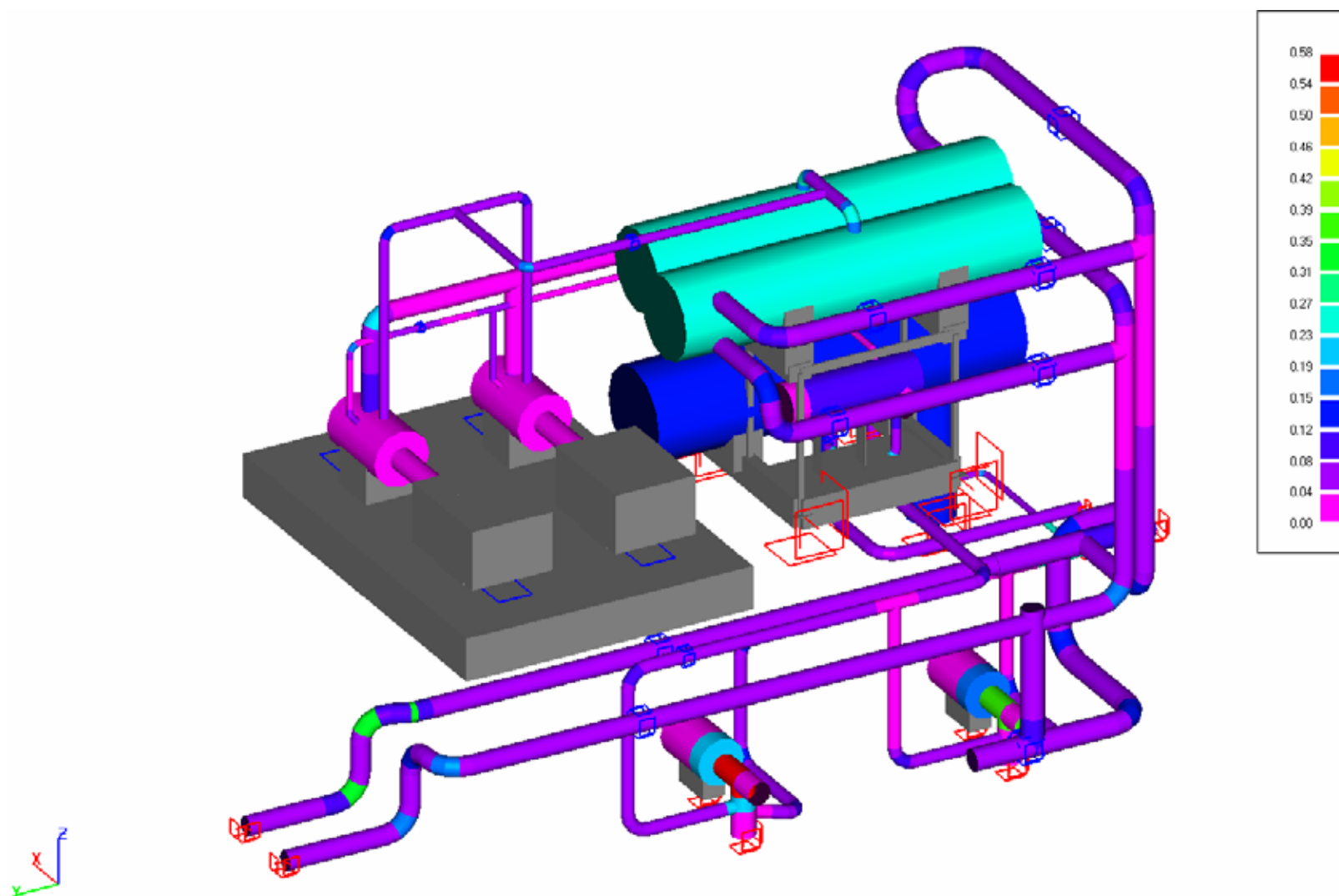


Рис. 1.10 Размах местных мембранных и изгибных напряжений (группа 3)
Трубопроводная система комплекса холодоснабжения *ответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”

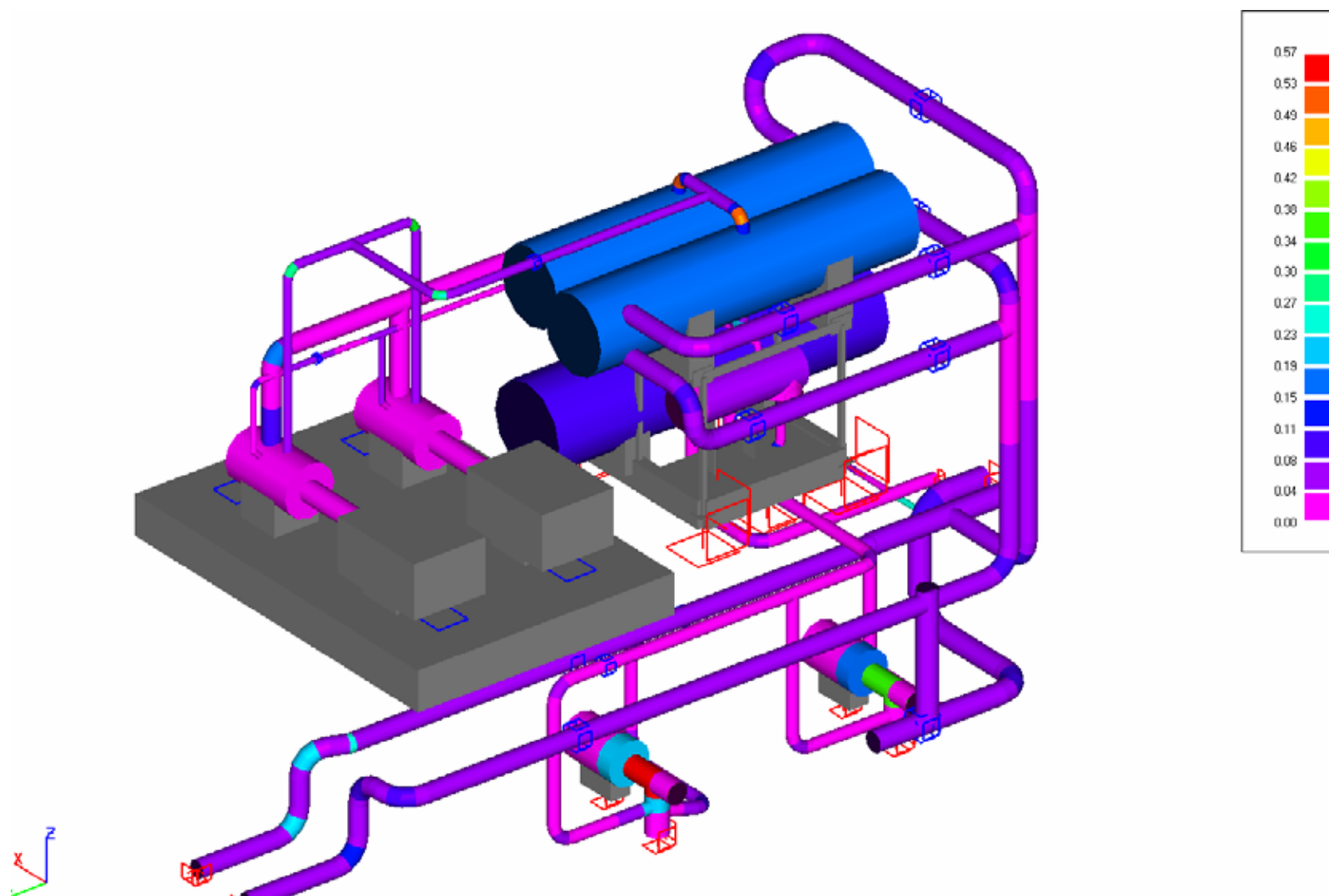


Рис. 1.11 Относительные амплитуды местных мембранных и изгибных напряжений (группа 4)
Трубопроводная система комплекса холодоснабжения *ответственных* потребителей АЭС “Куданкулам”

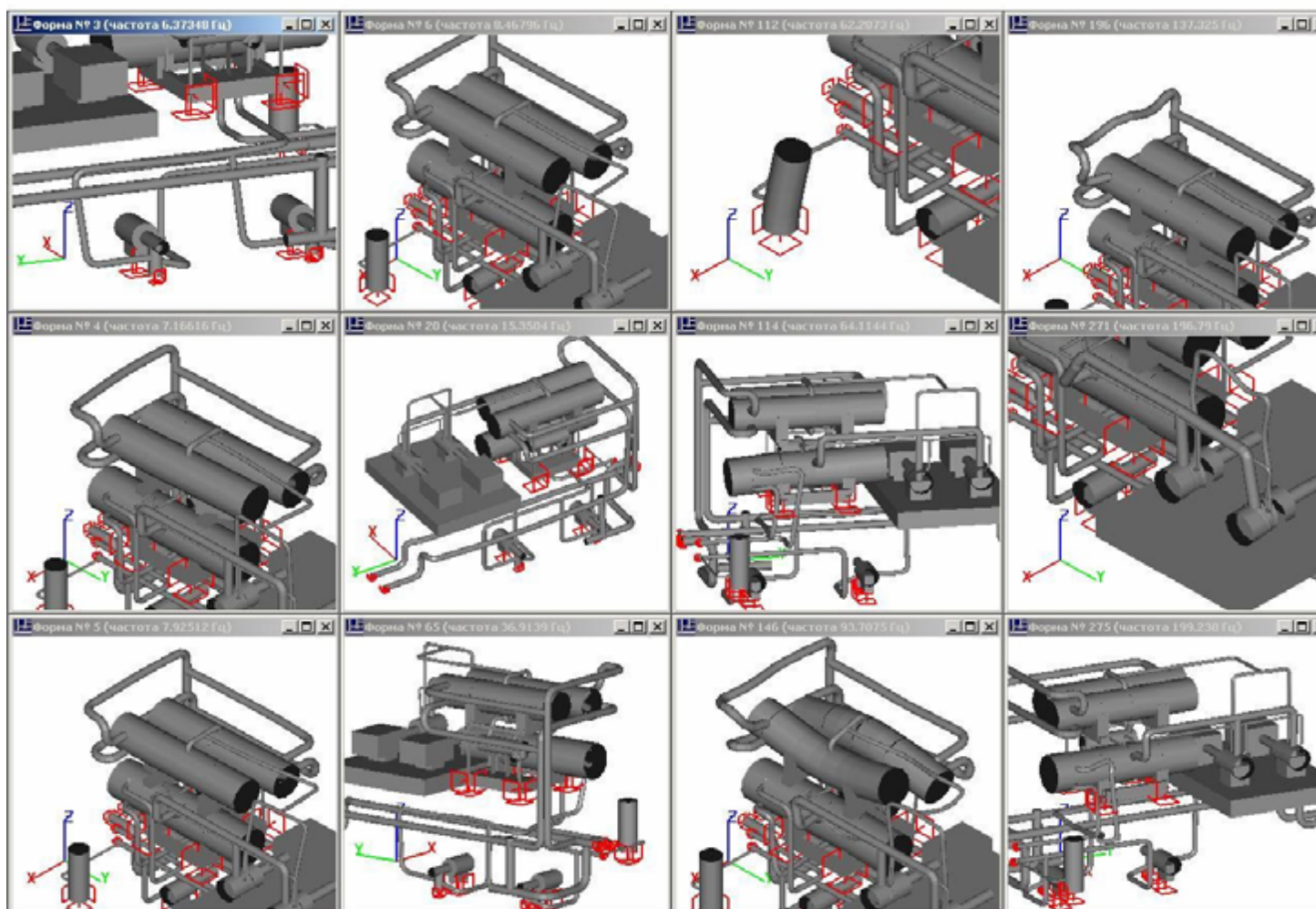


Рис. 1.12 “Галерея” собственных форм колебаний системы “оборудование-трубопроводы” комплекса ответственных потребителей АЭС “Куданкулам”

2. Трубопроводная система ГКС газопровода “Сахалин-Хабаровск-Владивосток”. Расчеты по Нормам ПНАЭ Г-7-002–86 (2008-2009 гг.)

2.1 Описание объекта и задач расчетных исследований

Целью НИР являлось расчетное обоснование статической, циклической и сейсмической прочности трубопроводной системы ГКС магистрального газопровода Сахалин-Хабаровск-Владивосток в соответствии с требованиями действующих российских норм расчета на прочность СНиП 2.05.06–85 и ПНАЭ Г-7-002–86 [1]. В данном разделе представлена расчетная модель ТС и результаты расчета по нормам атомной энергетики ПНАЭ Г-7-002–86, как отвечающие отраслевому назначению верифицируемого программного средства.

Расчет сейсмической реакции проводился методом интегрирования уравнений движения для 4-х характерных воздействий заданных в виде акселерограмм (рис. 2.1 – 2.4), а также по линейно-спектральной методике для соответствующих спектров ответа (рис. 2.5 – 2.8). Каждое сейсмическое воздействие последовательно прикладывалось в “исходном” (оси 1, 2, 3 воздействия совпадают с глобальными осями ТС X, Y и Z) и “повернутом” вариантах (оси 1, 2, 3 воздействия совпадают с глобальными осями ТС Y, X и Z) в целях учета наиболее опасного направления подхода сейсмоволны.

Дополнительно был проведен уточненный расчет наиболее нагруженных тройниковых соединений по пространственно-оболочечным схемам метода конечных элементов (программный модуль АТСРА-СТАДИО).

2.2 Расчетная модель

Расчетная модель ТС ГКС, показанная на рис. 2.9 – 2.12, включает 3 коллектора, трубопроводы обвязки и оборудование 8-и технологических модулей и содержит подземную часть до “мертвых” опор. Адекватно в составе модели учитывались прямые трубы, отводы, тройниковые соединения, переходы, “арматура” (клапаны и вентили с приводами и без), опорные конструкции проектных типов, оборудование (фильтры-сепараторы ФС и газоперекачивающие агрегаты ГПА). Влияние агрегата воздушного охлаждения АВО моделировалось соответствующими граничными условиями (опорами).

Общее число участков (неразветвленных суперэлементов) в модели – 835, узлов – 831, элементов-деталей – 3247, динамических степеней свободы – 10686. Общая масса, включающая массу труб, изоляции и продукта, “арматуры” и оборудования в составе модели ТС – 4382.4 т.

2.3 Результаты расчетов

Некоторые результаты расчетных исследований НДС и прочности – расчетные перемещения и напряжения для нормативно регламентированных групп, собственные формы колебаний – представлены на рис. 2.13 – 2.23.

Были определены блочным методом Ланцоша и учтены в сейсмических расчетах все частоты в диапазоне от 0 до 33 Гц (759 частот) и формы собственных колебаний.

2.4 Выводы и рекомендации

2.4.1 Разработаны и верифицированы подробные расчетные статические и динамические (сейсмические) модели пространственной разветвленной и протяженной системы “подземные коллекторы – надземные коллекторы – трубопроводы и оборудование 8-и технологических модулей” ГКС.

2.4.2 Определены расчетные статические и сейсмические перемещения и нагрузки (силы и моменты) на патрубки оборудования и на опорные конструкции, необходимые для проектирования и оценки прочности опор, оборудования и строительных конструкций.

2.4.3 Все элементы трубопровода ГКС **удовлетворяют критериям статической, циклической и сейсмической прочности** и устойчивости при проектной компоновке трубопроводов и оборудования, типоразмерах деталей, расстановке и типе опор, указанных на визуализированных расчетных моделях и аксонометрических схемах, за исключением следующих:

- в тройнике 3 (1020.0×30.0 / 1420.0×45.0, технологический модуль 1) по критерию циклической прочности (для принятой допускаемой амплитуды 300 МПа превышение 27%), по уточненной МКЭ-методике – в норме;

- в тройнике 21 (720.0×24.0 / 1420.0×45.0, технологический модуль 1) по критерию циклической прочности (для принятой допускаемой амплитуды 300 МПа превышение 9%), по уточненной МКЭ-методике – в норме;

- в тройнике 21 (720.0×24.0 / 1420.0×45.0, технологический модуль 1) напряжения “сейсмической” группы (этап 1 + 9-бальные спектры и акселерограммы) превышают допускаемые в 1,75 раз, а по МКЭ-расчету – в 1,4 раза;

Расчетные напряжения в “критических” тройниках при 10-бальном сейсмоздании возрастают почти в 2 раза по сравнению с таковыми для 9-бального.

2.4.4 Изложены и подтверждены количественно некоторые идеи “Расчетчика” по необходимой прочностной оптимизации трубопроводной системы – снижению статических напряжений в тройниках 3 (1020.0×30.0 / 1420.0×45.0) и 21 (720.0×24.0 / 1420.0×45.0, ТМ1) и напряжений сейсмической группы в тройниках соединения ТМ1 и ТМ8 с коллекторами, тройниках 426.0×14.0 / 720.0×30.0 во всех технологических модулях до уровня допустимых.

2.4.5 Различные расчетные напряжения в наиболее нагруженных элементах трубопроводной системы (тройниковых соединениях и отводах), полученные по ПНАЭ Г-7-002–86 (атомные энергоустановки), СНиП 2.05.06–85 и СТО Газпром 2-2.1-249–2008 (магистральные газопроводы), а также вынужденно принятые упрощения модели (например, влияние АВО) подтверждают необходимость дальнейших уточненных исследований трубопроводов ГКС и разработок по совершенствованию нормативных методик прочностного расчета.

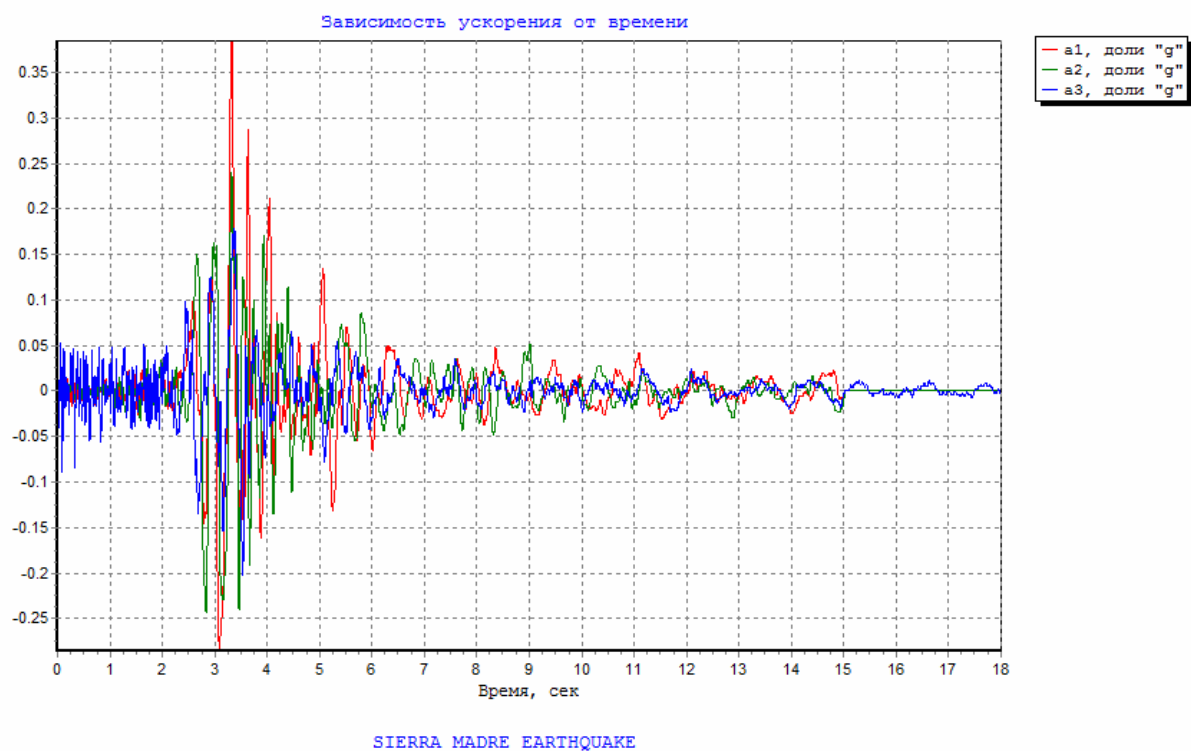


Рис. 2.1 Расчетная акселерограмма для сейсмического воздействия №1 (Sierra Madre Earthquake, "9 баллов")

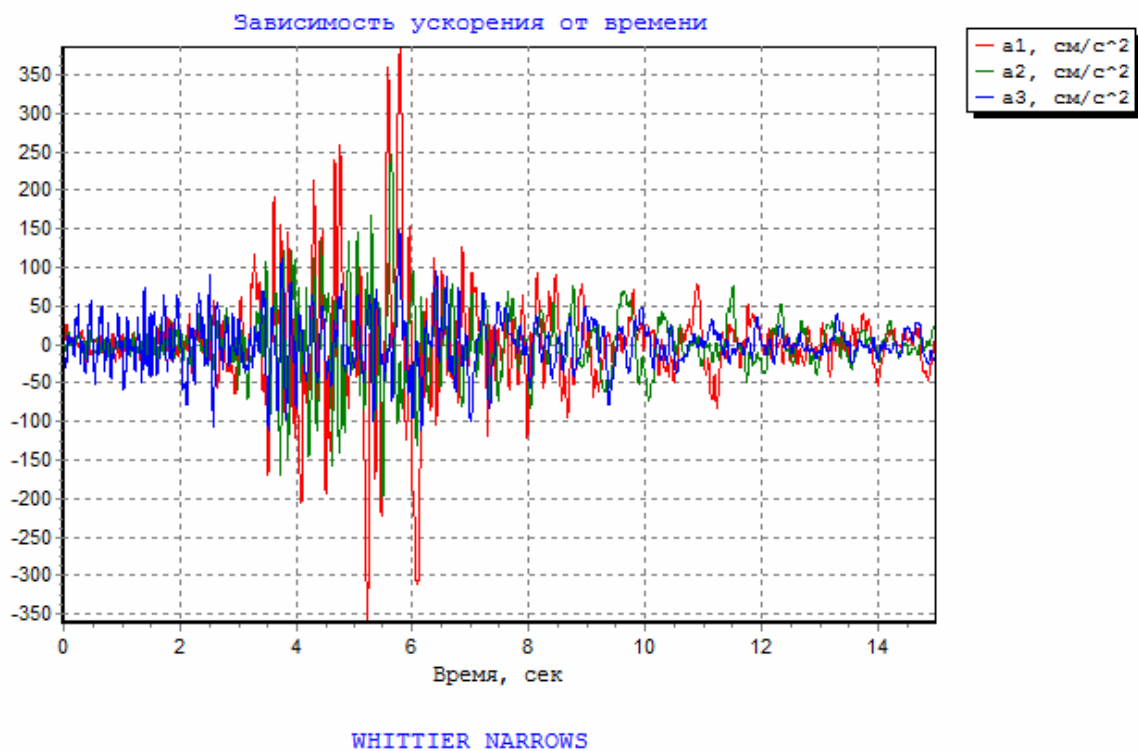


Рис. 2.2 Расчетная акселерограмма для сейсмического воздействия №2 (Whittier Narrows, "9 баллов")

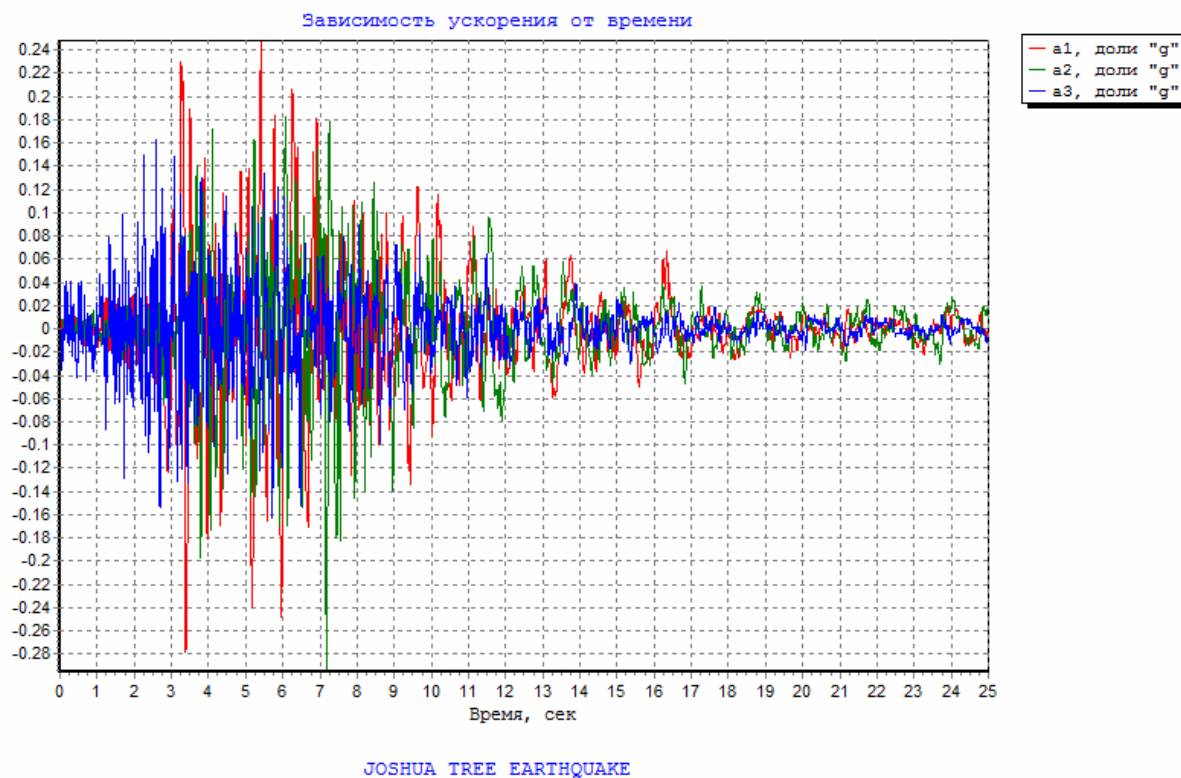


Рис. 2.3 Расчетная акселерограмма для сейсмического воздействия №3 (Joshua Tree Earthquake, "9 баллов")

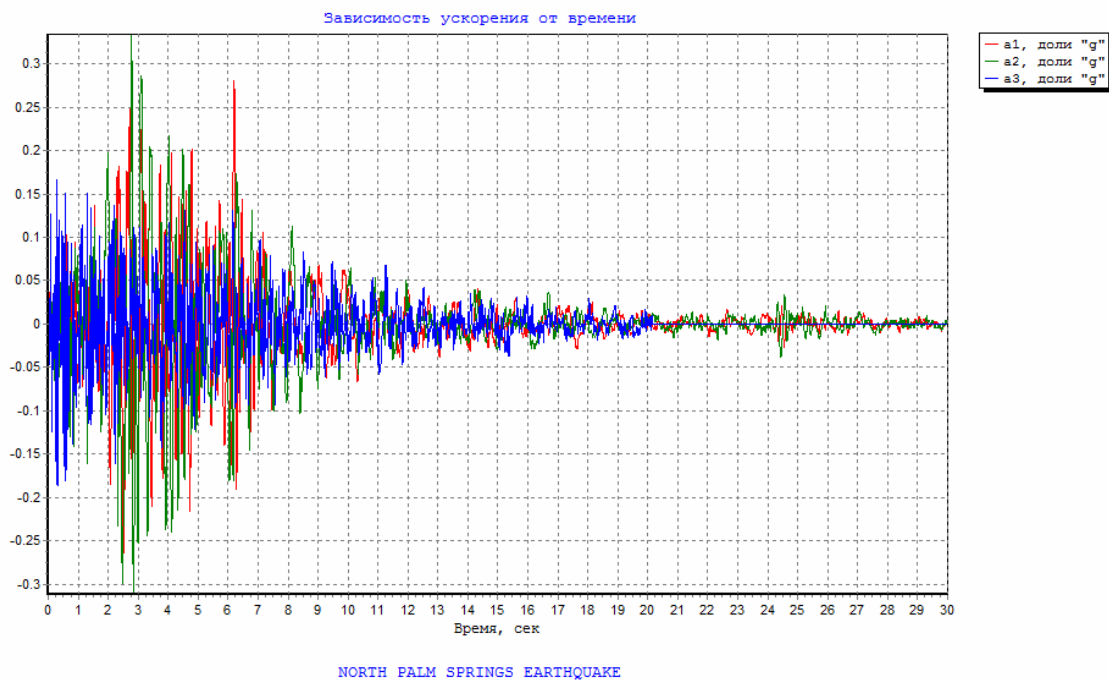


Рис. 2.4 Расчетная акселерограмма для сейсмического воздействия №4 (North Palm Springs Earthquake, "9 баллов")

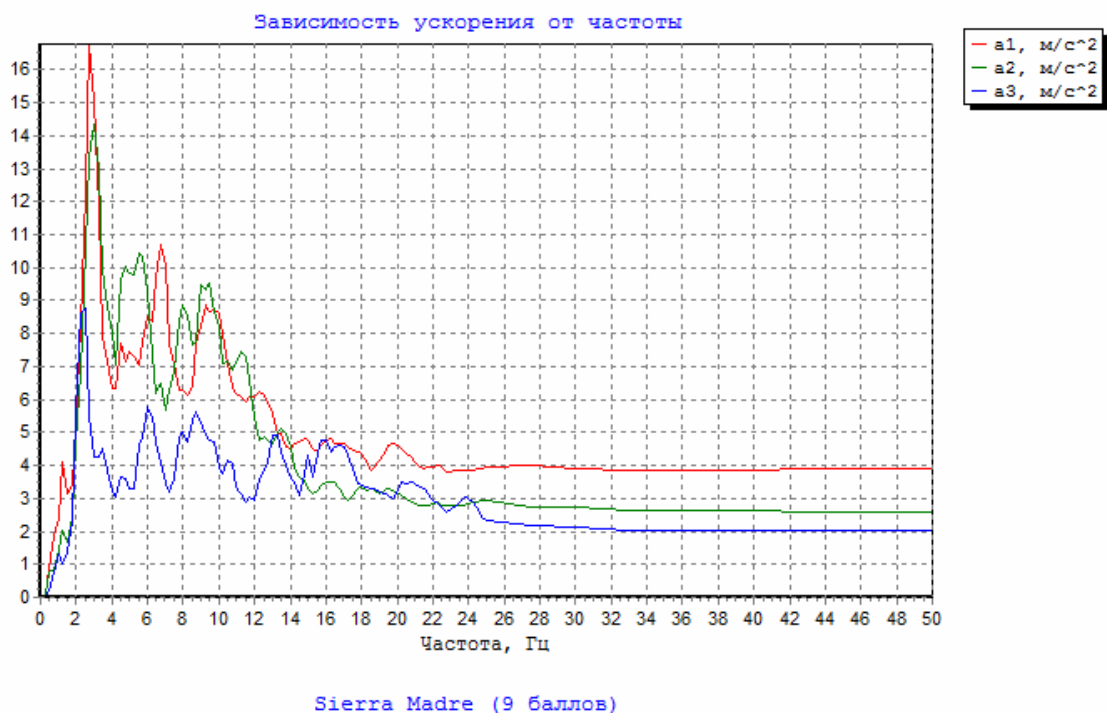


Рис. 2.5 График расчетного спектра ответа для воздействия №1
(Sierra Madre Earthquake, “9 баллов”)

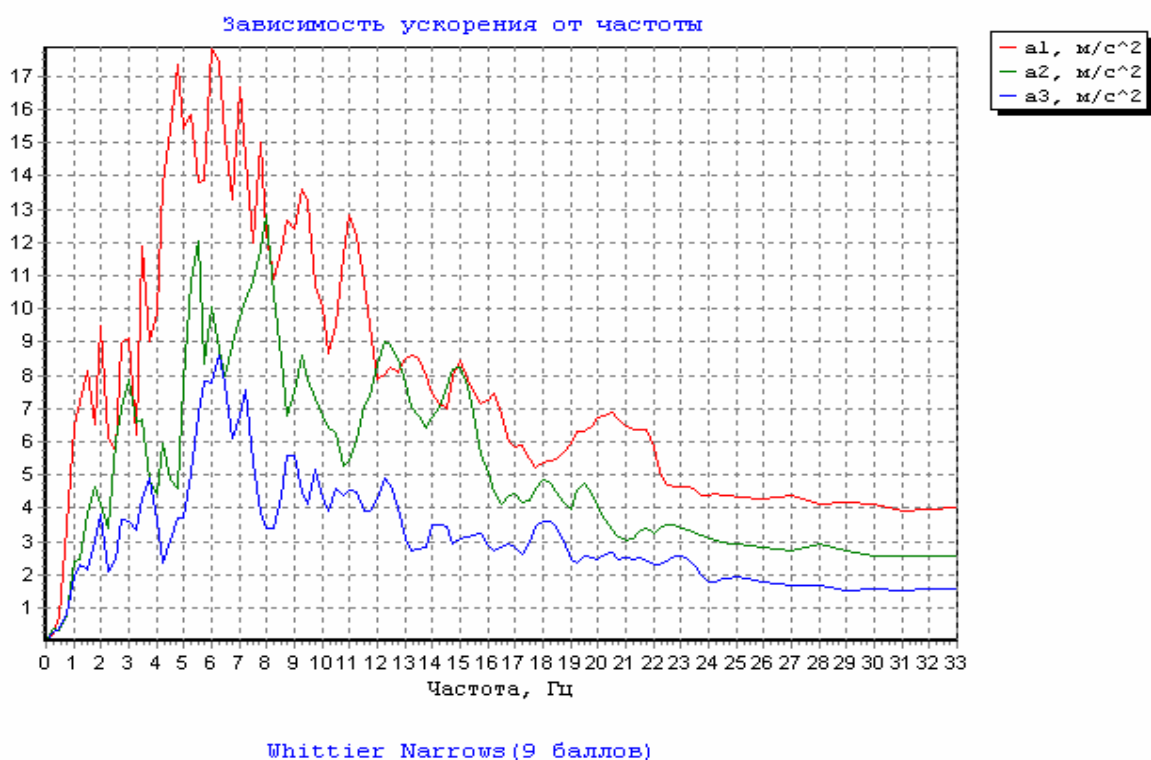


Рис. 2.6 График расчетного спектра ответа для воздействия №2
(Whittier Narrows, “9 баллов”)

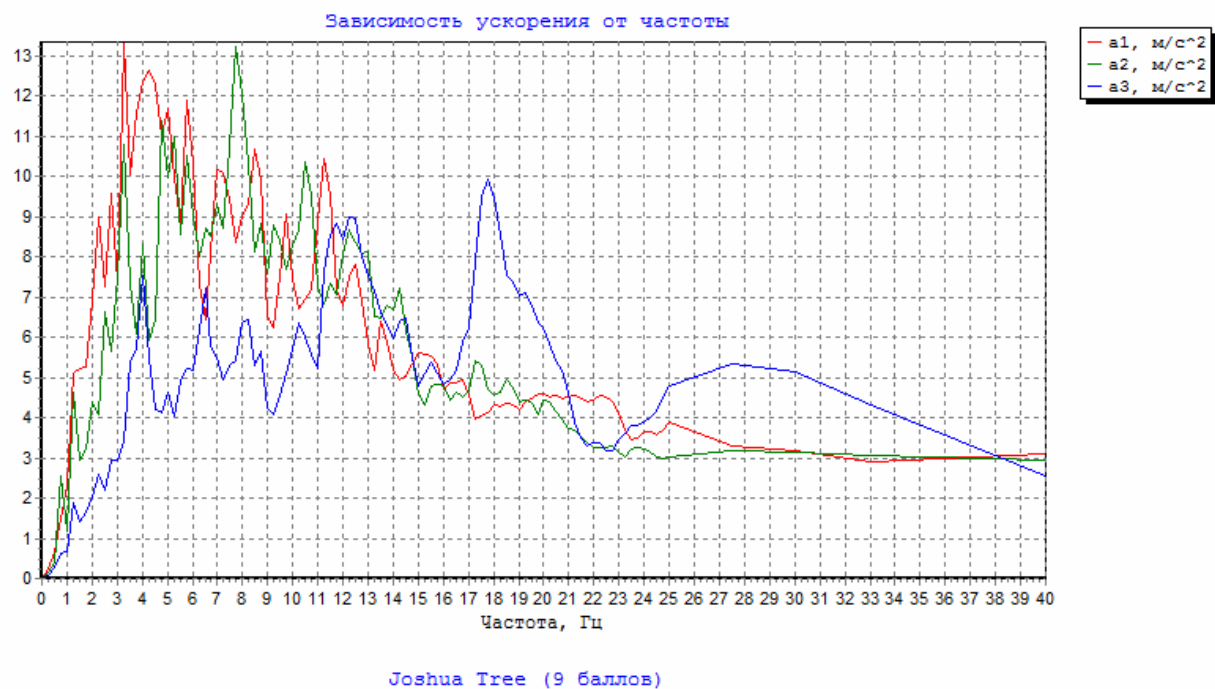


Рис. 2.7 График расчетного спектра ответа для воздействия №3 (Joshua Tree Earthquake, “9 баллов”)

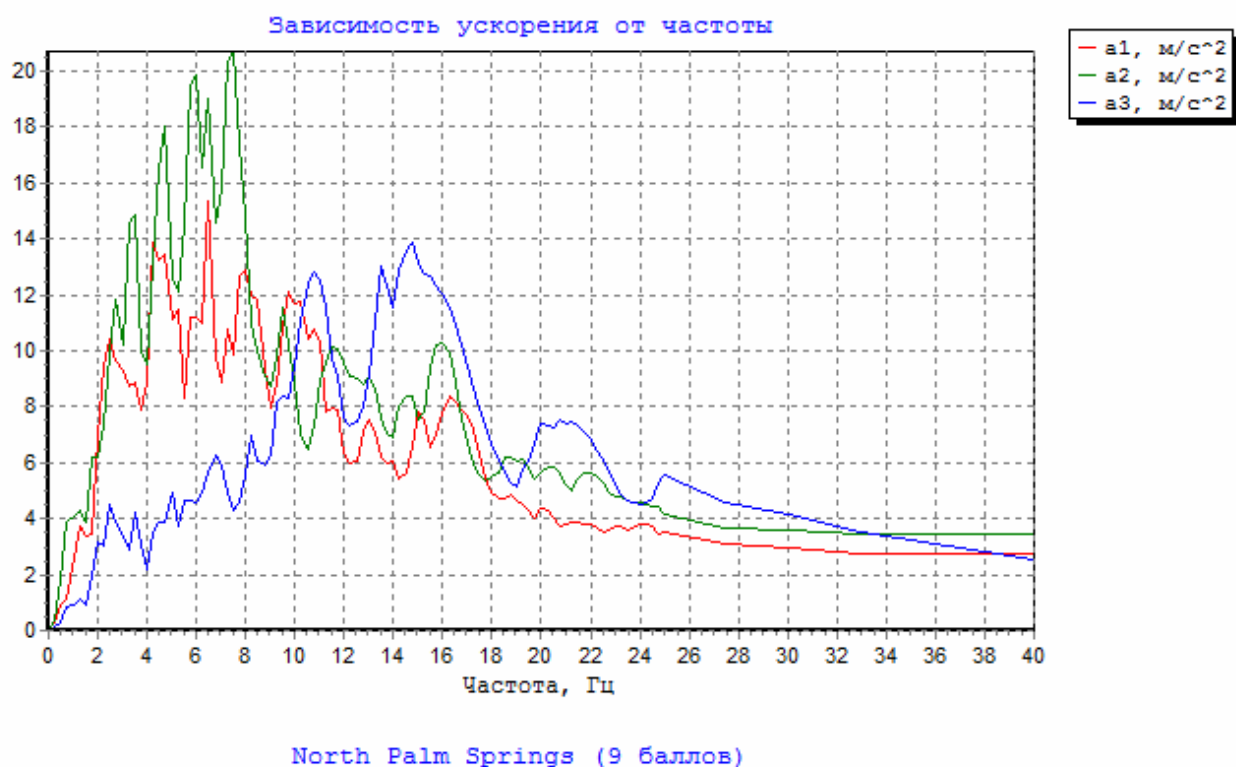
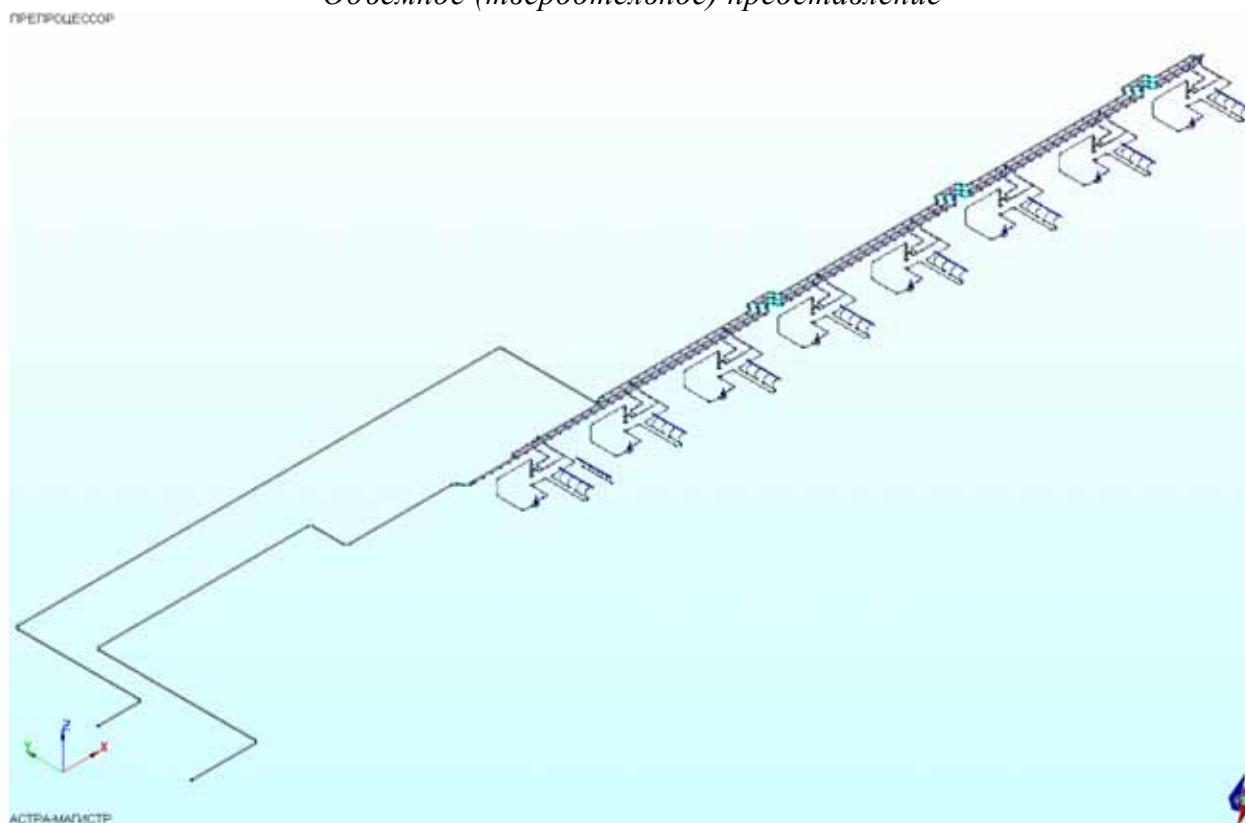


Рис. 2.8 График расчетного спектра ответа для воздействия №4 (North Palm Springs Earthquake, “9 баллов”)

Объемное (твердотельное) представление



Осевое представление

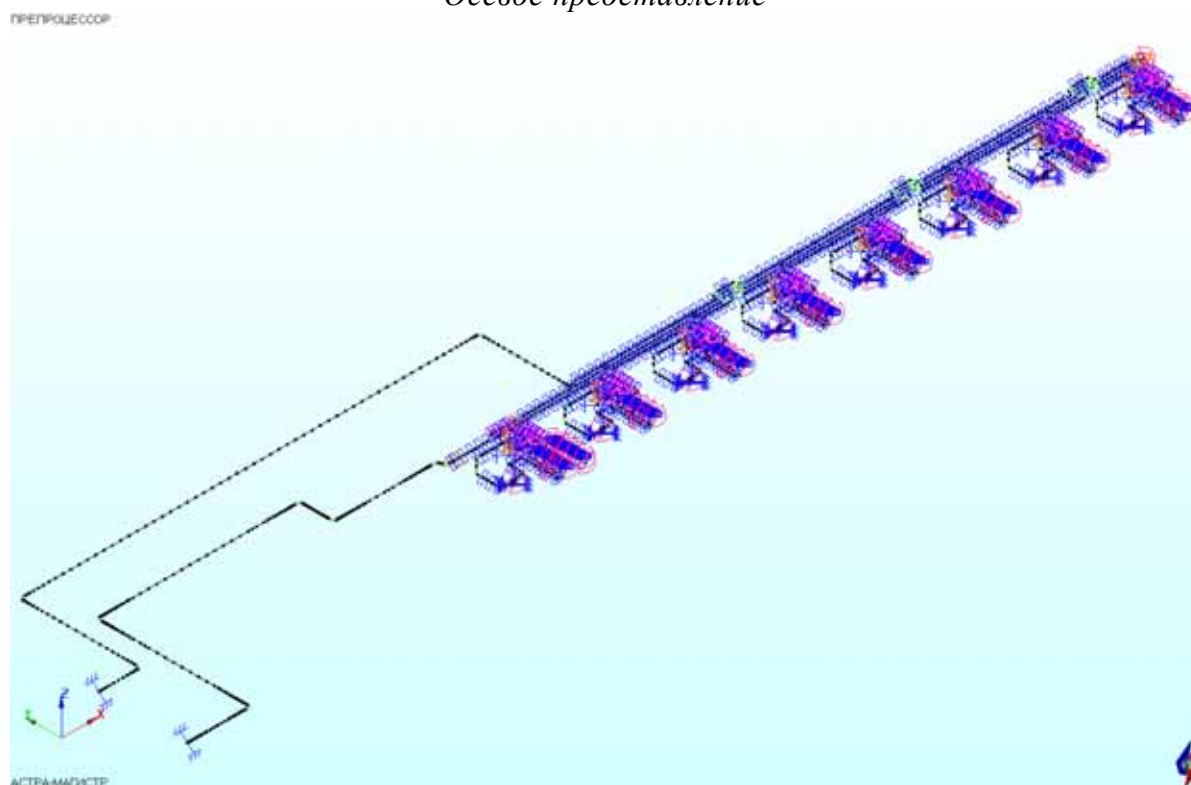
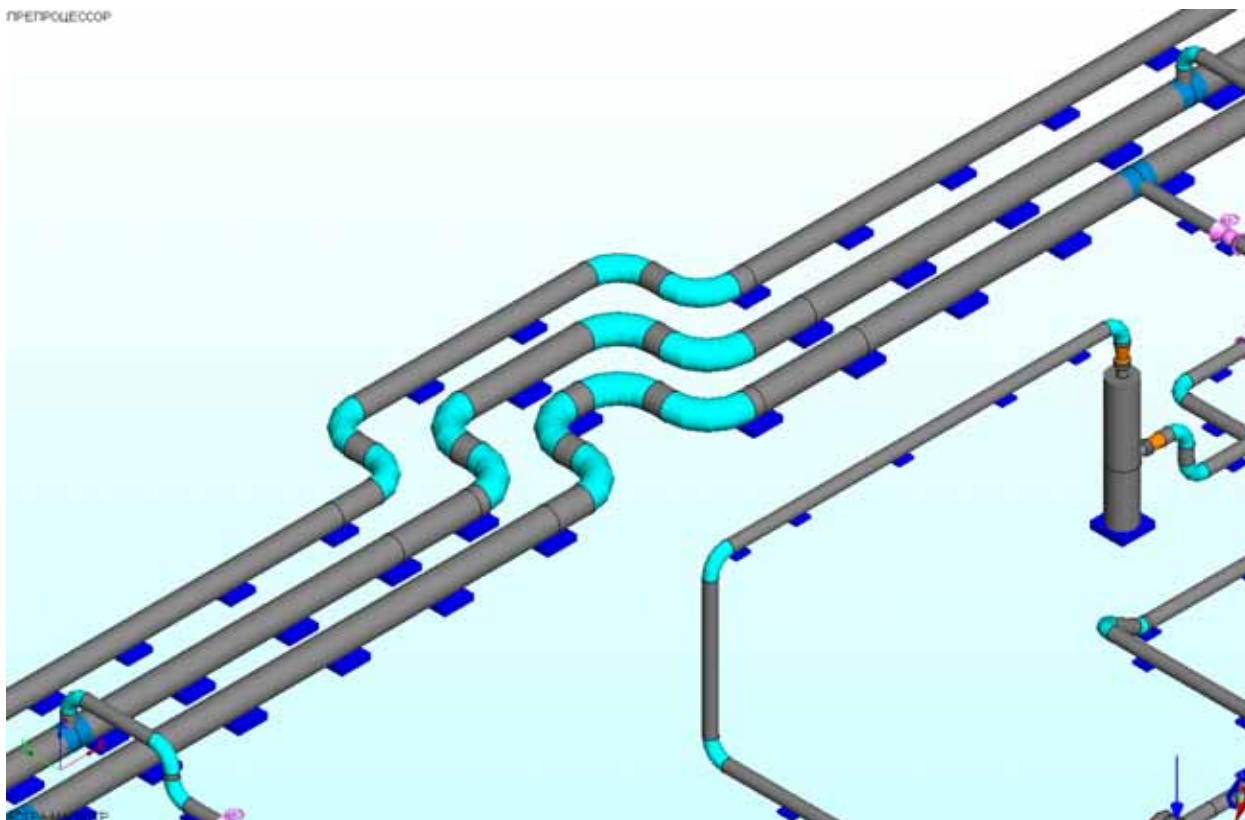


Рис. 2.9 Расчетная модель (АСТРА-АЭС'2009) трубопроводной системы ГКС.
Изометрия

ПРЕПРОЦЕССОР



ПРЕПРОЦЕССОР

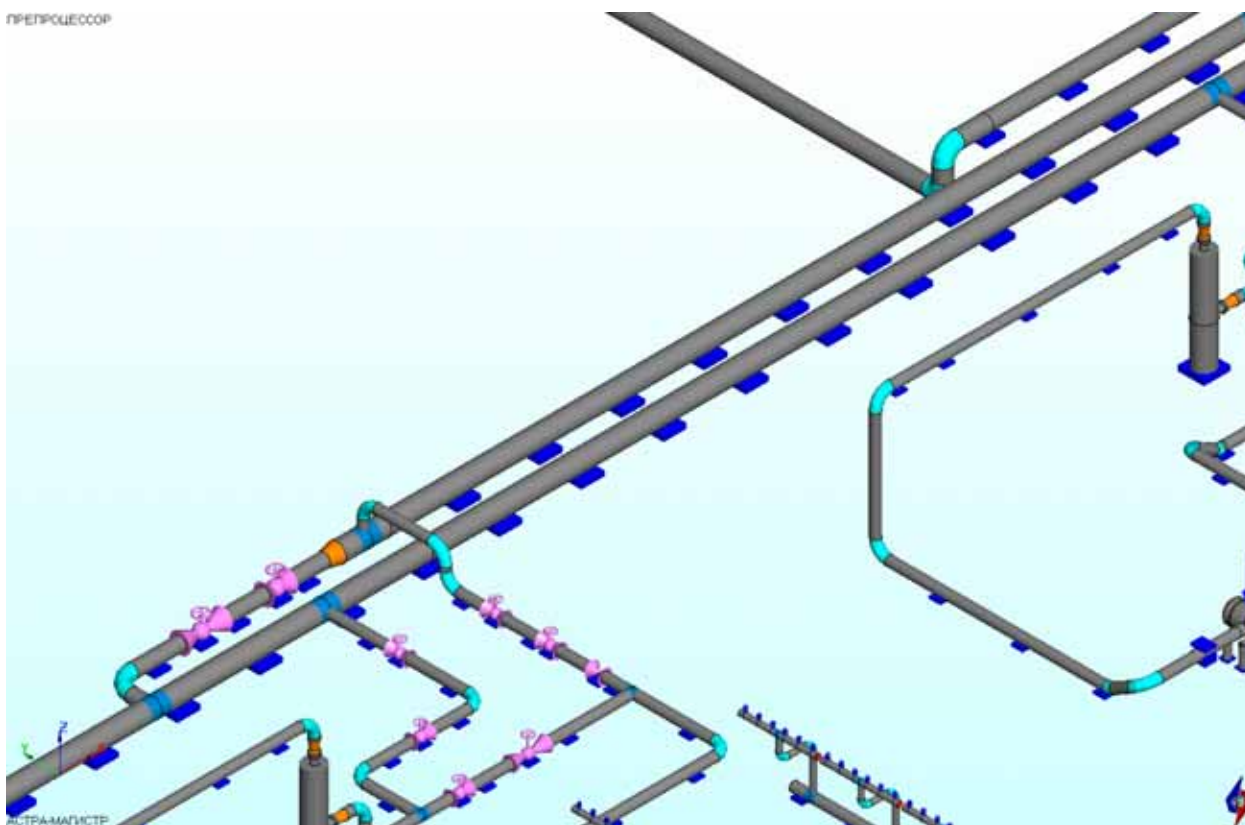
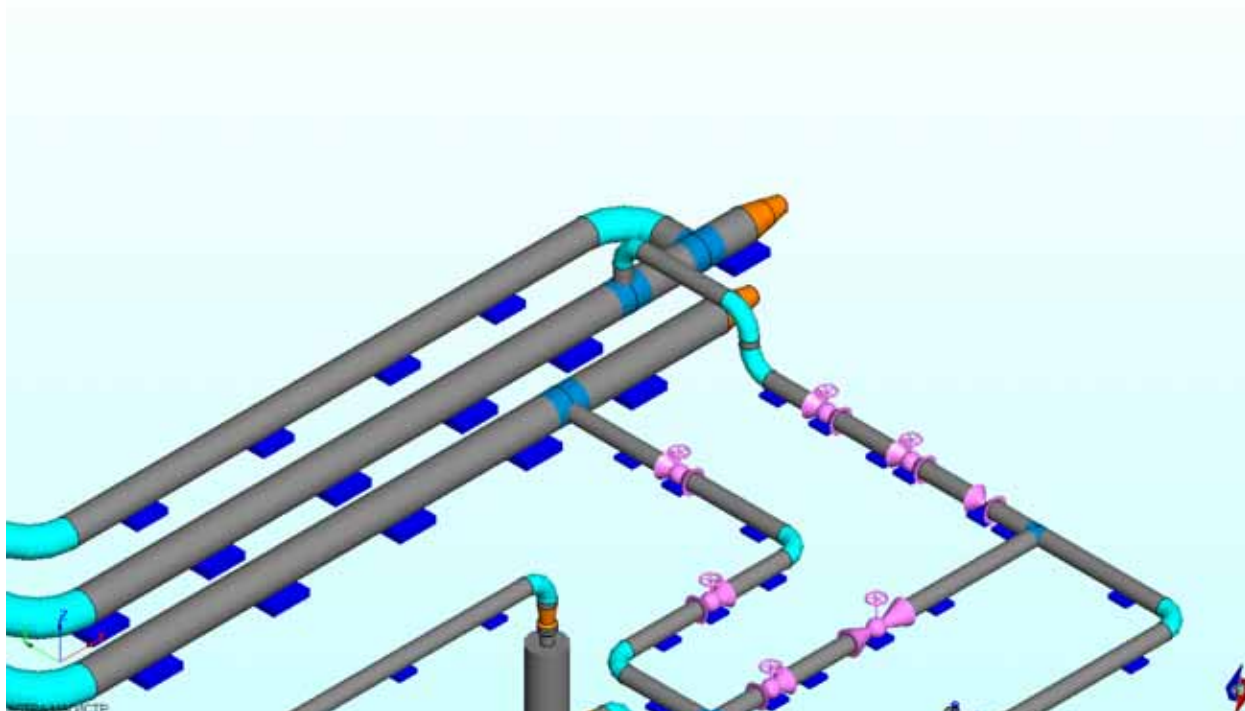


Рис.2.10 Расчетная модель (АСТРА-АЭС'2009) трубопроводной системы ГКС.
Фрагменты

Зона 8-го технологического модуля ГКС

ПРЕПРОЦЕССОР



Наличие участков в грунте

Высота засыпки

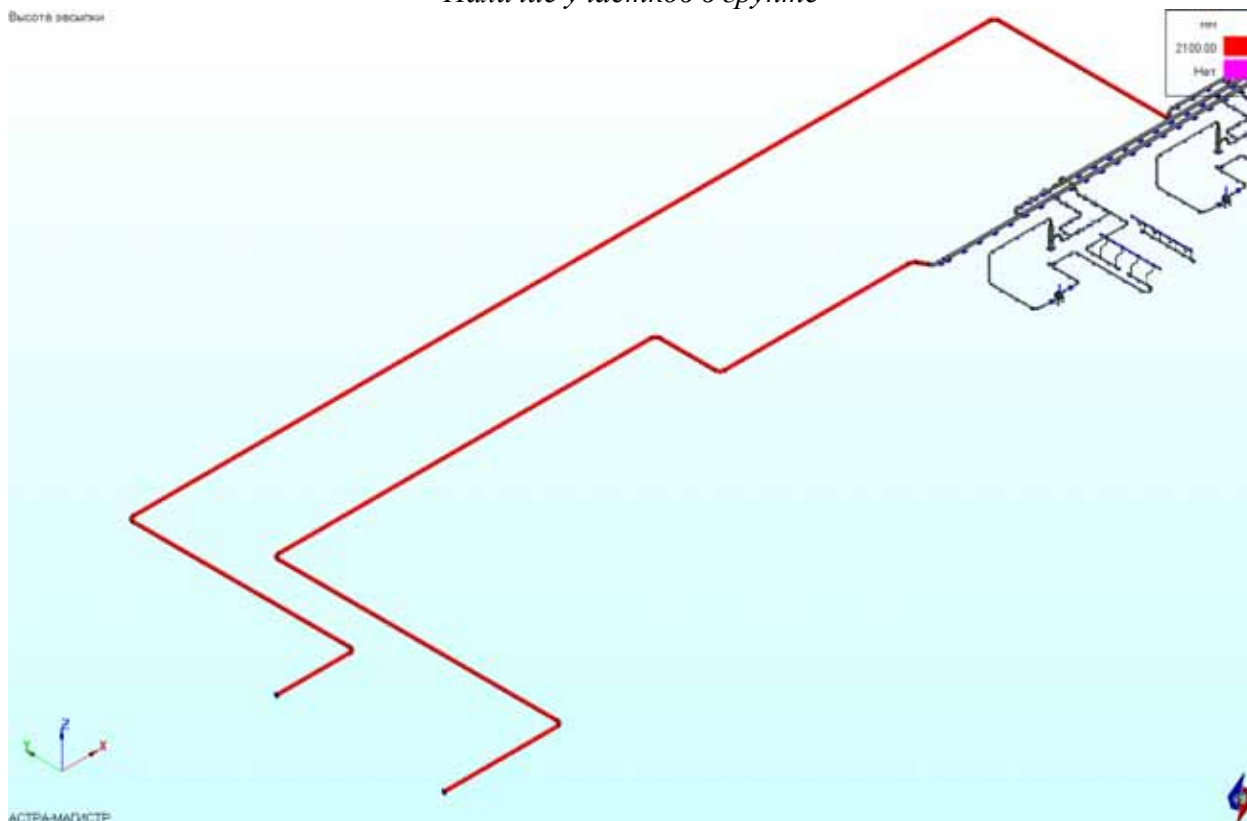


Рис. 2.11 Расчетная модель (АСТРА-АЭС'2009) трубопроводной системы ГКС.
Фрагменты

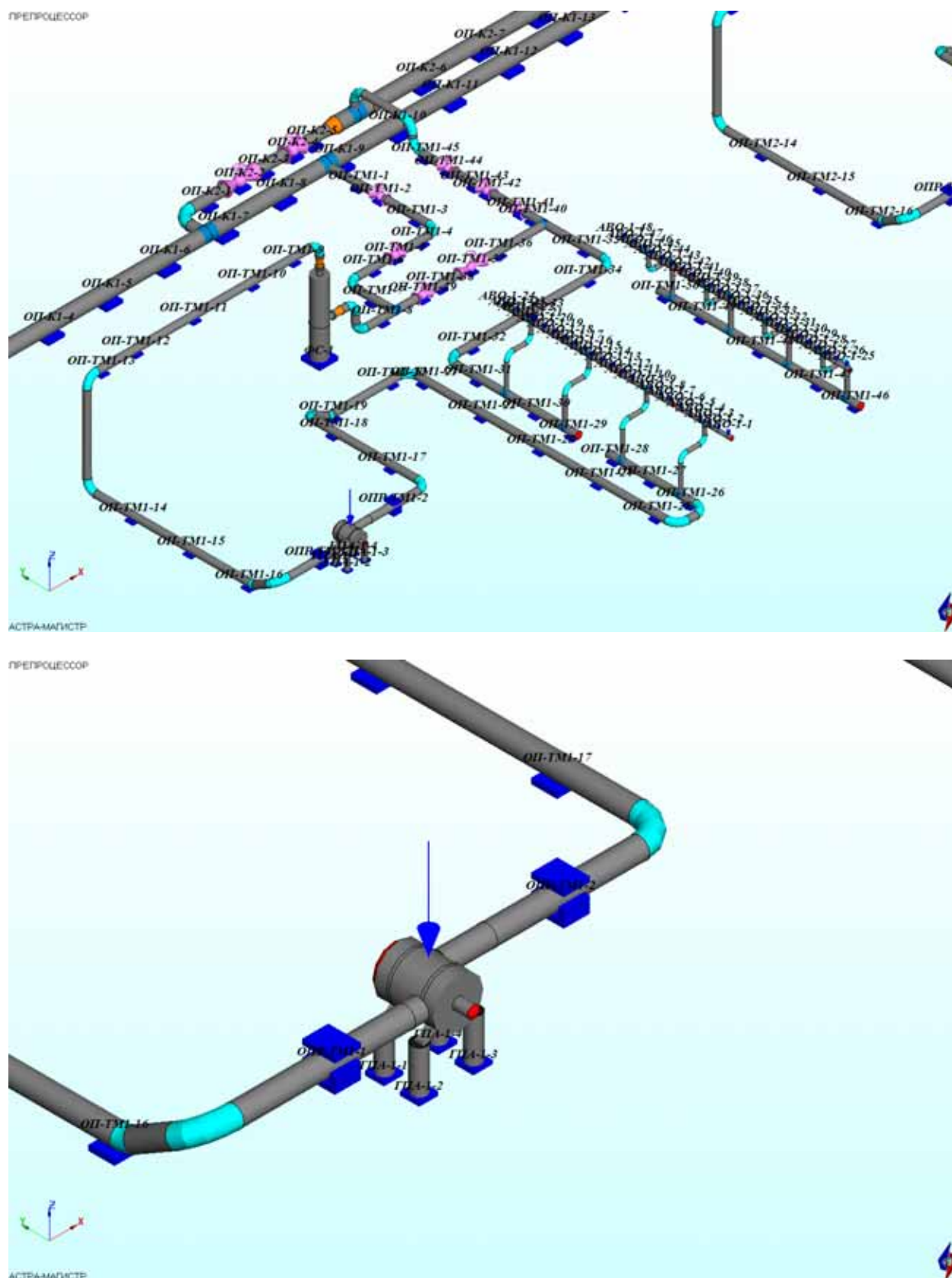


Рис. 2.12 Расчетная модель (АСТРА-АЭС'2009) трубопроводной системы ГКС. Технологический модуль

Перемещения в ГСК (mm). Этап 25 - Все нагрузки в рабочем состоянии.

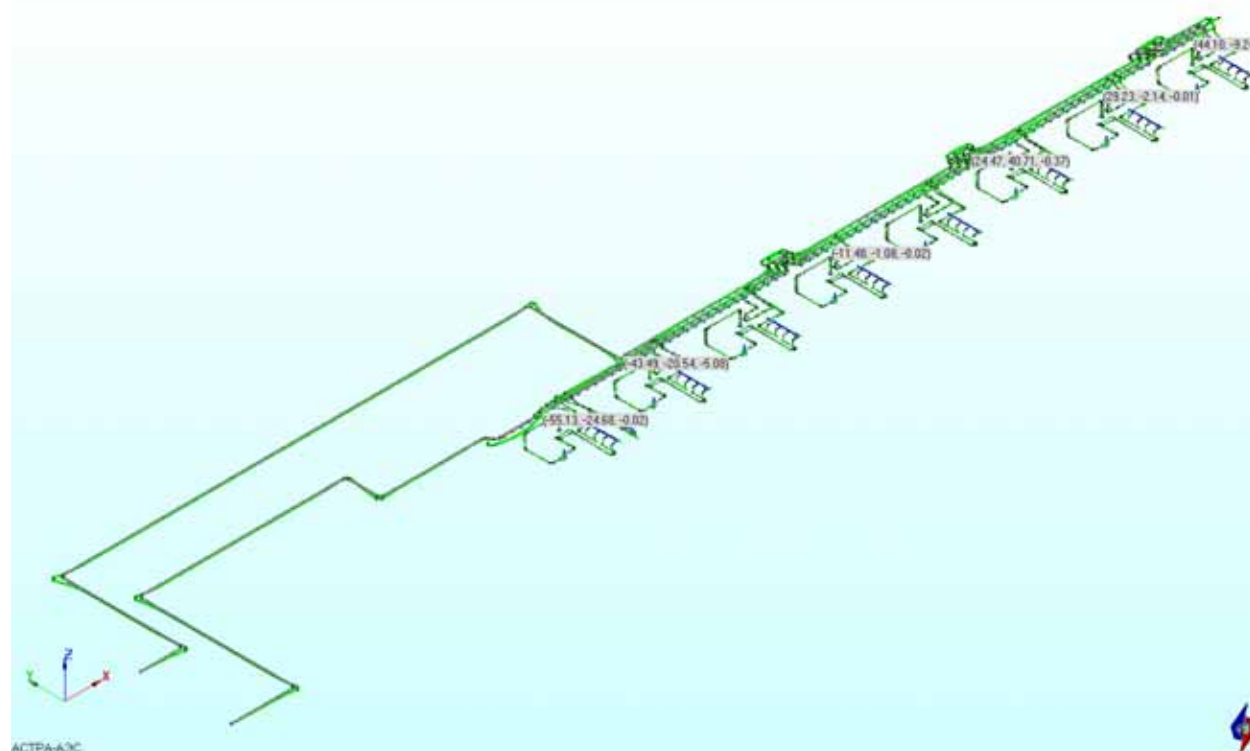


Рис. 2.13 Расчетные перемещения от всех квазистатических нагрузок, мм

Расчетные напряжения (МПа). Этап 1. Группа 2.

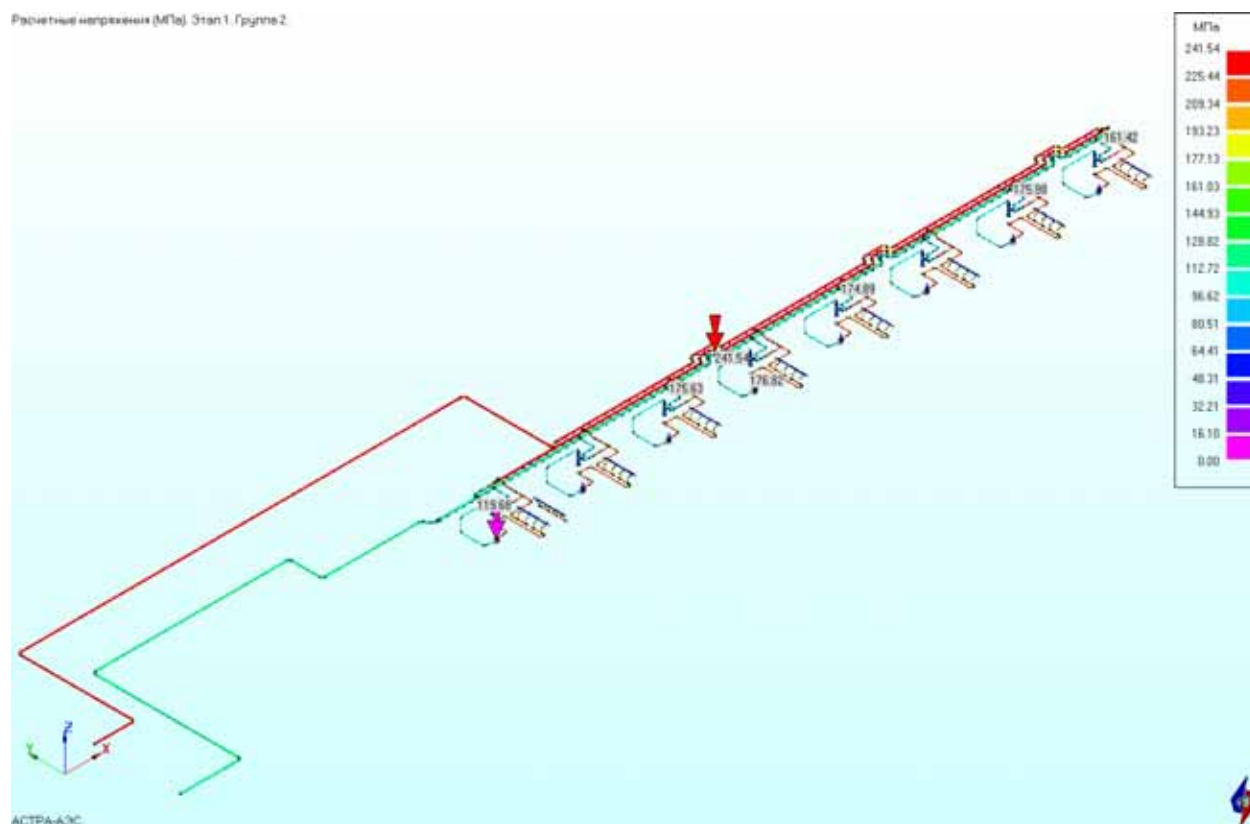


Рис. 2.14 Расчетные мембранные и общие изгибные напряжения от веса и давления (этап 1, группа 2), МПа

Перемещения в ГСК (mm). Этап 3 - Переход из холодного в рабочее состояние

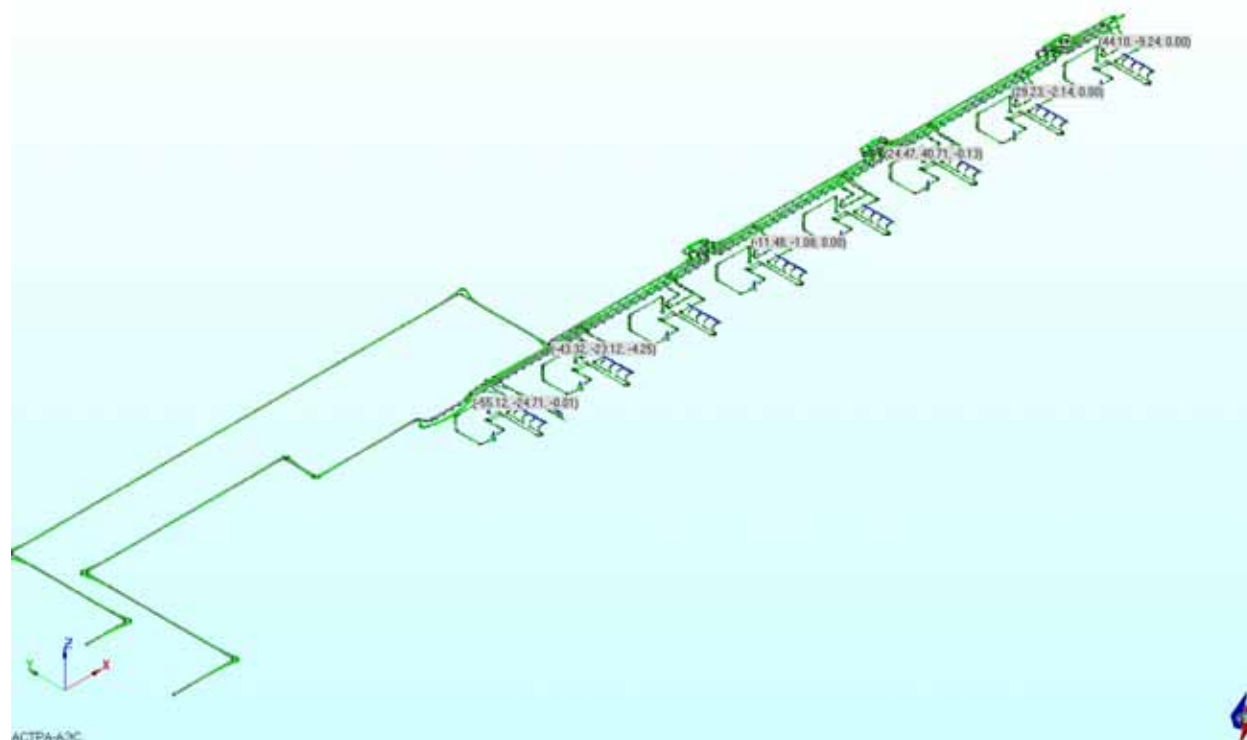


Рис. 2.15 Расчетные перемещения этапа 3 (переход из холодного состояния в рабочее), мм.
Результаты расчета по ПНАЭ Г-7-002–86

Расчетные напряжения (МПа). Этап 3. Группа 3.

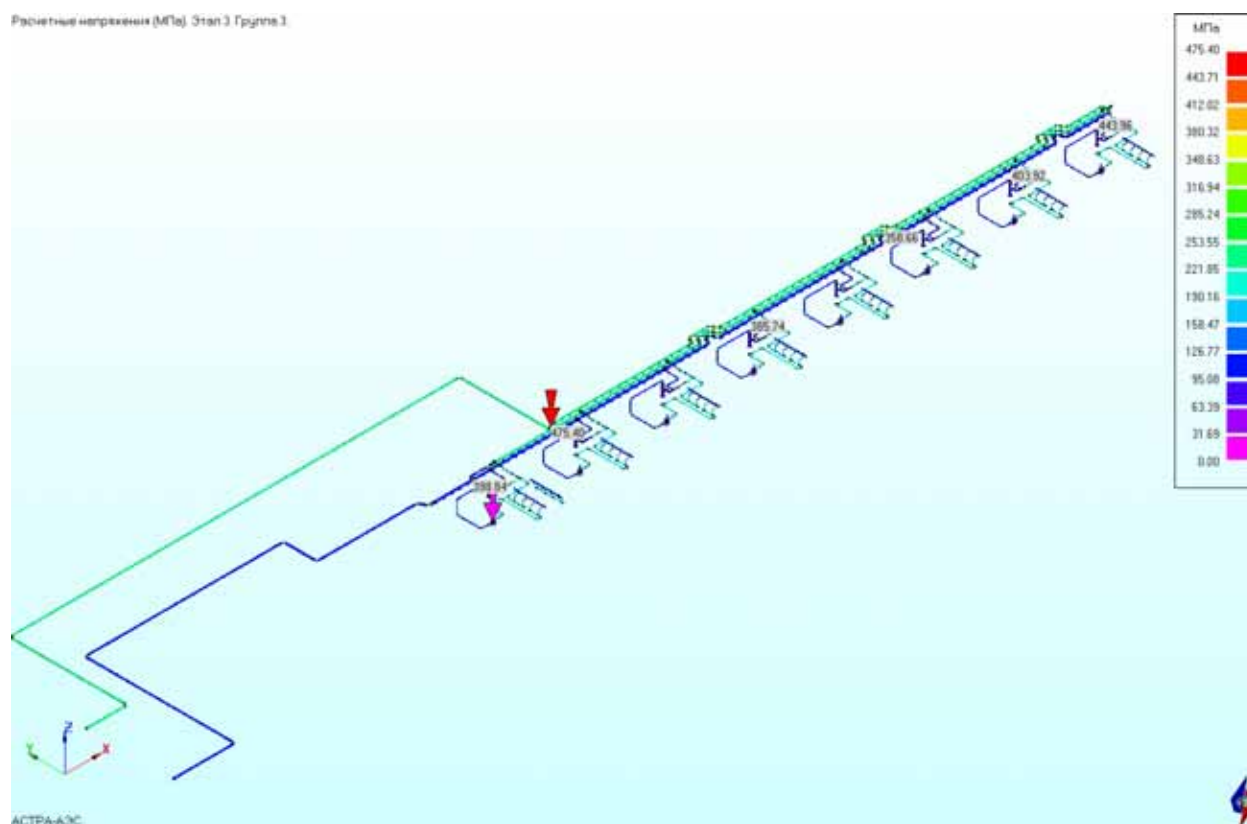


Рис. 2.16 Размахи местных мембранных и изгибных напряжений (этап 3, группа 3).
Результаты расчета по ПНАЭ Г-7-002–86

Таблица 2.1

Собственные частоты в диапазоне до 33 Гц (с учетом трения и отрыва от опор)

Результаты расчета по АСТРА-ФОРМ

| N | - | - | () | | | | | | | |
|-----|--------|--------|---------|-----|--------|--------|--------|---|---|---|
| | | | / | . | | | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 7.2303 | 1.1507 | 15- 831 | 19 | 0.027 | 1.000 | 0.000 | | | |
| 2 | 7.9502 | 1.2653 | 35- 36 | 14 | -0.078 | 1.000 | -0.001 | | | |
| 3 | 9.2006 | 1.4643 | 15- 831 | 33 | -0.048 | 1.000 | 0.000 | | | |
| 4 | 9.5711 | 1.5233 | 27- 28 | 16 | -0.045 | 1.000 | 0.000 | | | |
| 5 | 10.275 | 1.6353 | 33- 34 | 10 | 0.028 | -1.000 | -0.003 | | | |
| 6 | 10.428 | 1.6597 | 15- 831 | 67 | -0.019 | -1.000 | 0.000 | | | |
| 7 | 10.512 | 1.6731 | 29- 30 | 10 | 0.003 | -1.000 | 0.000 | | | |
| 8 | 10.756 | 1.7119 | 21- 22 | 11 | -0.003 | -1.000 | 0.000 | | | |
| 9 | 10.785 | 1.7166 | 31- 32 | 13 | -0.008 | -1.000 | -0.002 | | | |
| 10 | 10.842 | 1.7256 | 34- 35 | 14 | -0.118 | 1.000 | 0.000 | | | |
| ... | | | | | | | | | | |
| 750 | 201.29 | 32.037 | 24- 440 | 1 | 1.000 | -0.037 | 0.000 | | | |
| 751 | 202.10 | 32.166 | 24- 440 | 1 | -1.000 | 0.035 | 0.000 | | | |
| 752 | 203.15 | 32.333 | 28- 792 | 1 | -1.000 | 0.029 | 0.000 | | | |
| 753 | 204.41 | 32.534 | 20- 831 | 98 | -0.007 | -1.000 | 0.000 | | | |
| 754 | 204.99 | 32.626 | 1- 830 | 9 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | | | |
| 755 | 205.21 | 32.660 | 15- 831 | 103 | -0.083 | -1.000 | 0.000 | | | |
| 756 | 205.53 | 32.711 | 15- 831 | 49 | -0.004 | 1.000 | 0.000 | | | |
| 757 | 205.55 | 32.714 | 5- 29 | 17 | -0.022 | -1.000 | 0.588 | | | |
| 758 | 206.41 | 32.852 | 24- 440 | 1 | -1.000 | 0.027 | 0.000 | | | |
| 759 | 207.34 | 32.999 | 20- 831 | 6 | 0.002 | 1.000 | 0.000 | | | |

Примечание:

 - Максимальный элемент формы колебаний

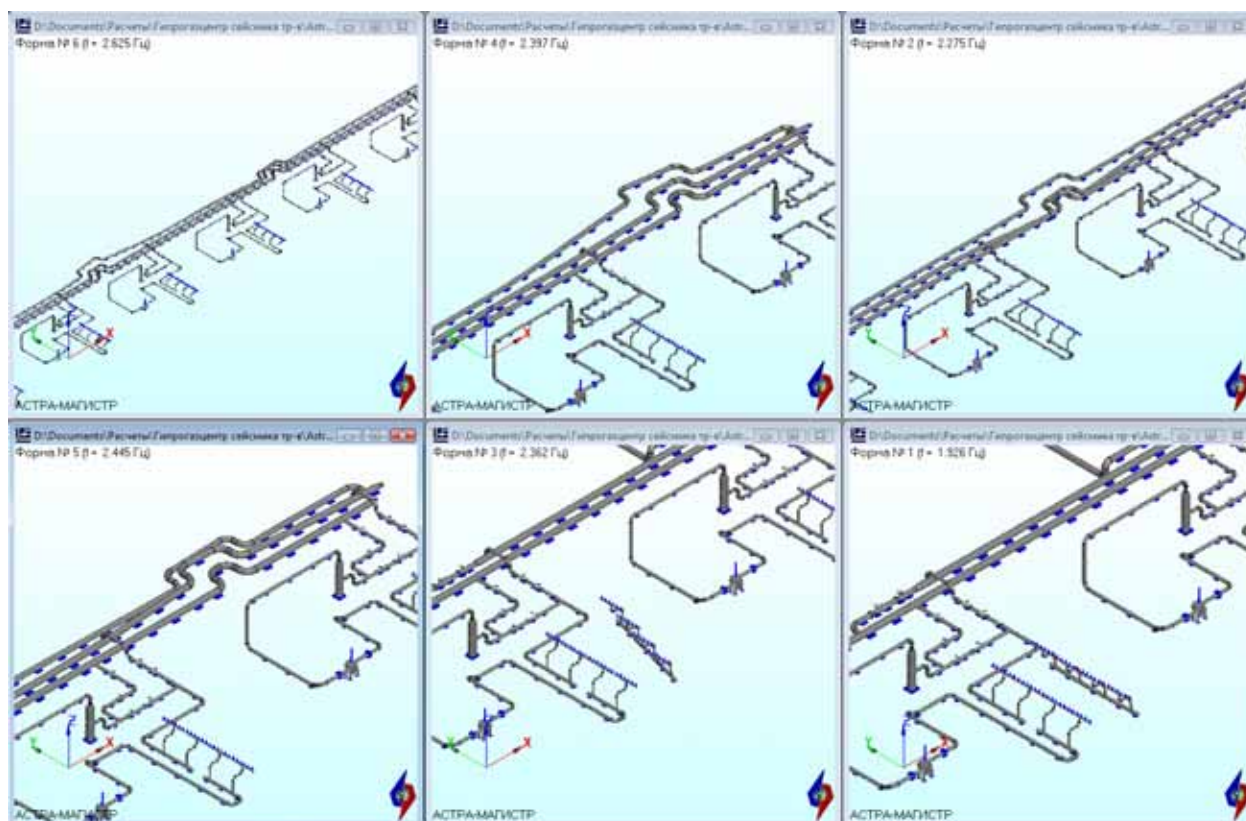


Рис. 2.17 Первые шесть собственных форм колебаний

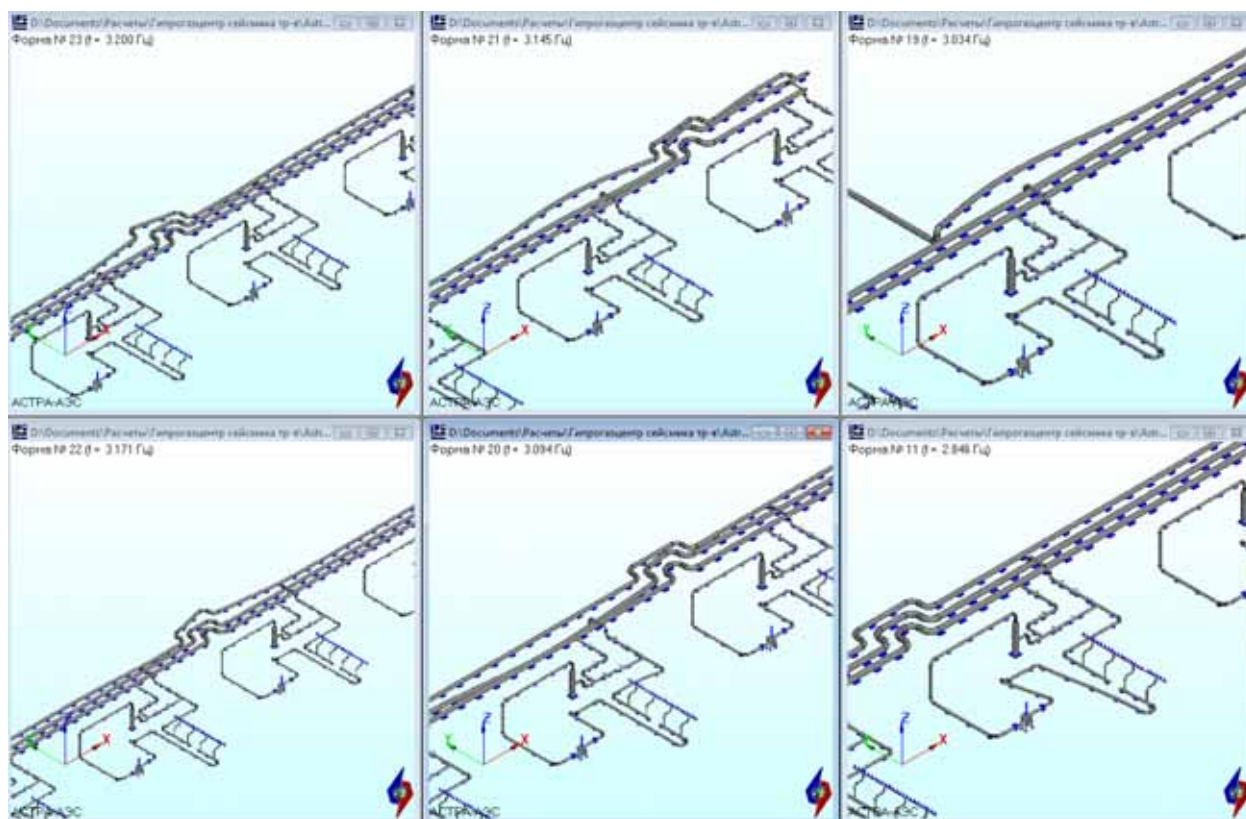


Рис. 2.18 Собственные формы колебаний в диапазоне 2.84 – 3.2 Гц

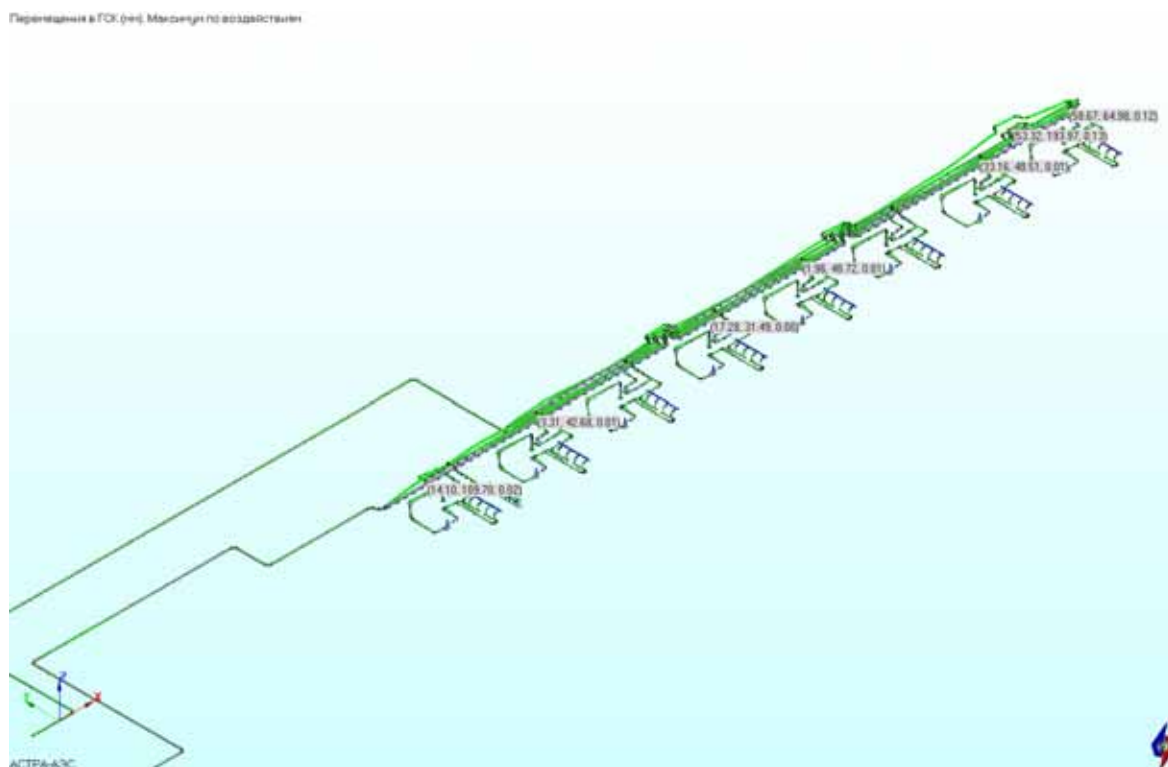


Рис. 2.19 Расчетные сейсмические перемещения, мм (масштабный коэффициент 38).
Максимум по воздействиям (спектры ответа, 9 баллов)

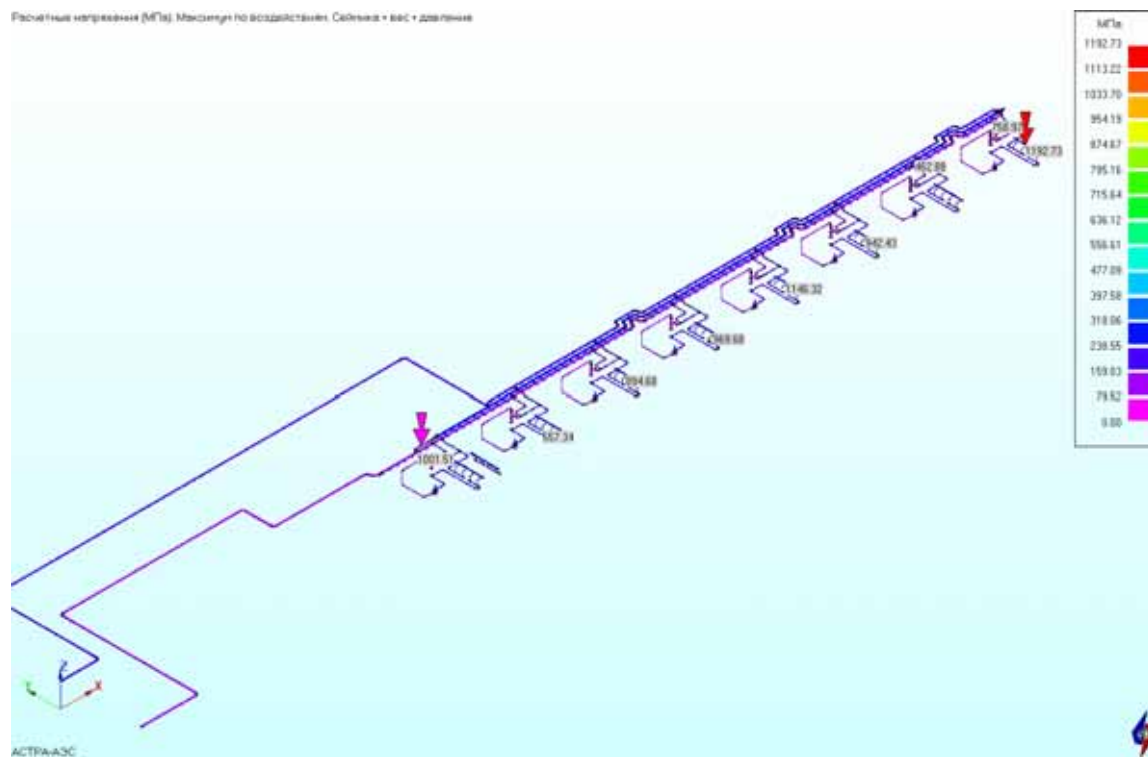


Рис. 2.20 Суммарные расчетные напряжения от сейсмических воздействий, веса и давления, МПа. Максимум по воздействиям (спектры ответа, 9 баллов)

Относительные напряжения. Максимум по воздействиям. Сейсмик + вес + давление.

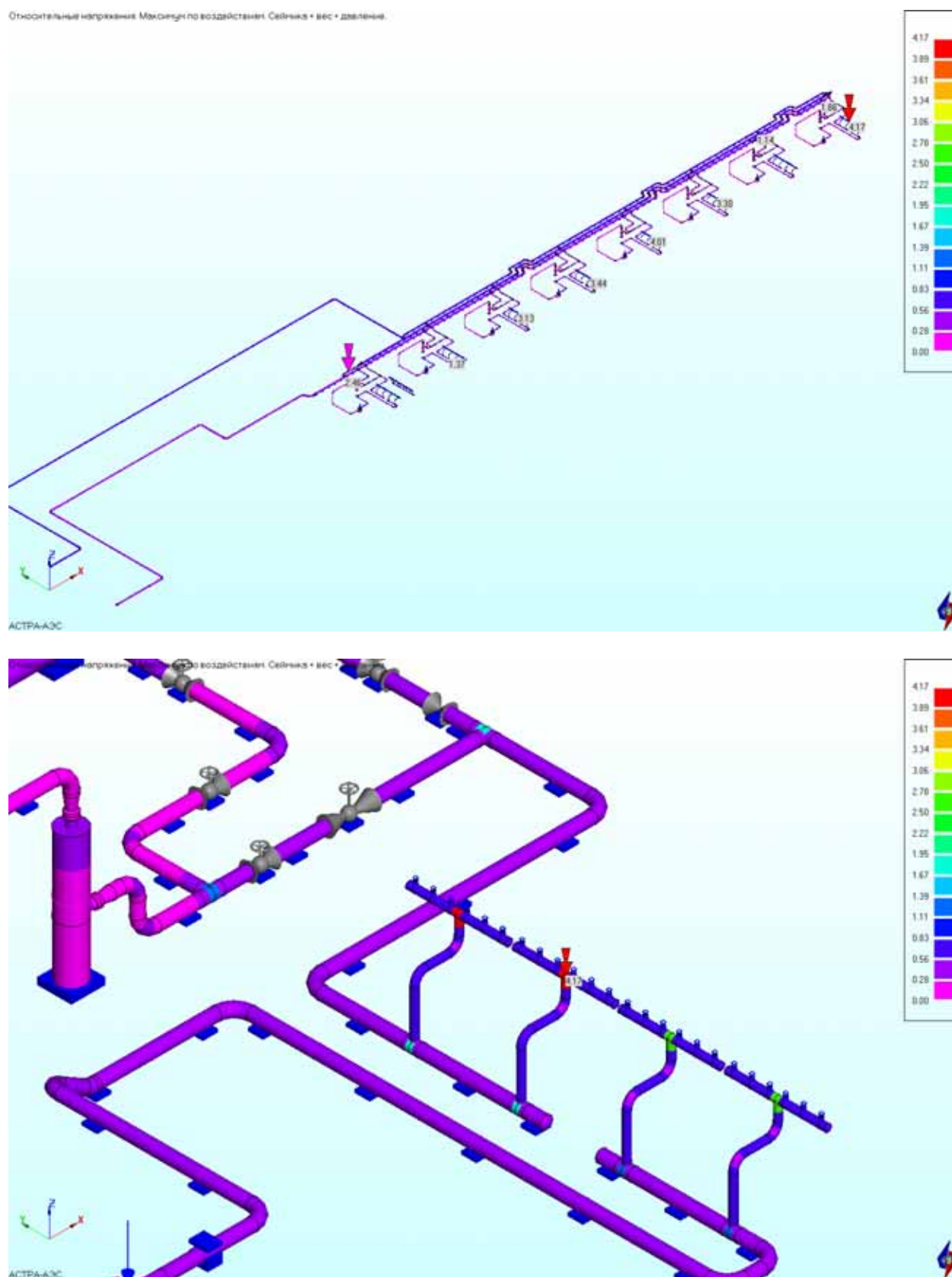


Рис. 2.21 Суммарные относительные напряжения от сейсмических нагрузок, веса и давления. Максимум по воздействиям (спектры ответа, 9 баллов)

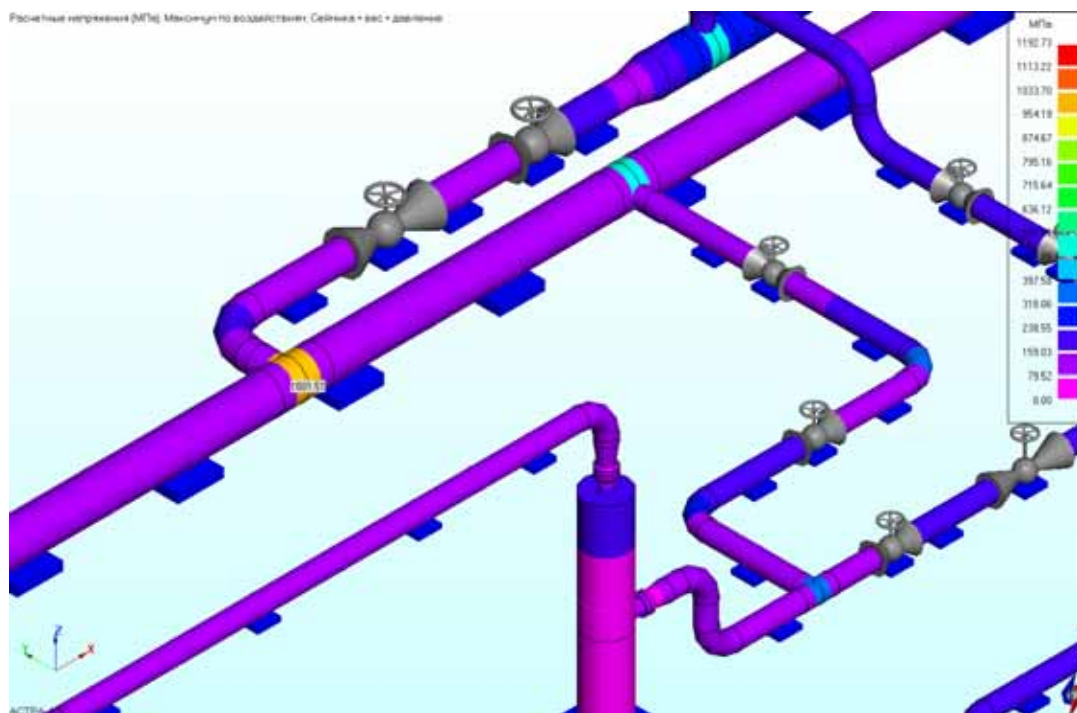


Рис. 2.22 Расчетные напряжения в тройнике от сейсмических нагрузок, веса и давления. АСТРА-СЕЙСМ

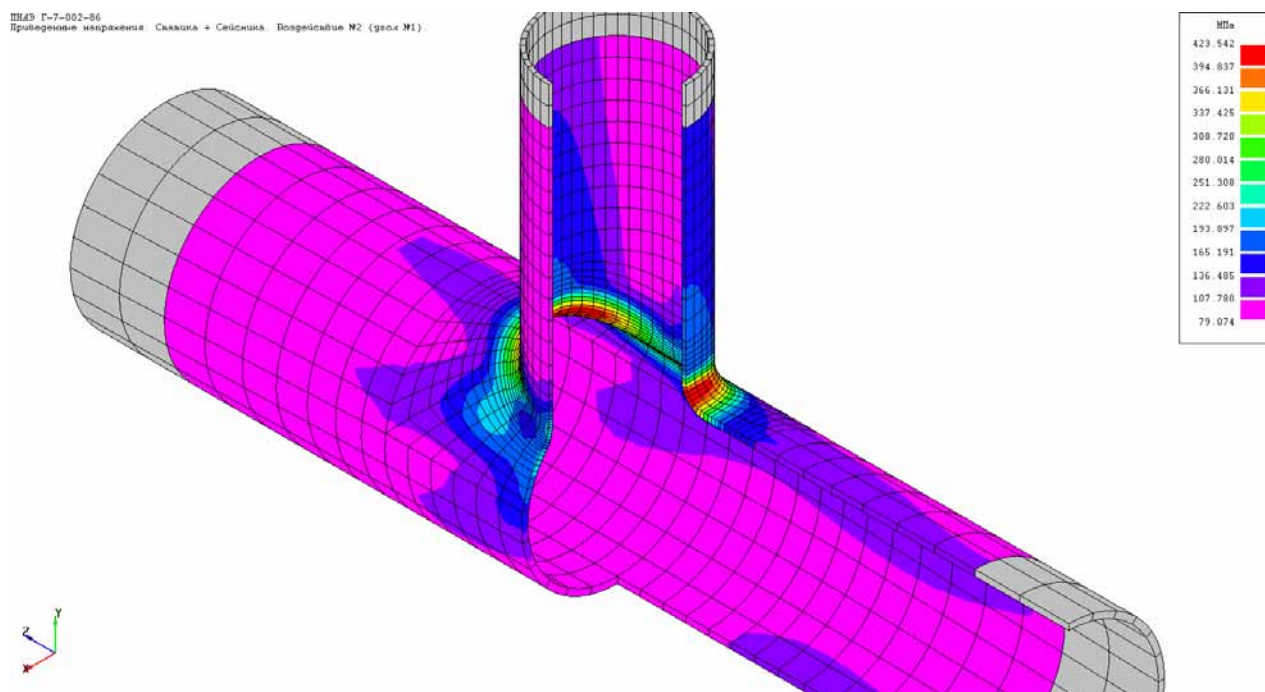


Рис. 2.23 Расчетные напряжения от статических и сейсмических нагрузок (сейсмика + группа 2), МПа. АСТРА-СТАДИО

3. Опыт применения ПК АСТРА-АЭС'2009 в практике проектных расчетов трубопроводных систем АЭУ (ОАО “Атомэнергопроект”, 2001-2009 гг.)

Трубопроводные системы, важных для безопасности АЭС с реакторами РБМК, ВВЭР и нового поколения, расчетное обоснование прочности которых выполнено по ПК АСТРА-АЭС различных версий с 1977 г. в “Гидропроекте”, Московском и Центральном отделениях “Атомэнергопроект” (с 1989 г. – в “Атомэнергопроекте”), давно исчисляются тысячами. Что не удивительно, принимая во внимание и количество интенсивно эксплуатируемых рабочих мест (и пользователей) в БКП-6, БКП-7 и региональных отделениях – сегодня около 30-и.

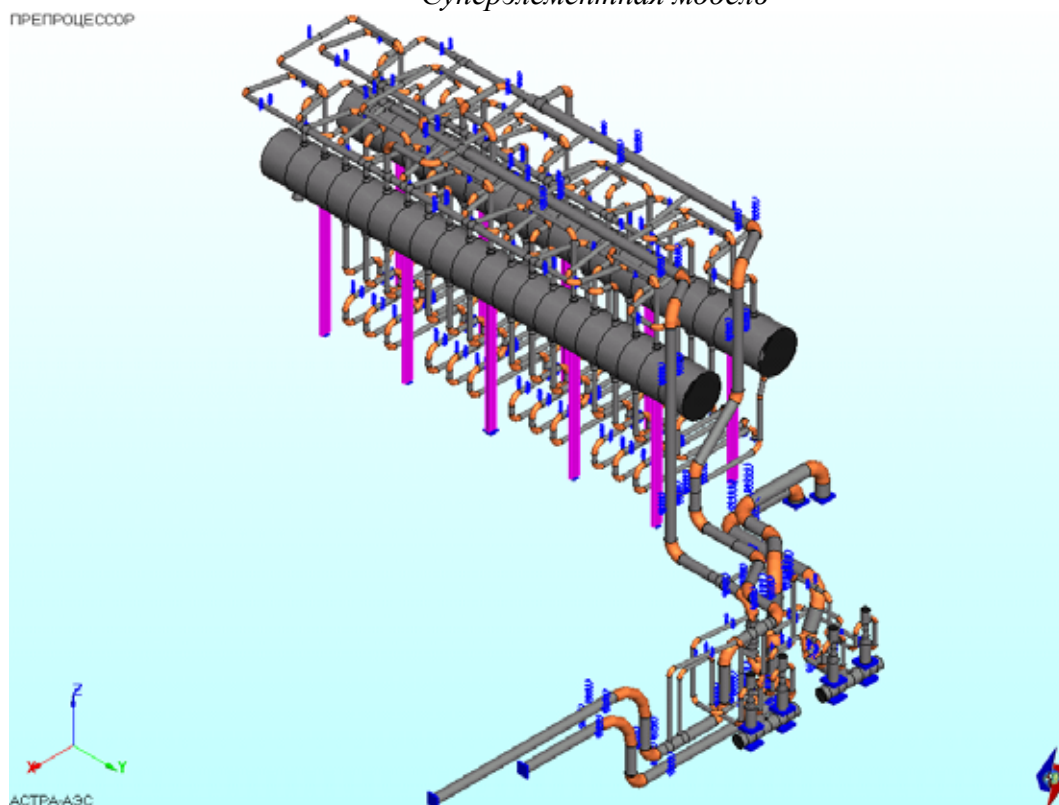
В настоящем разделе представлено несколько показательных моделей (и соответствующих результатов расчета по АСТРА-АЭС'2009) трубопроводных систем АЭС с РБМК, разработанных в ОАО “Атомэнергопроект”.

В таблице 3.1 приведены размерности расчетных АСТРА-моделей.

Таблица 3.1

| Размерности расчетных моделей | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------|-------------|-----------------|-------------------------------------|
| № | Название | Число участков | Число узлов | Число элементов | Число динамических степеней свободы |
| 1 | Сепаратор пара с обвязкой 1 | 219 | 183 | 2000 | 1567 – 6211 |
| 2 | Сепаратор пара с обвязкой 2 | 190 | 184 | 1680 | 2438 – 8732 |
| 3 | Сепаратор пара с обвязкой 3 | 379 | 320 | 3069 | 11034 |
| 4 | КМПЦ | 247 | 233 | 2920 | 7092 |
| 5 | Техвода | 394 | 375 | 3543 | 8811 |

Суперэлементная модель



Динамическая модель

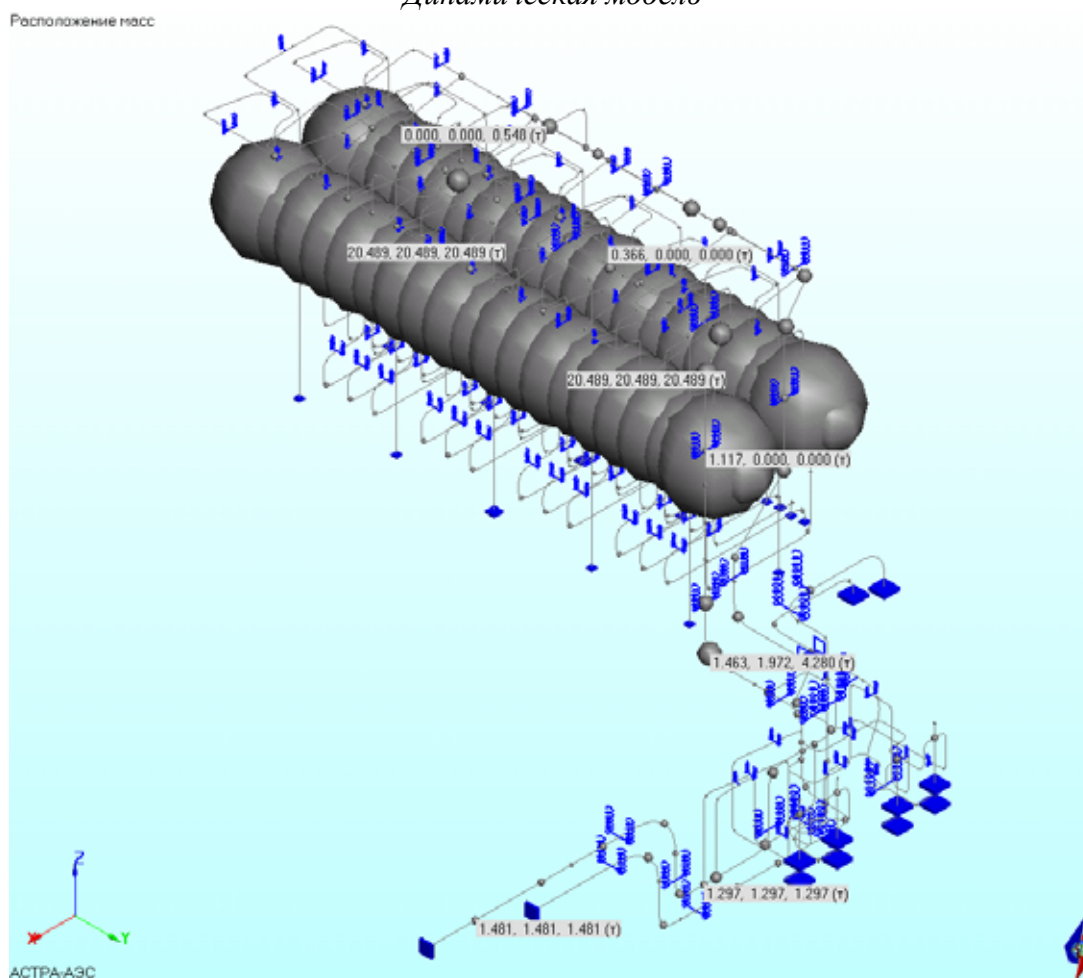


Рис. 3.1 Расчетная АСТРА-модель ТС АЭП №1

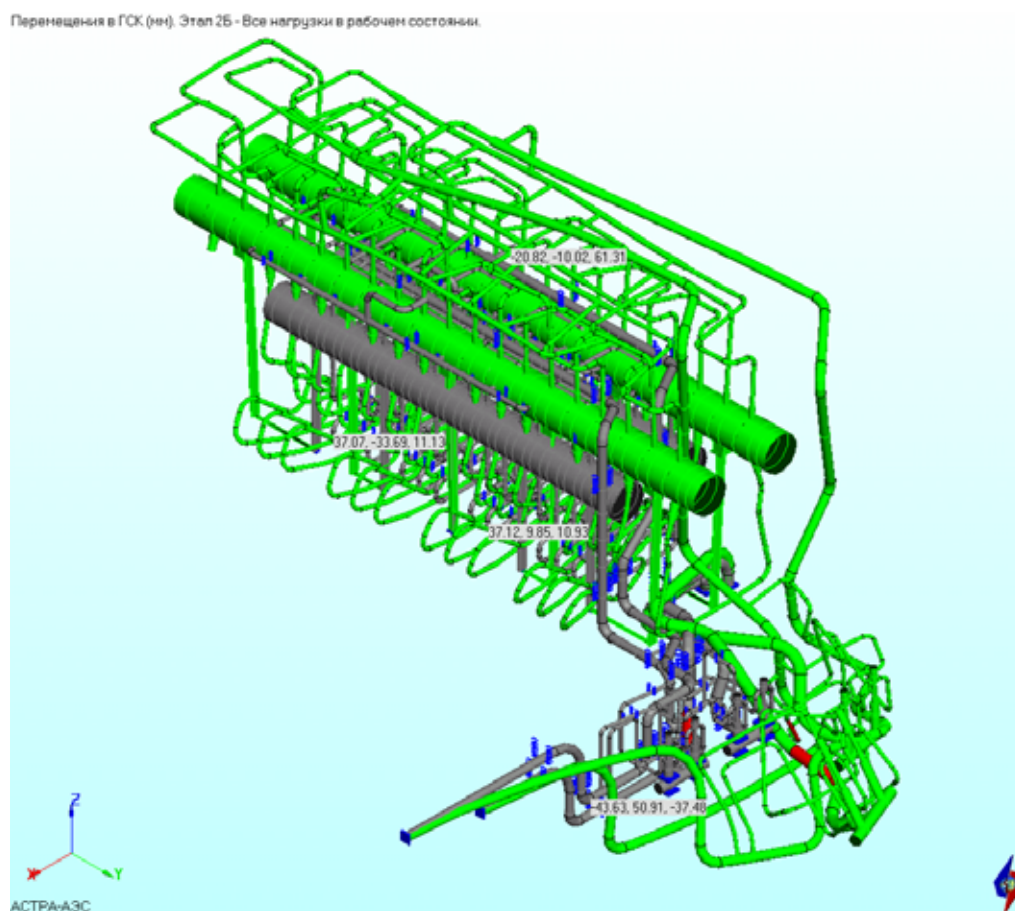


Рис. 3.2 ТС АЭП №1. Расчетная деформированная схема (перемещения – в мм)

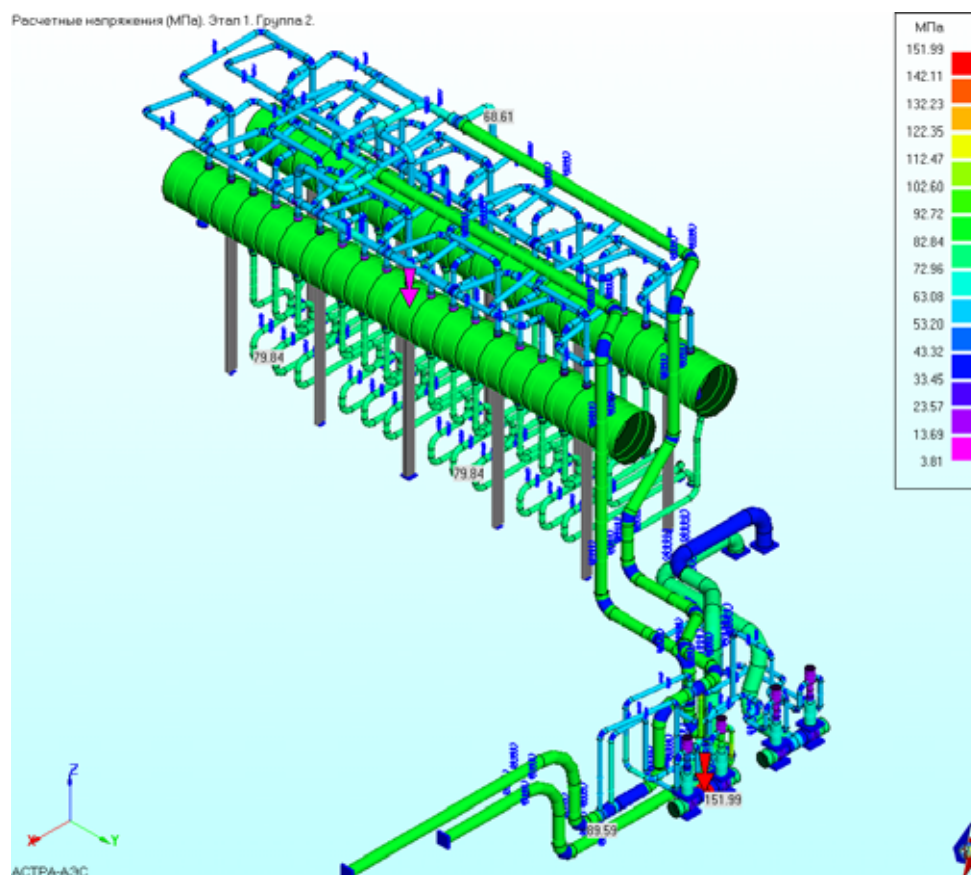
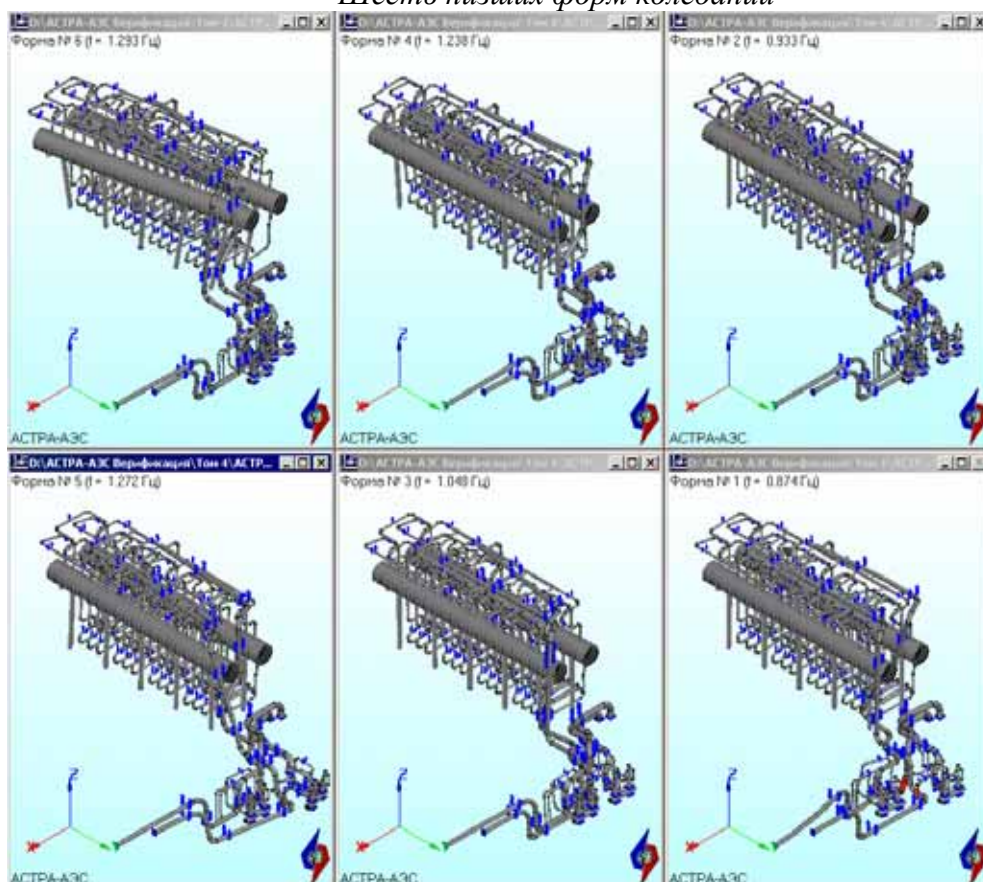


Рис. 3.3 ТС АЭП №1. Расчетные напряжения группы $(\sigma)_2$, МПа

Шесть низших форм колебаний



Кратные формы

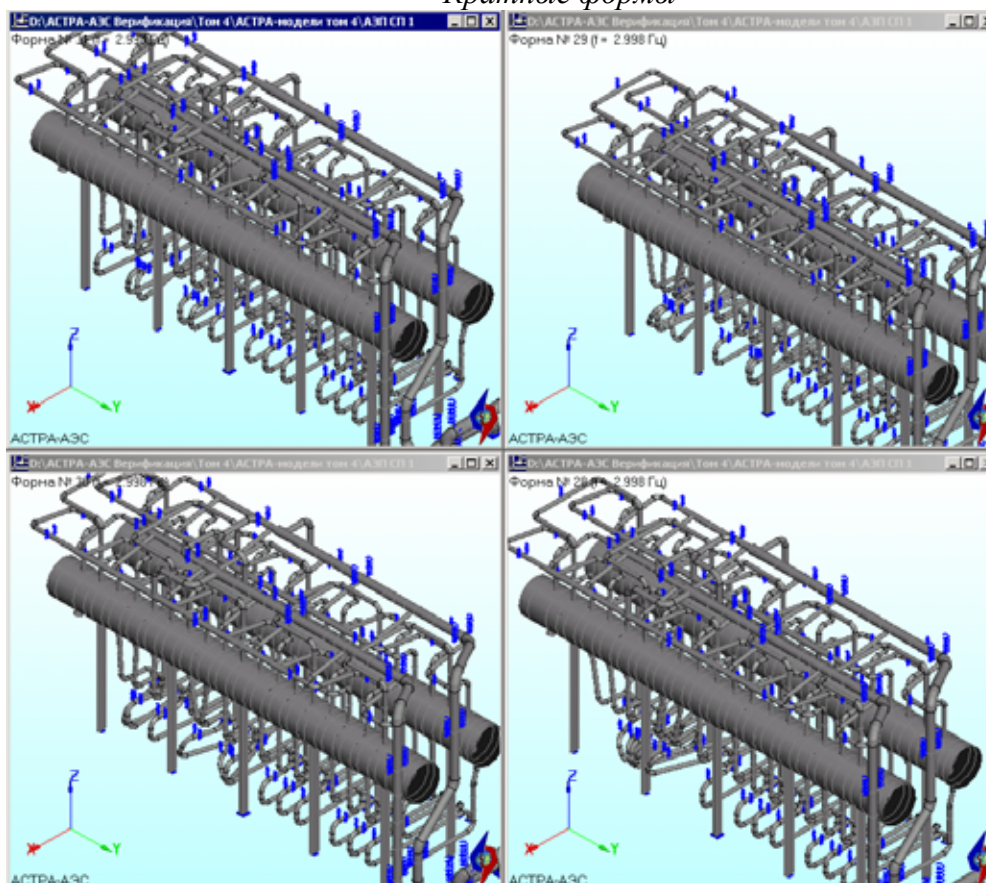


Рис. 3.4 ТС АЭП №1. Расчетные формы колебаний

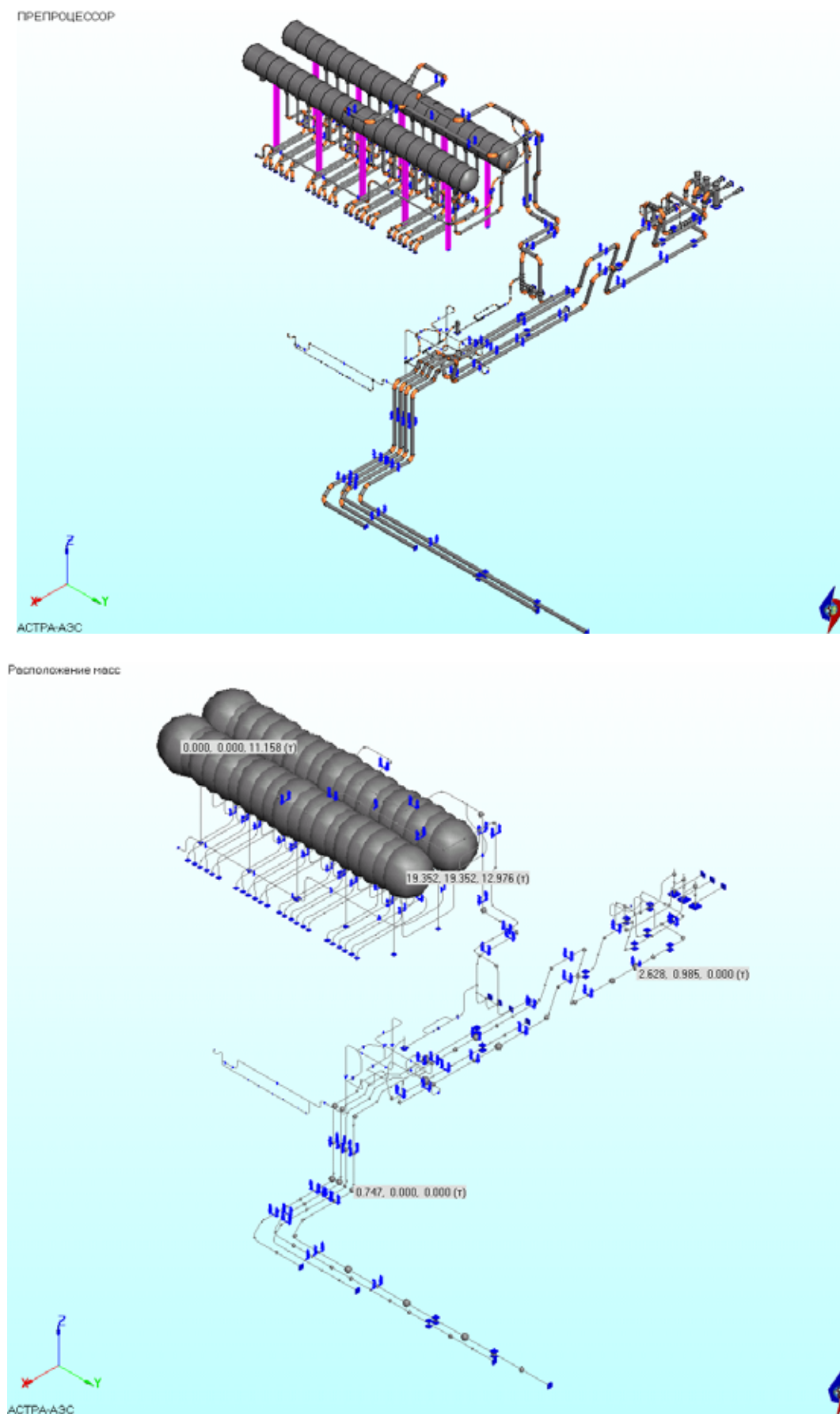


Рис. 3.5 Расчетная АСТРА-модель ТС АЭП №2

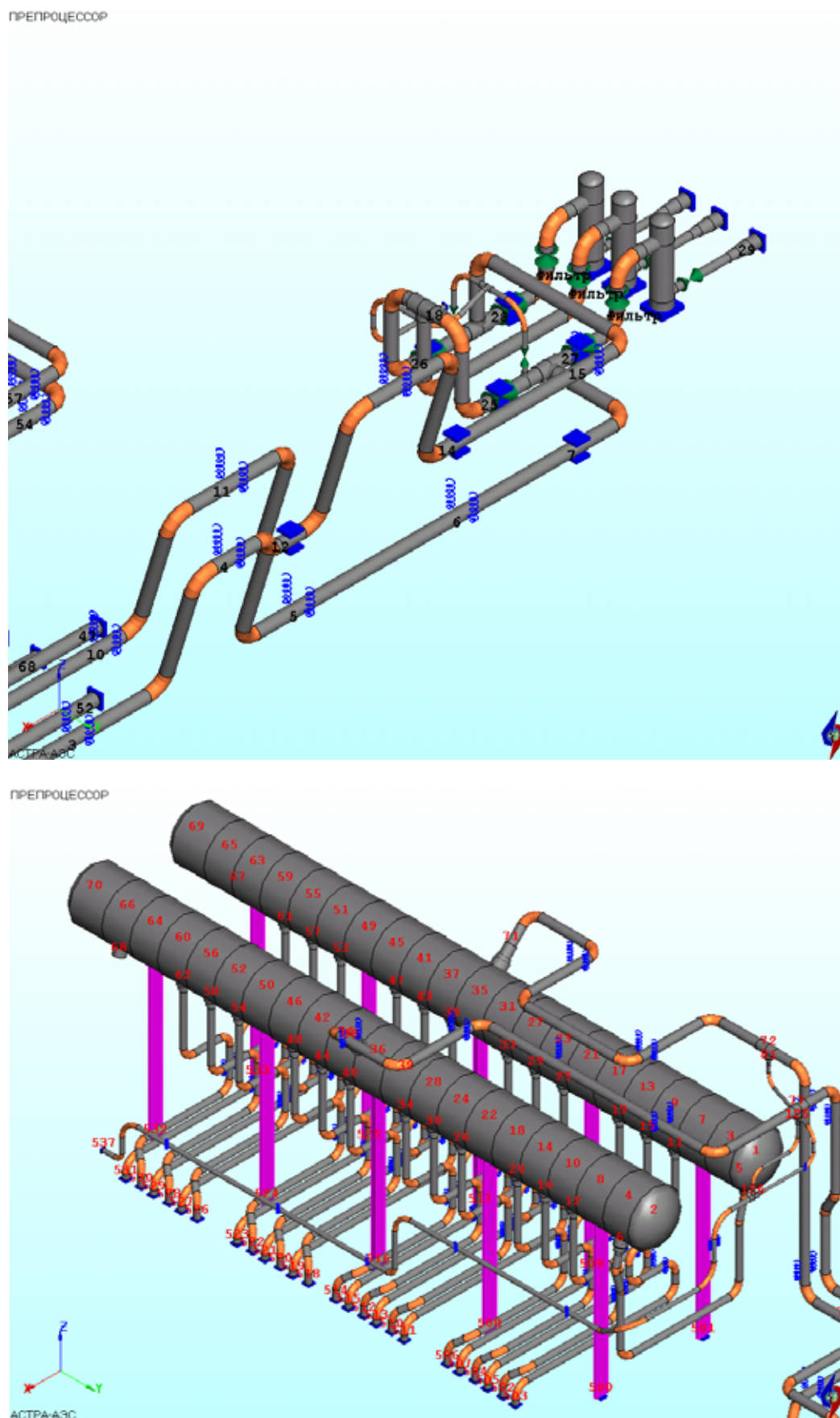


Рис. 3.6 Расчетная АСТРА-модель ТС АЭП №2. Фрагменты

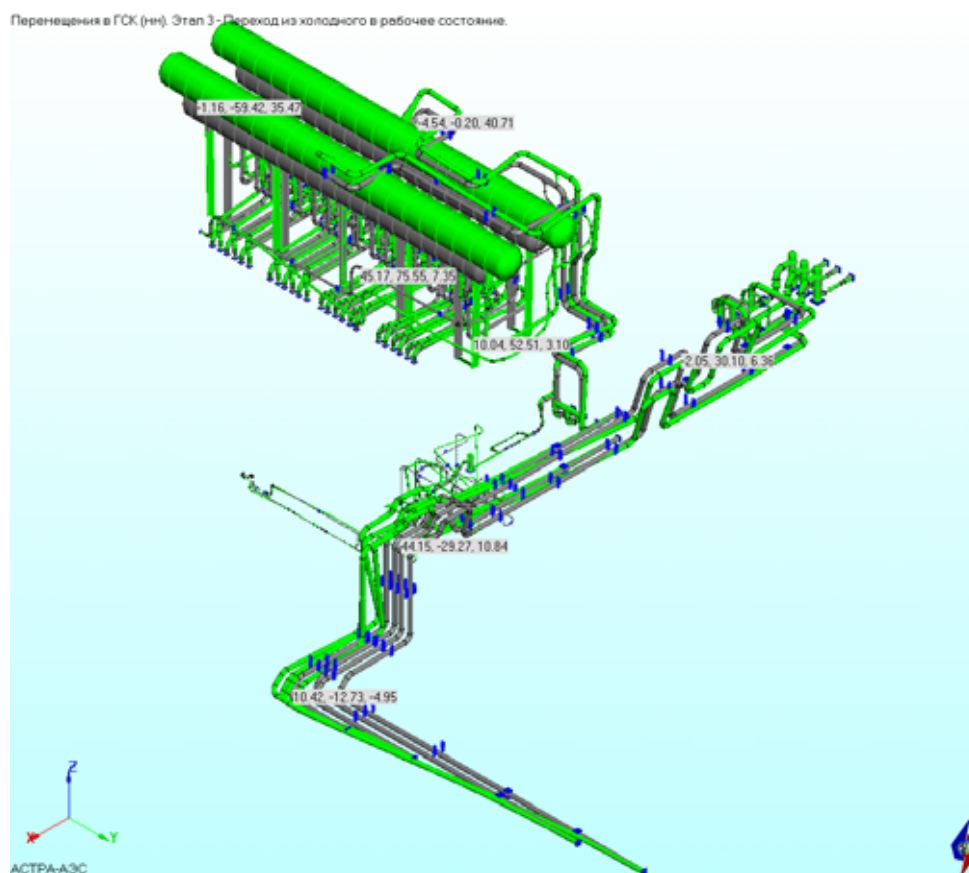


Рис. 3.7 ТС АЭП № 2. Расчетная деформированная схема (перемещения – в мм)

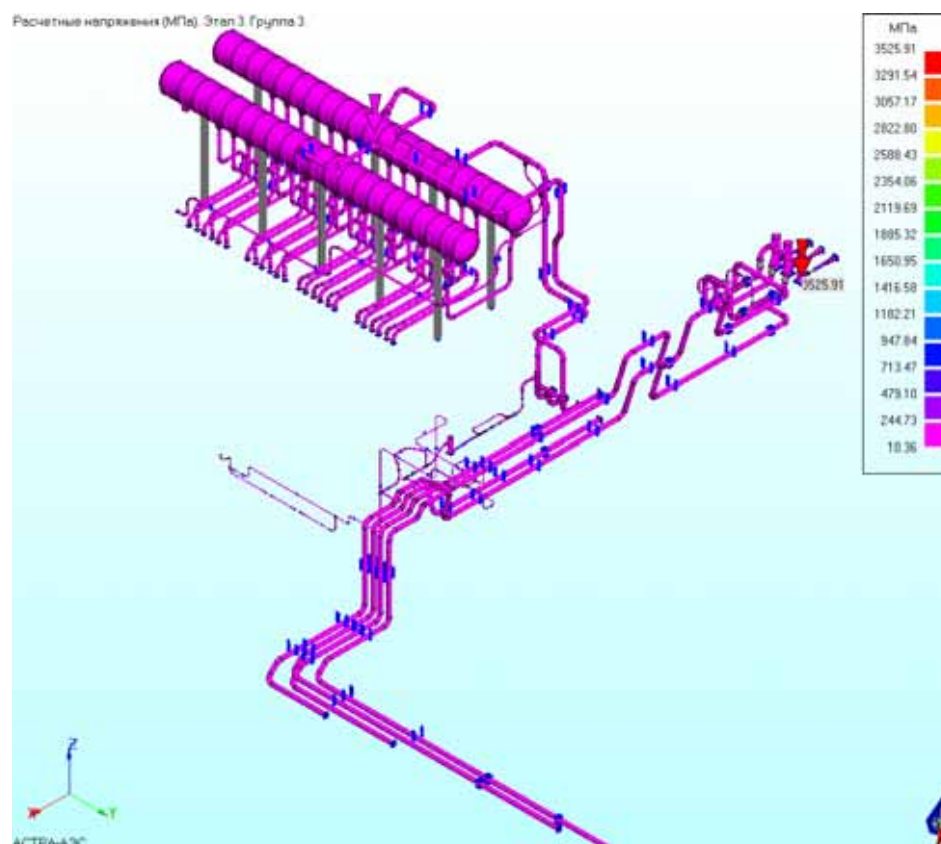


Рис. 3.8 ТС АЭП № 2. Расчетные напряжения группы ($\sigma_{РК}$, МПа

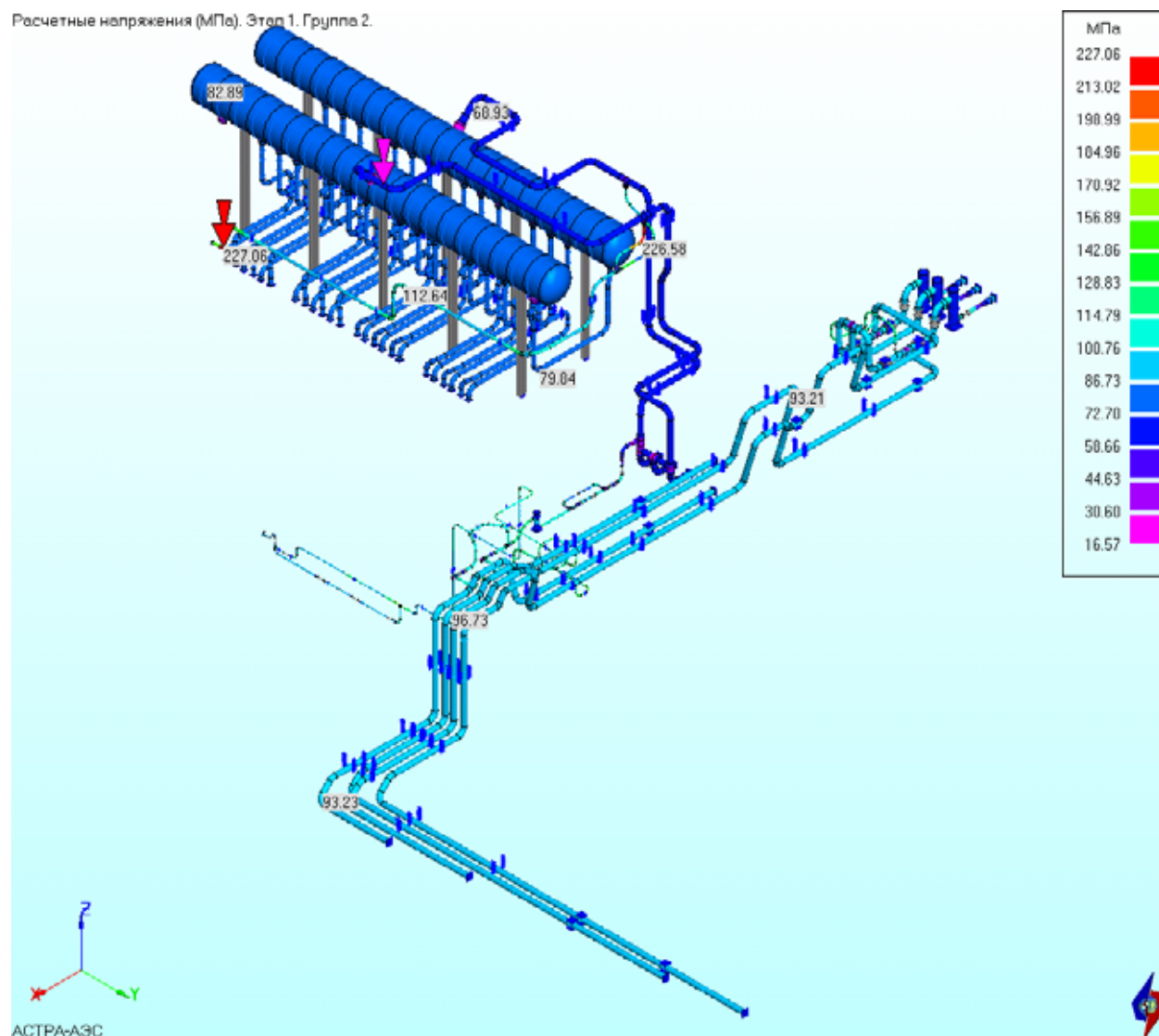
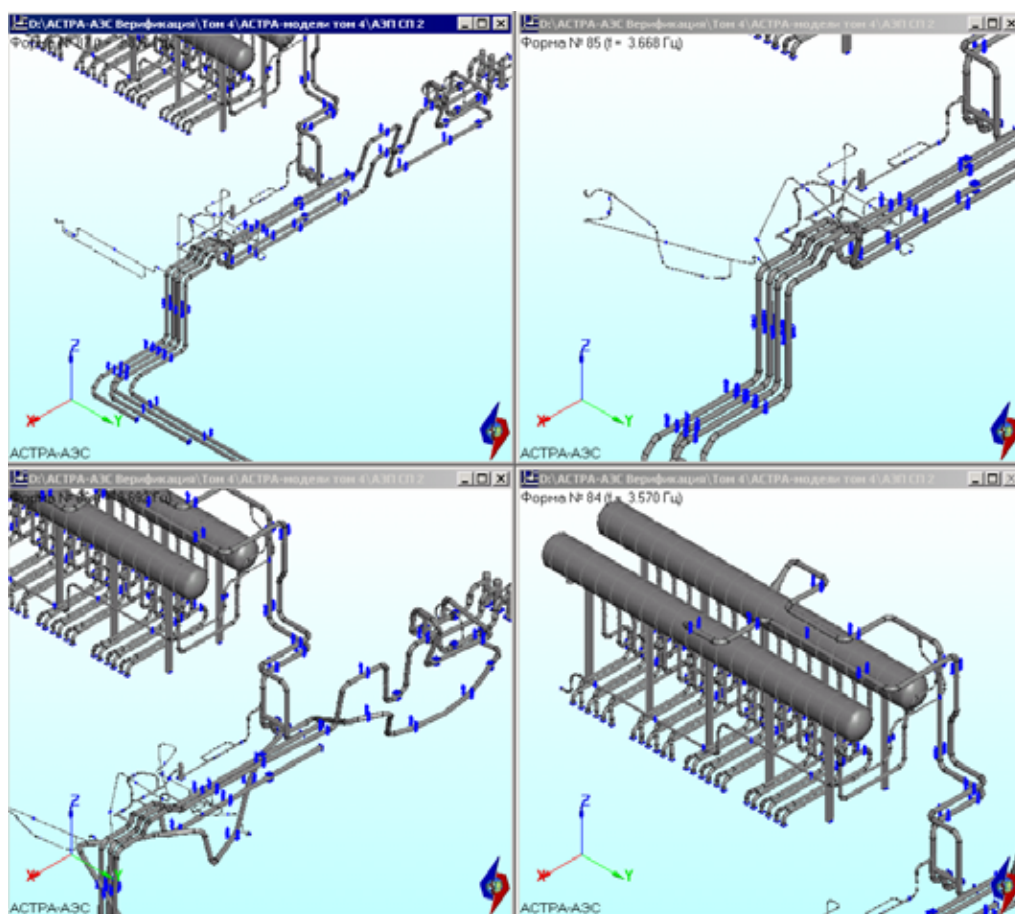


Рис. 3.9 ТС АЭП № 2. Расчетные напряжения группы $(\sigma)_2$, МПа



Кратные формы

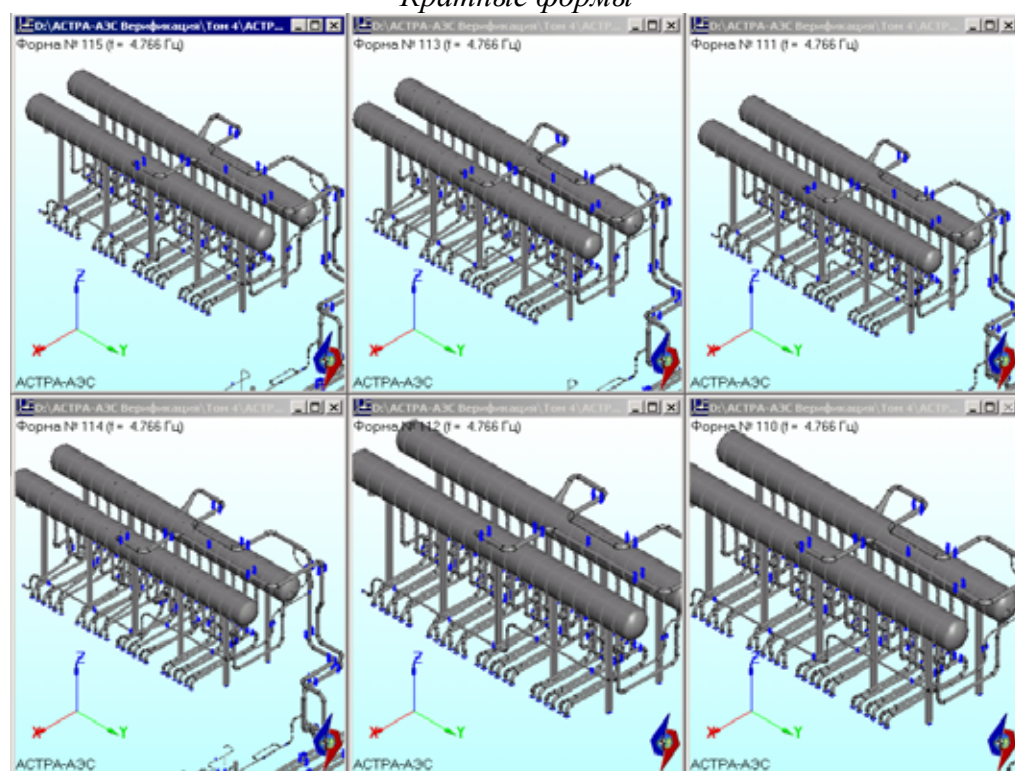


Рис. 3.10 ТС АЭП №2. Расчетные формы колебаний

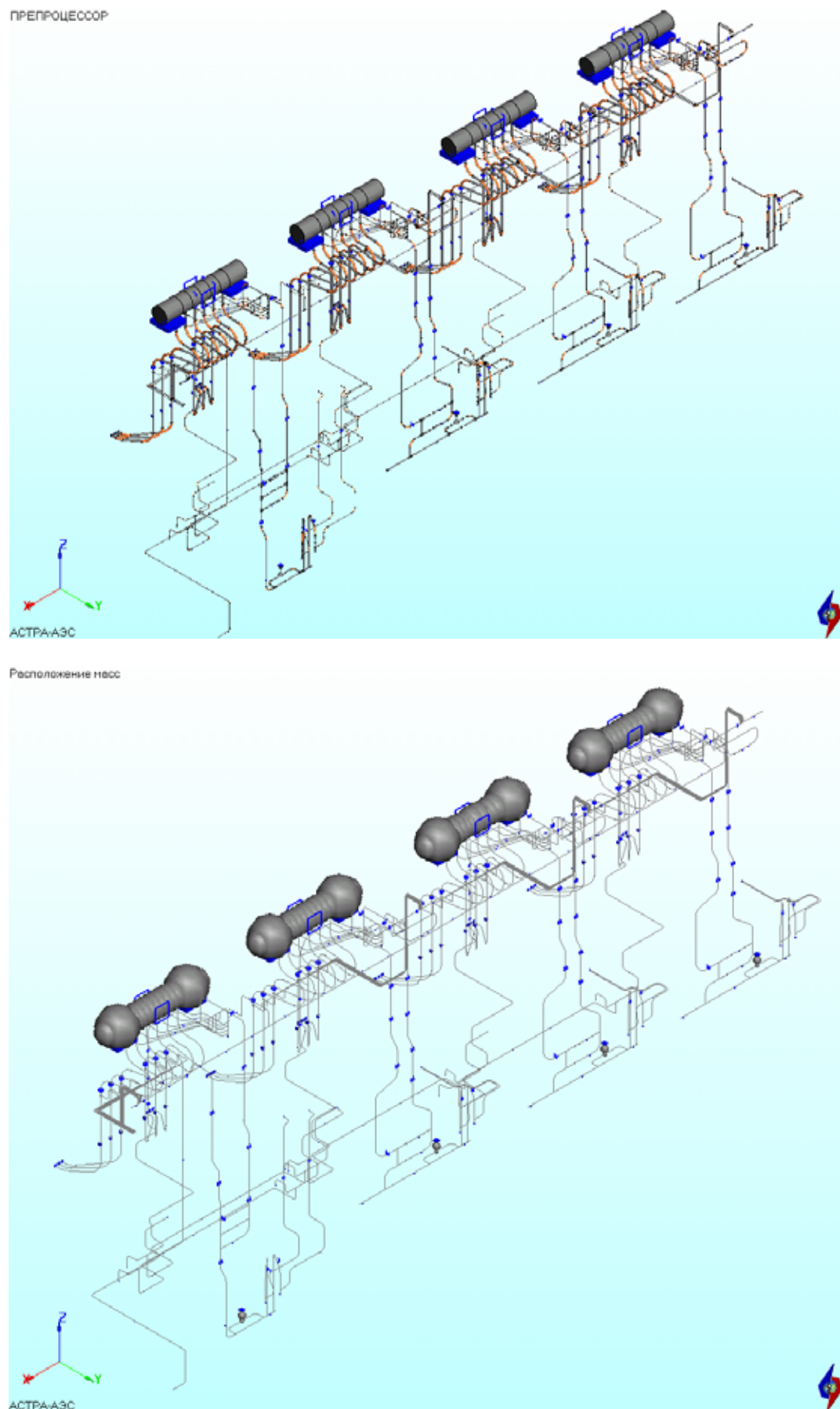


Рис. 3.11 Расчетная АСТРА-модель ТС АЭП №3

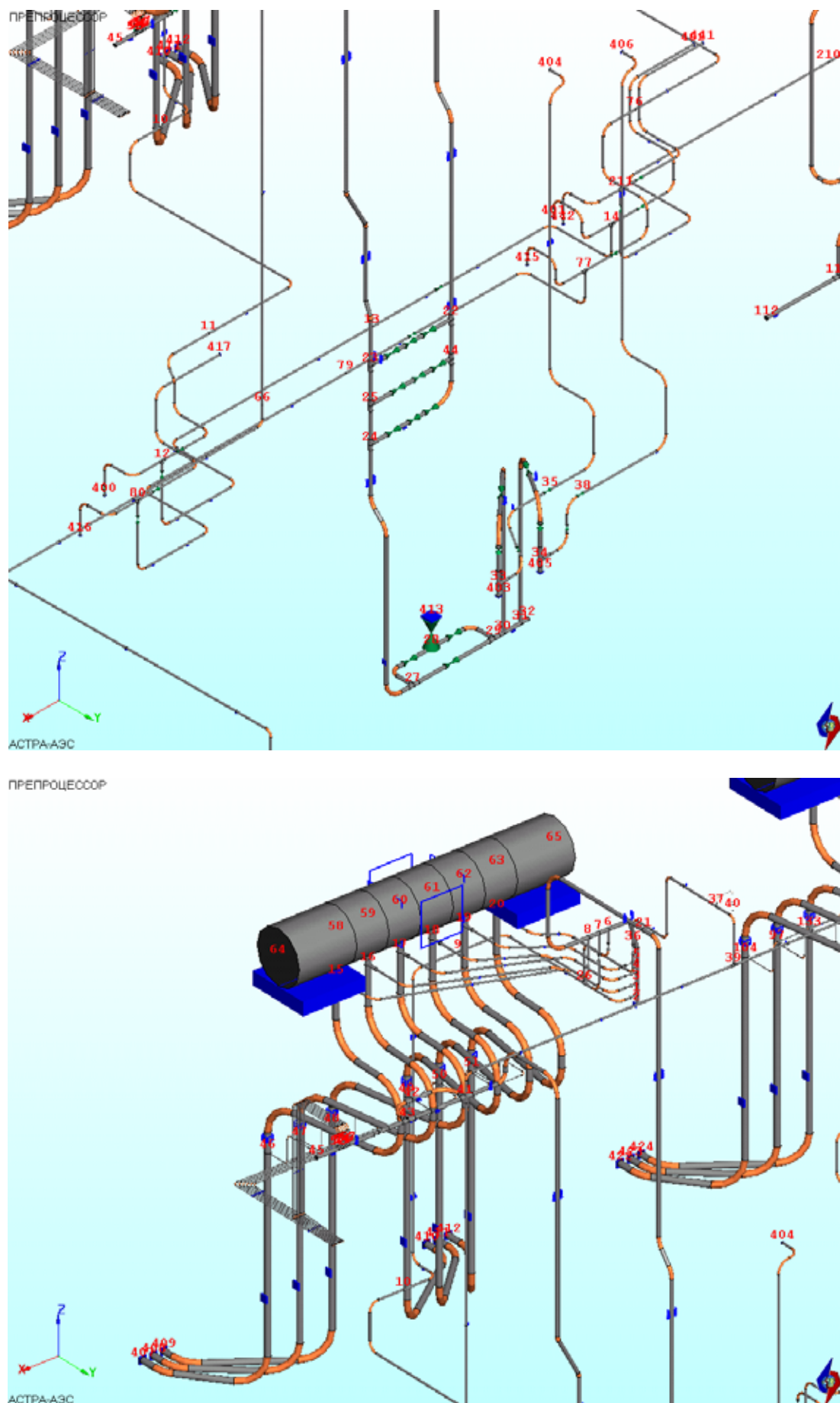


Рис. 3.12 Расчетная АСТРА-модель ТС АЭП №3. Фрагменты

Перемещения в ГСК (мм). Этап 3 - Переход из холодного в рабочее состояние

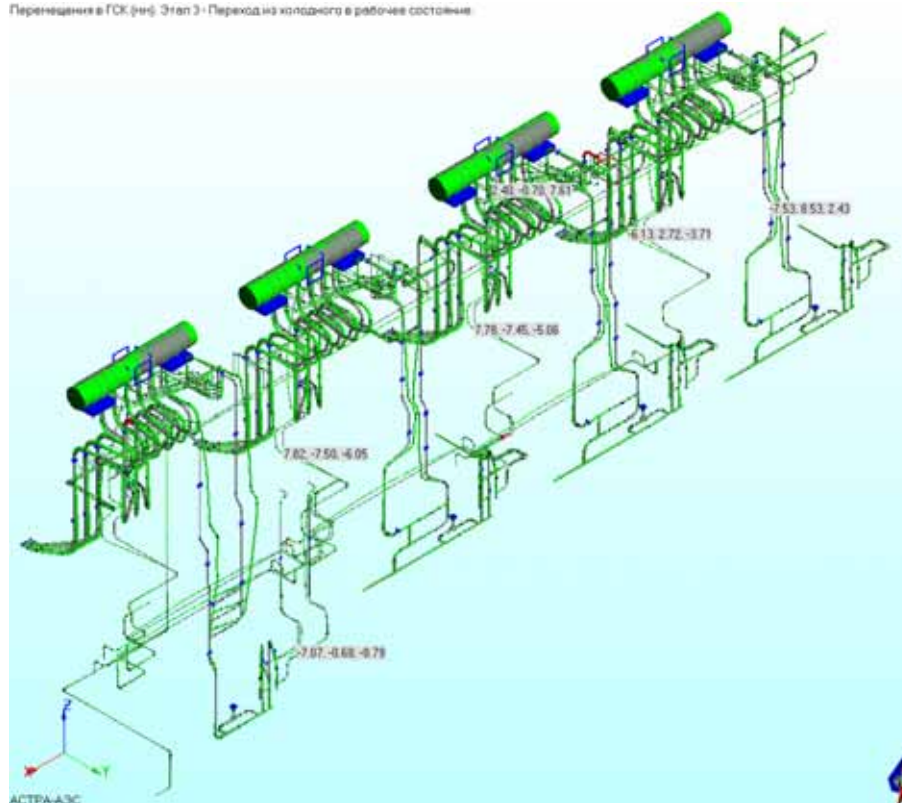


Рис. 3.13 ТС АЭП № 3 Расчетные перемещения при переходе из холодного в рабочее состояние, мм

Расчетные напряжения (МПа). Этап 3. Группа 3.

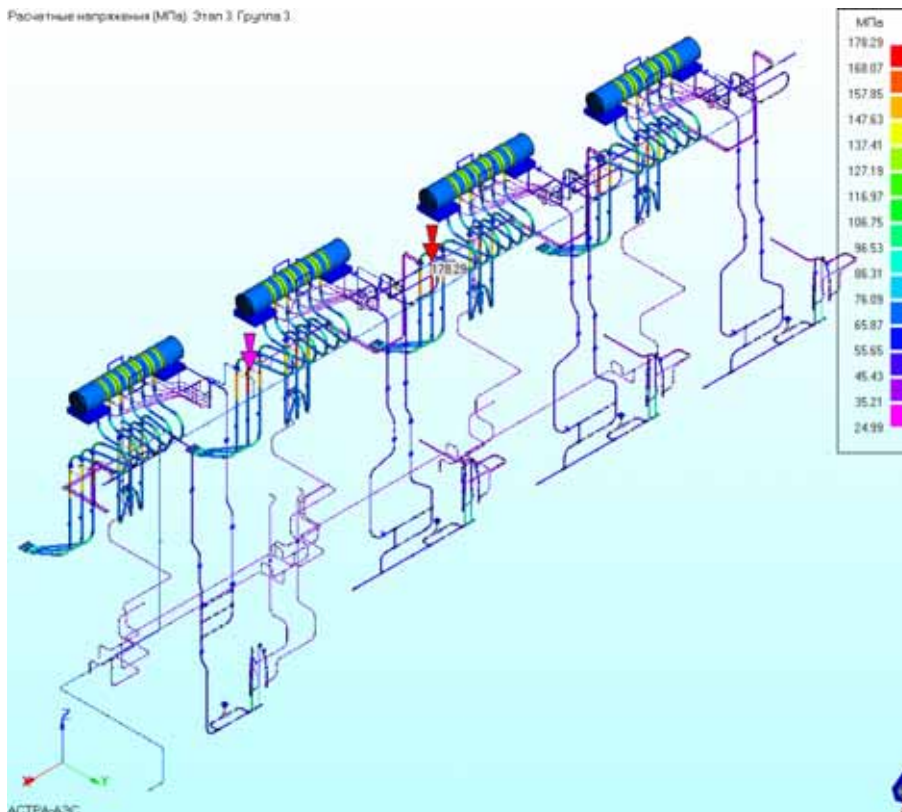


Рис. 3.14 ТС АЭП № 3 Расчетные напряжения группы (σ)_{РК}, МПа

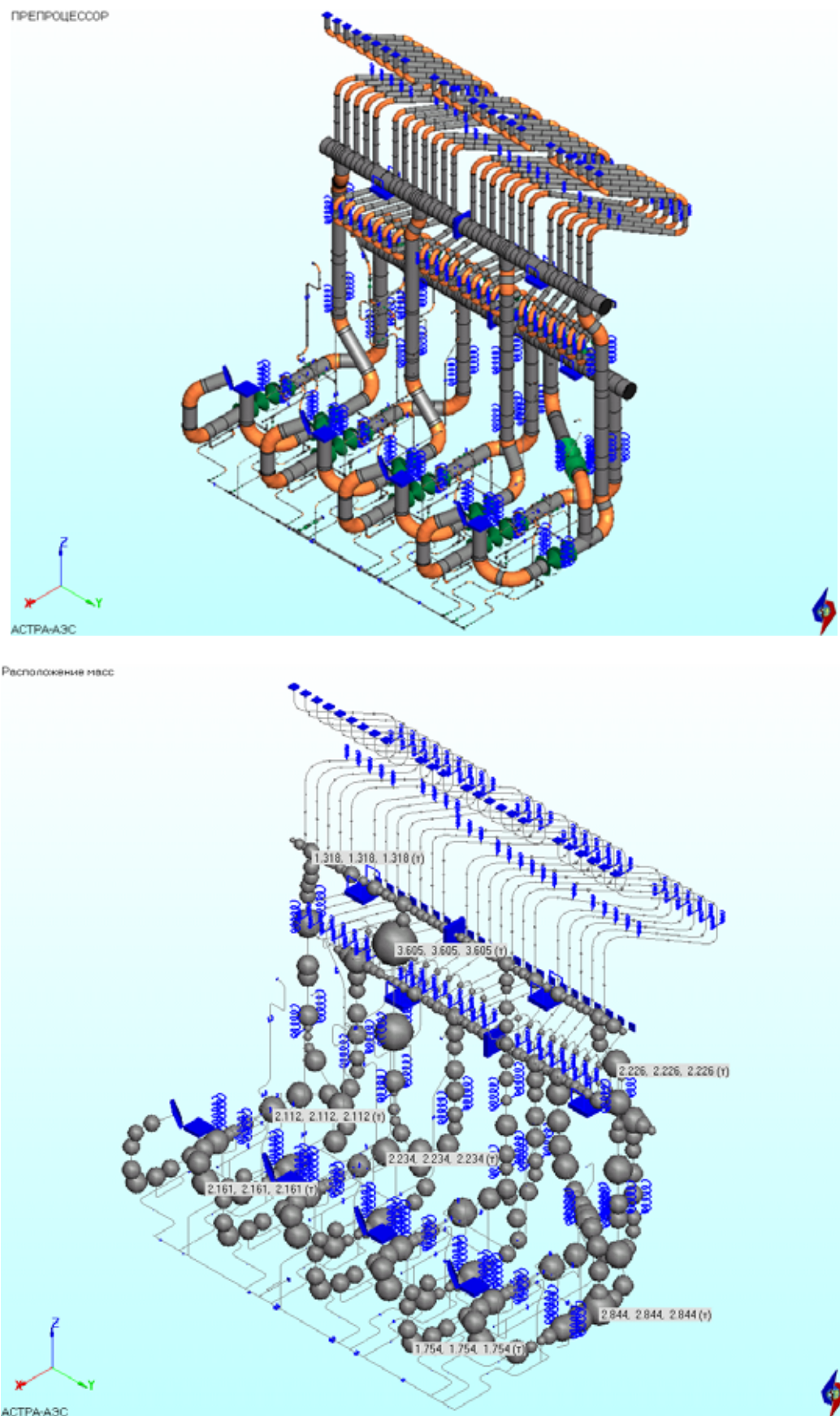


Рис. 3.15 Расчетная АСТРА-модель ТС АЭП № 4 (КМПЦ)

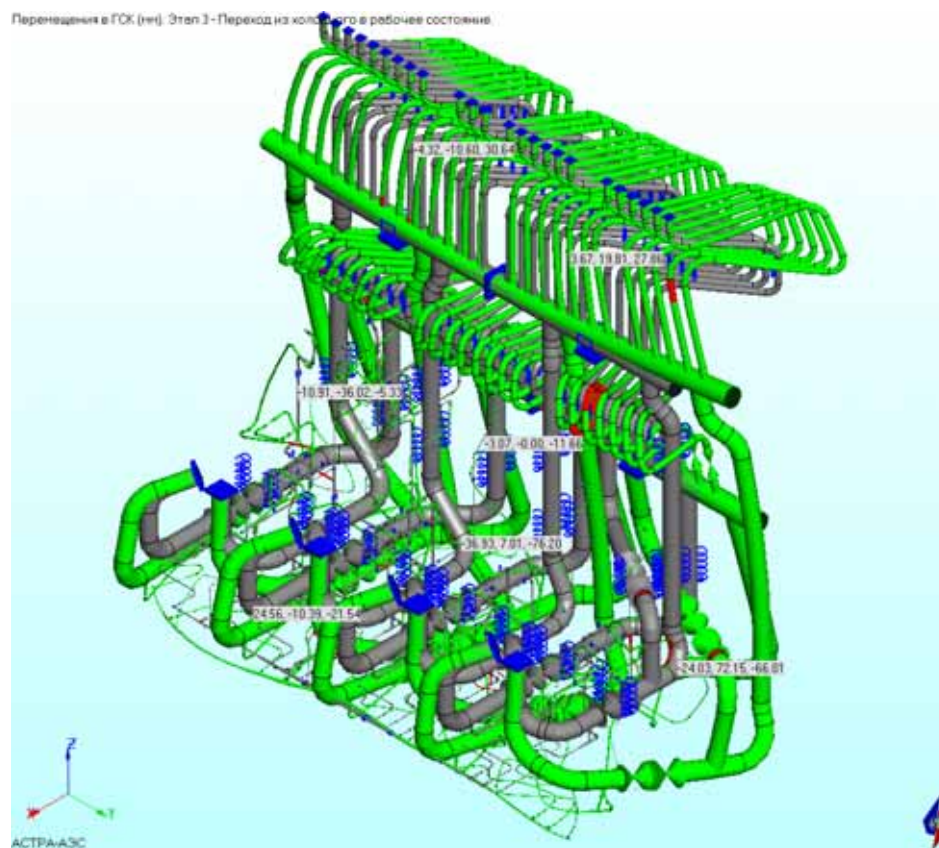


Рис. 3.16 ТС АЭП № 4 Расчетные перемещения при переходе из холодного в рабочее состояние, мм

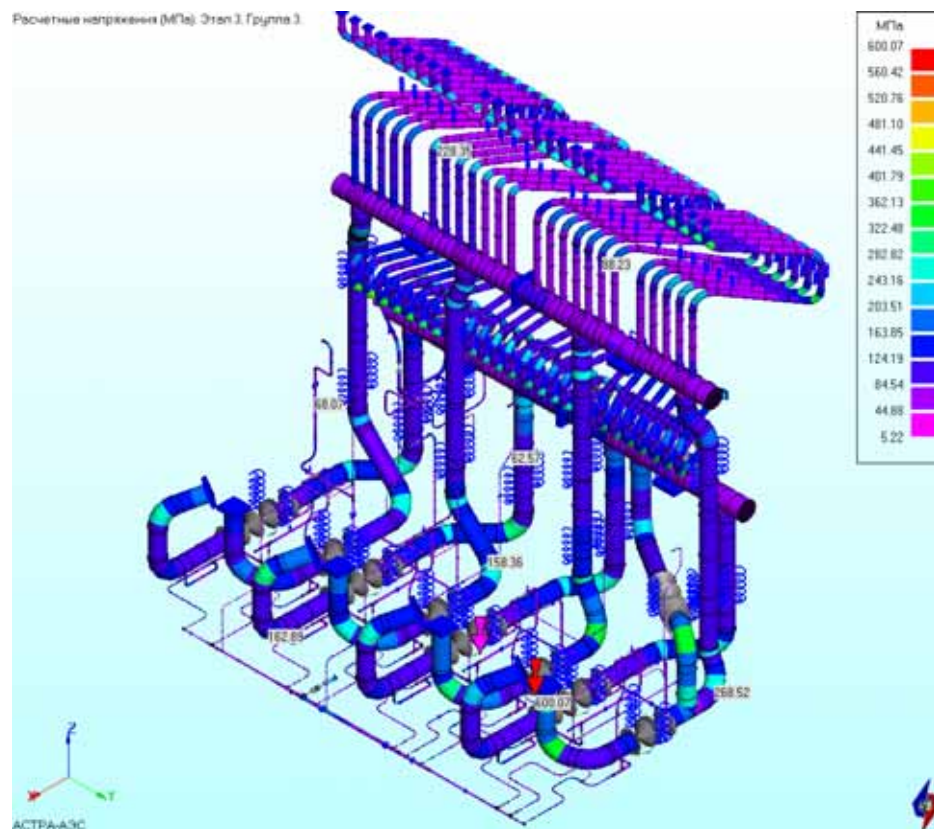


Рис. 3.17 ТС АЭП № 4 Расчетные напряжения группы (σ_{RK}), МПа

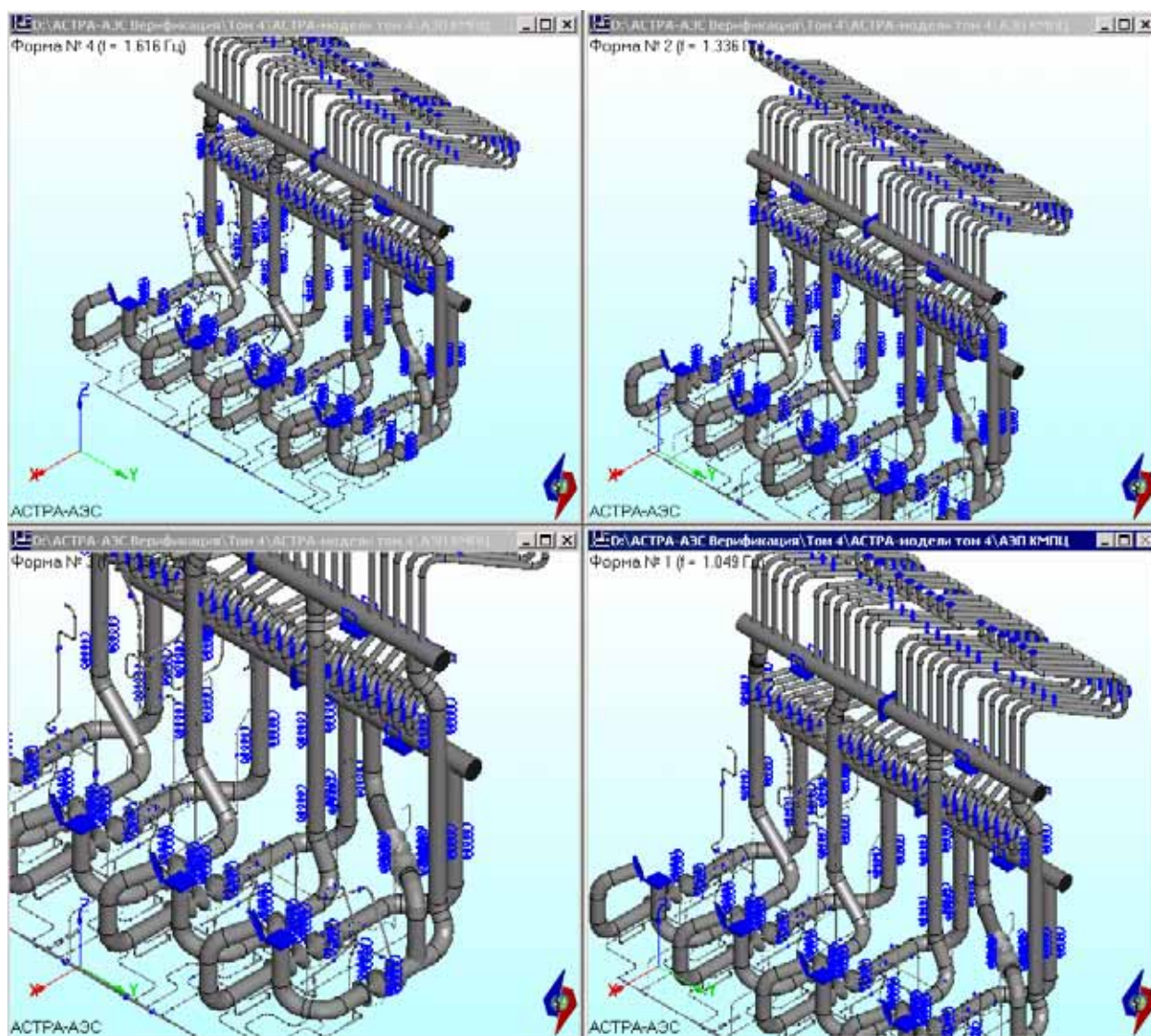


Рис. 3.18 ТС АЭП № 4. Расчетные формы колебаний в диапазоне 1,049 – 1,616 Гц

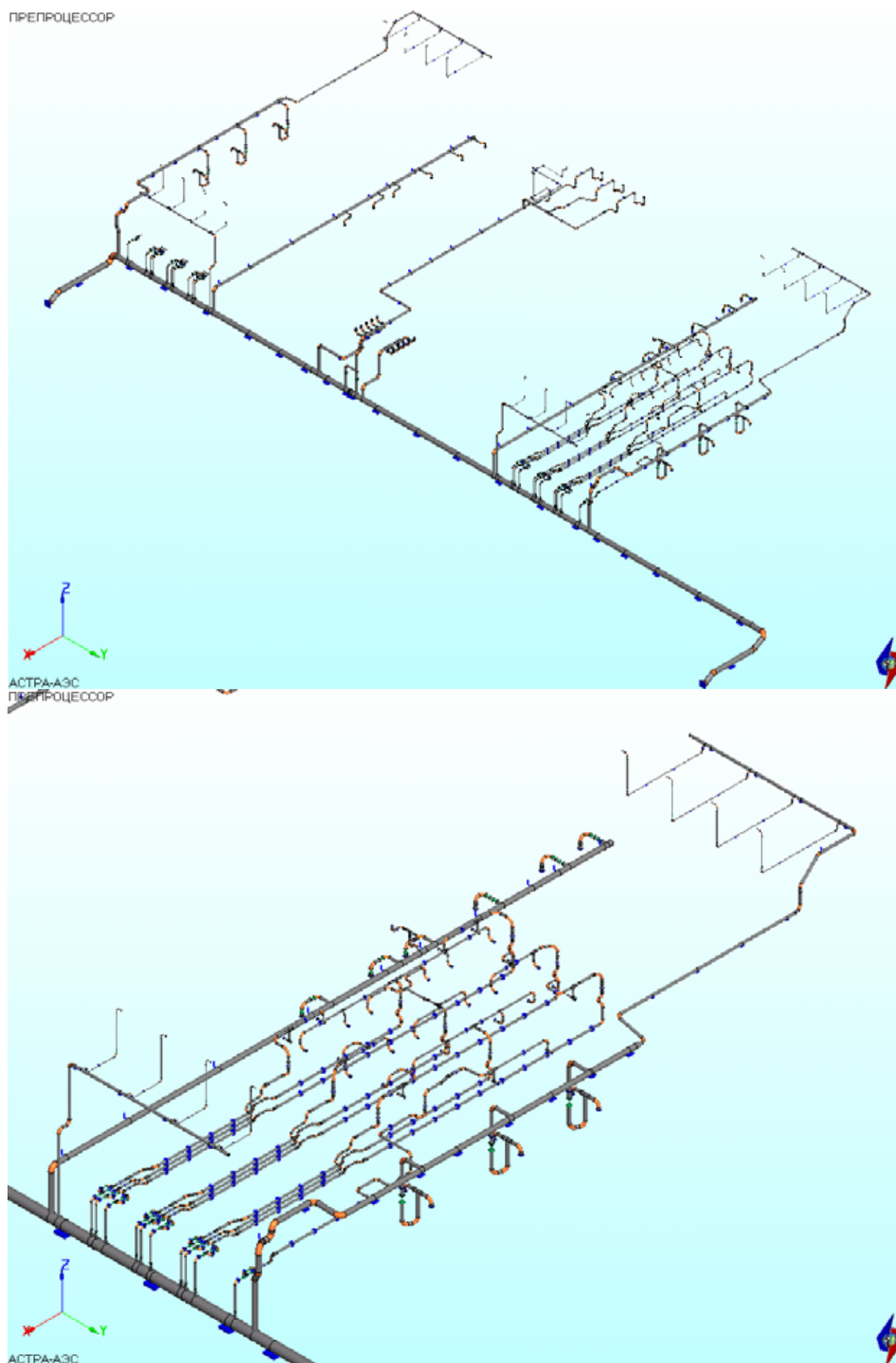


Рис.3.19 Расчетная АСТРА-модель ТС АЭП № 5

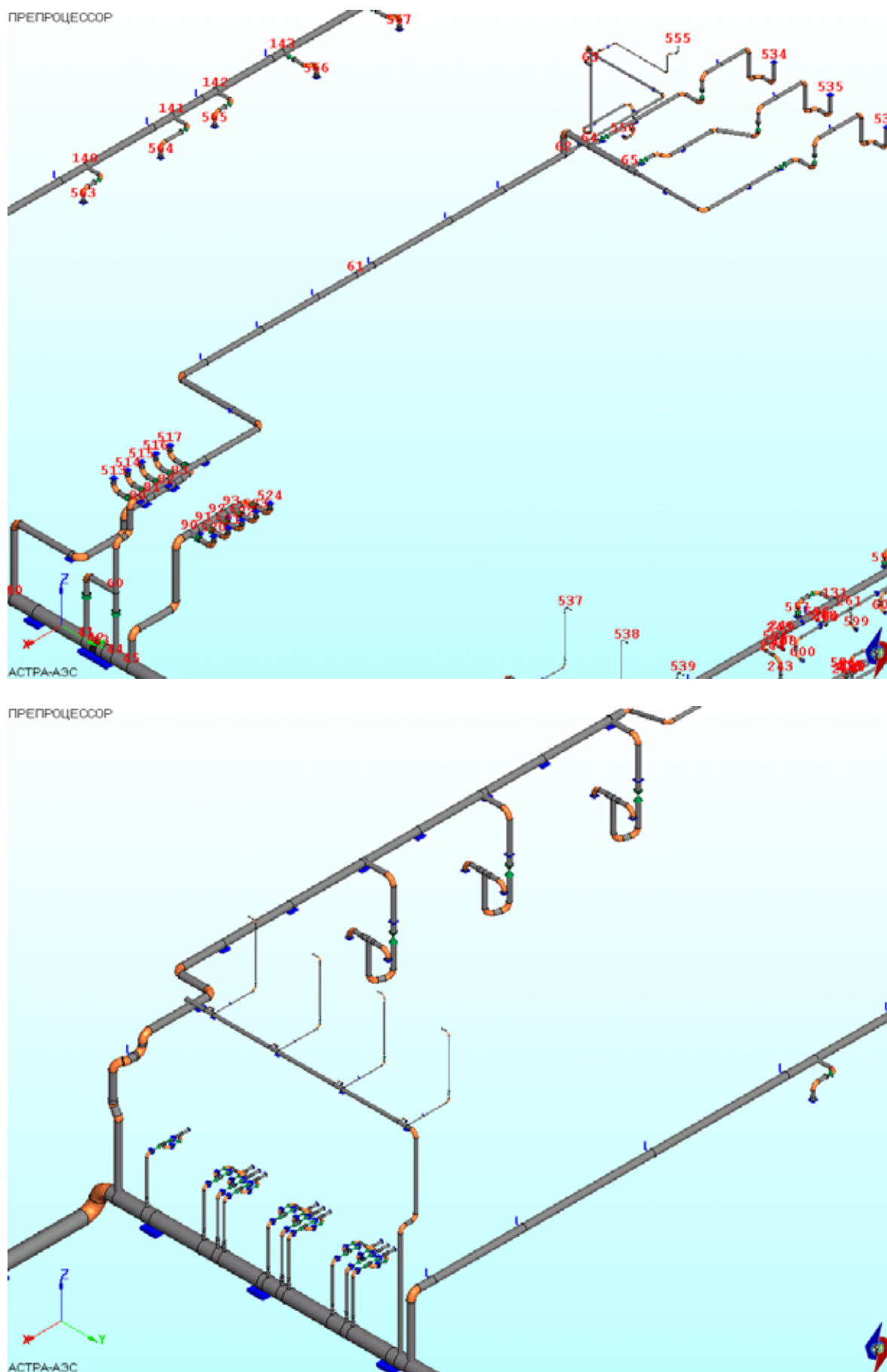


Рис. 3.20 Расчетная АСТРА-модель ТЭС АЭП № 5. Фрагменты

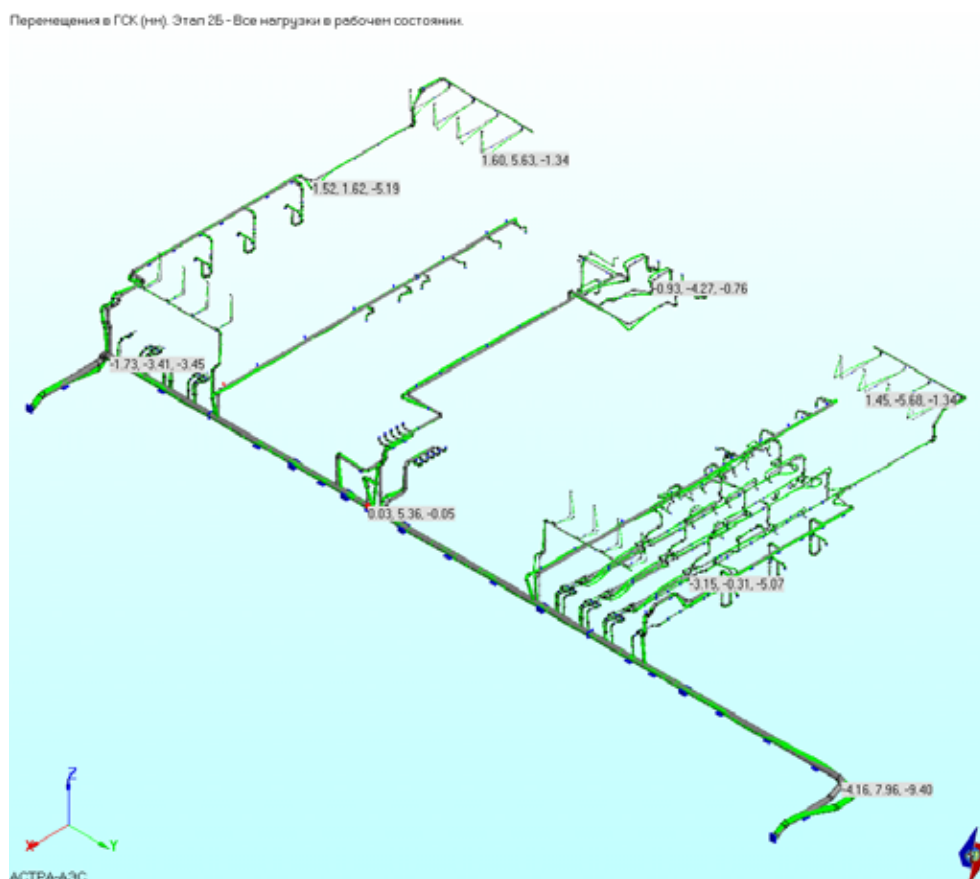


Рис. 3.21 ТС АЭП № 5. Расчетные перемещения от действия всех квазистатических нагрузок (внутреннее давление, собственный вес, температура), мм

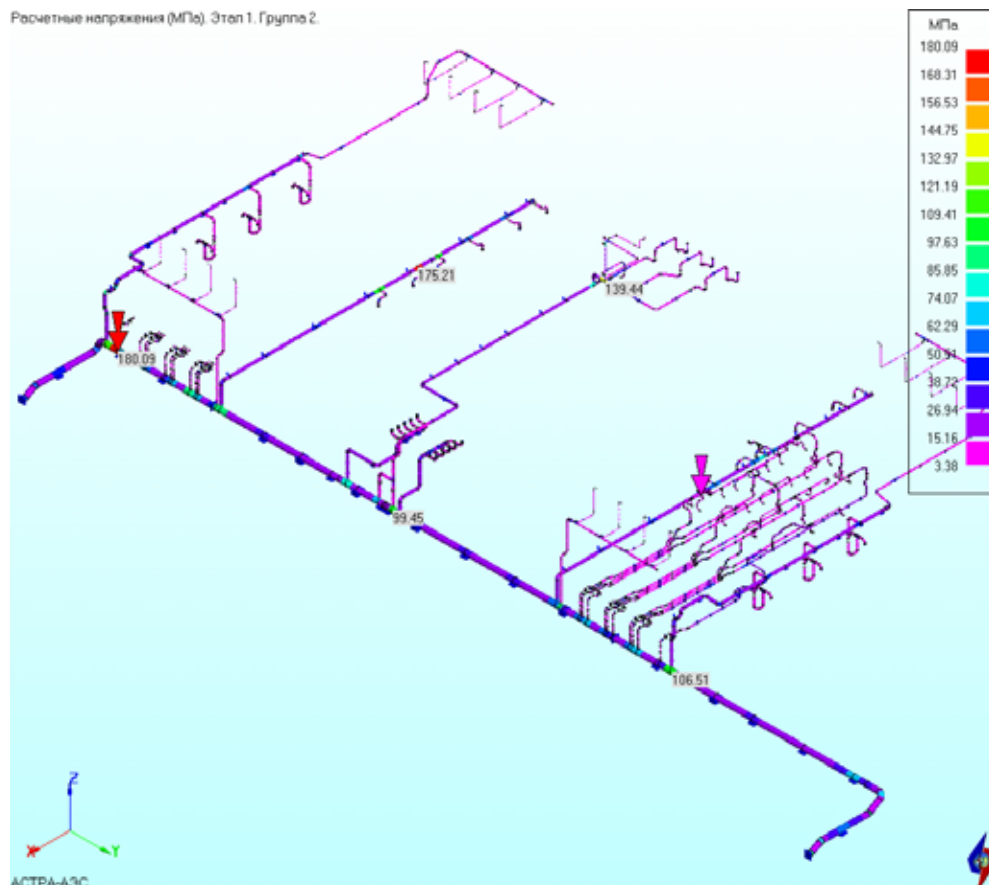


Рис. 3.22 ТС АЭП № 5. Расчетные напряжения группы $(\sigma)_2$, МПа

4. Высокотемпературные трубопроводные системы (ОКБ “Гидропресс”, 2002-2009 гг.)

В разделе представлены два высокотемпературных трубопровода, проектирование и расчетное обоснование НДС и прочности которых выполнено с применением программного комплекса АСТРА-АЭС'2009 в ОАО “ОКБ Гидропресс”.

Расчетные модели и некоторые результаты расчетов приведены на рис. 4.1 – 4.20. Размерности моделей – в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Размерности расчетных моделей

| № | Название | Число участков (суперэлементов) | Число узлов | Число элементов | Число динамических степеней свободы |
|---|----------|------------------------------------|----------------|--------------------|--|
| 1 | БН-800 | 275 | 258 | 1531 | 4443 |
| 2 | НГ5Б | 232 | 227 | 1626 | 5457 |

На рис. 4.8 – 4.15 показаны фрагменты уточненного расчета напряженного состояния и сейсмоч прочности тяжело нагруженного неравнопроходного ортогонального сварного тройникового соединения реальной трубопроводной системы АЭУ.

Незначительное снижение максимальных напряжений группы (σ_s)₂ (с 377.05 МПа до 352.76 МПа), зафиксированное в уточненном расчете по АСТРА-СТАДИО (по сравнению с результатом АСТРА-СЕЙСМ), носит «индивидуальный характер» и, конечно же, не позволяет распространить этот вывод на другие случаи.

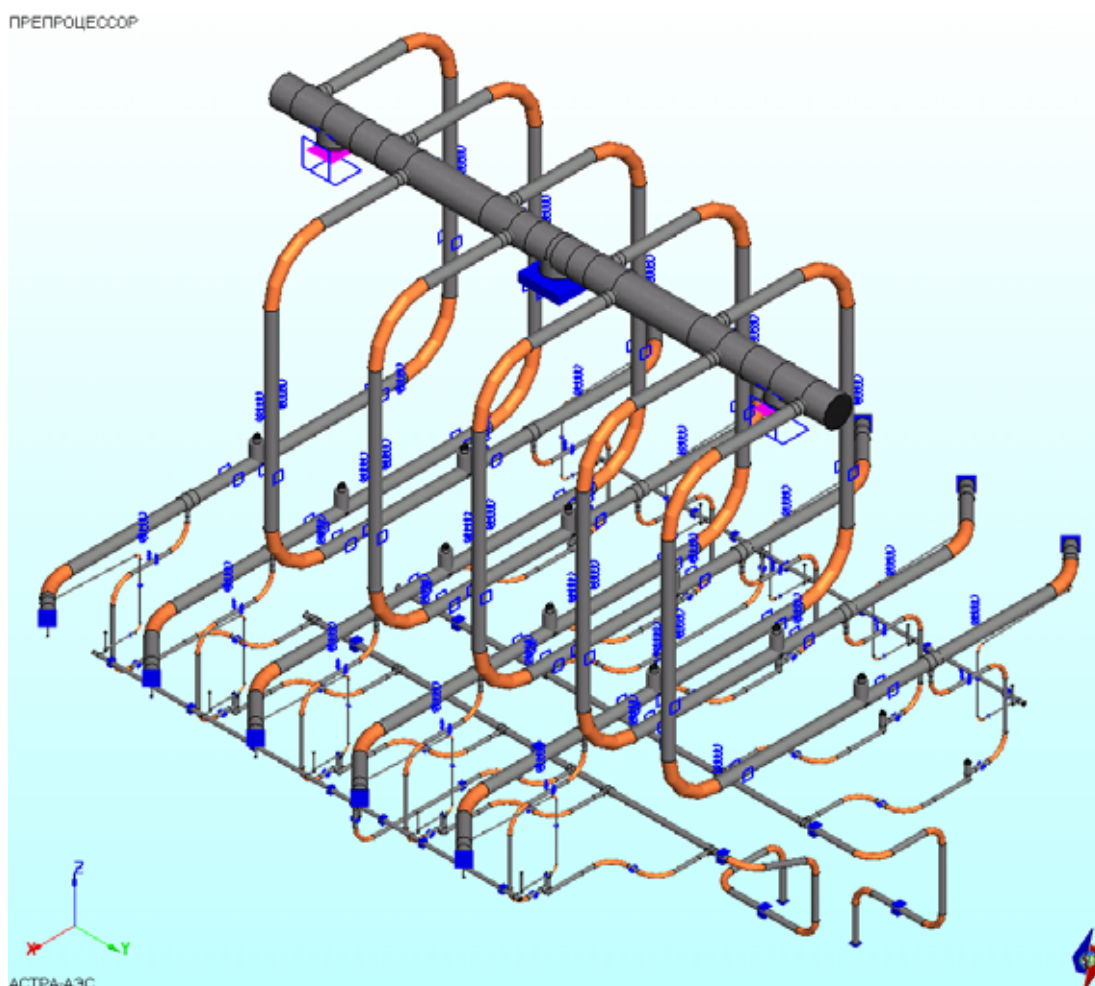


Рис. 4.1 Расчетная АСТРА-модель ТС ОКБ ГП №1

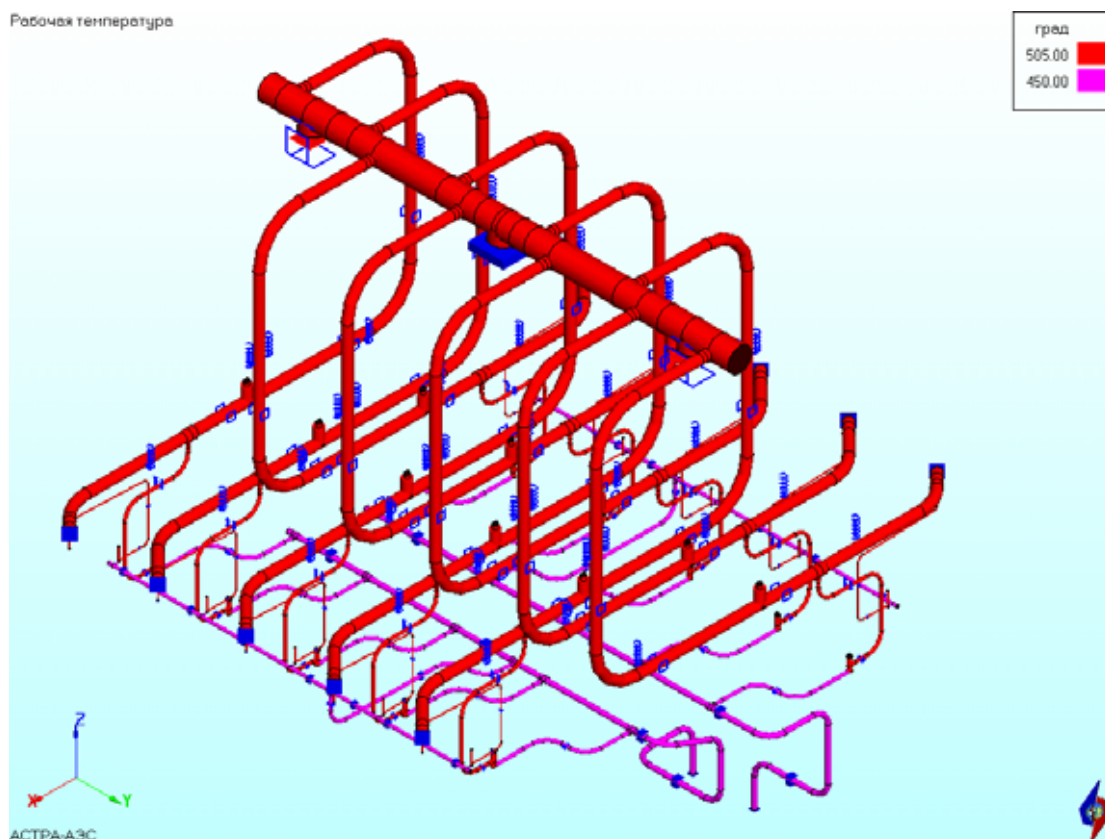


Рис. 4.2 Рабочая температура. ТС ОКБ ГП №1

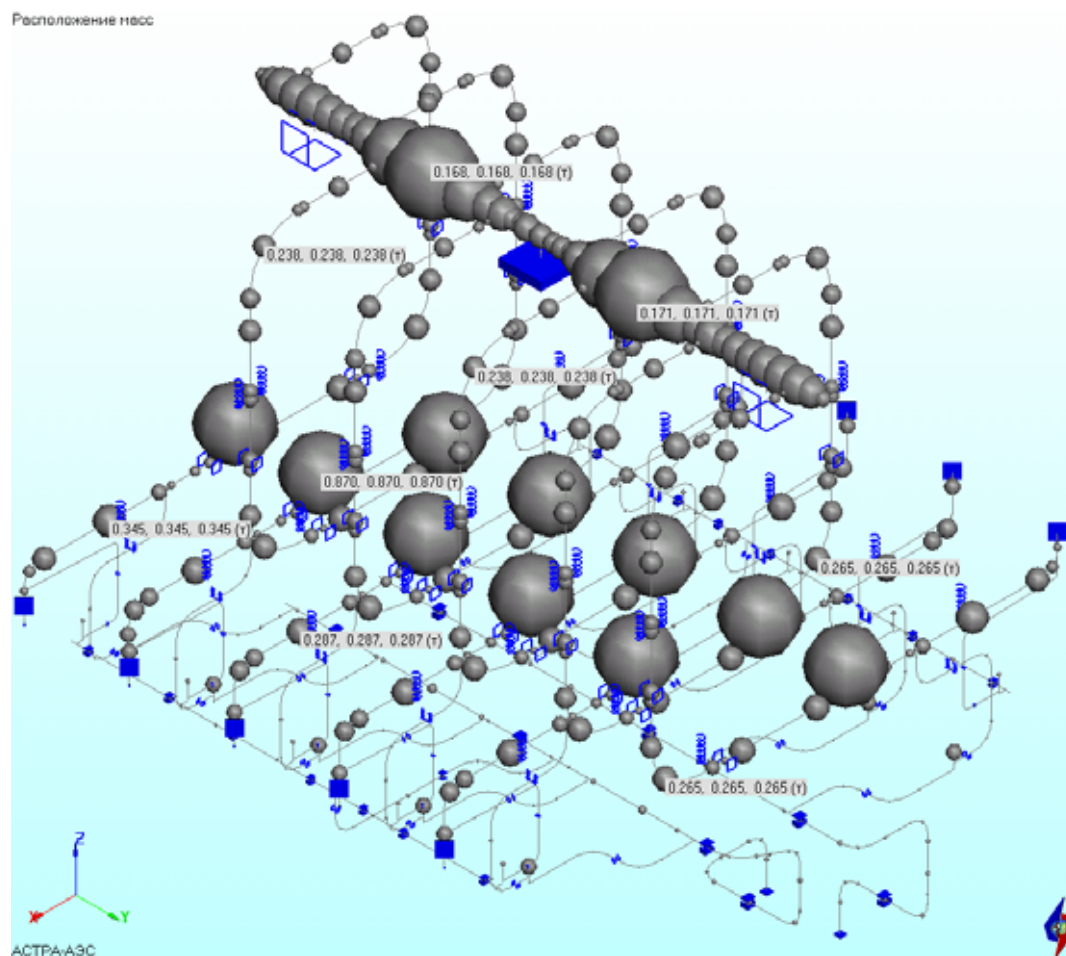


Рис. 4.3 ТС ОКБ ГП №1. Динамическая модель (массы – в т)

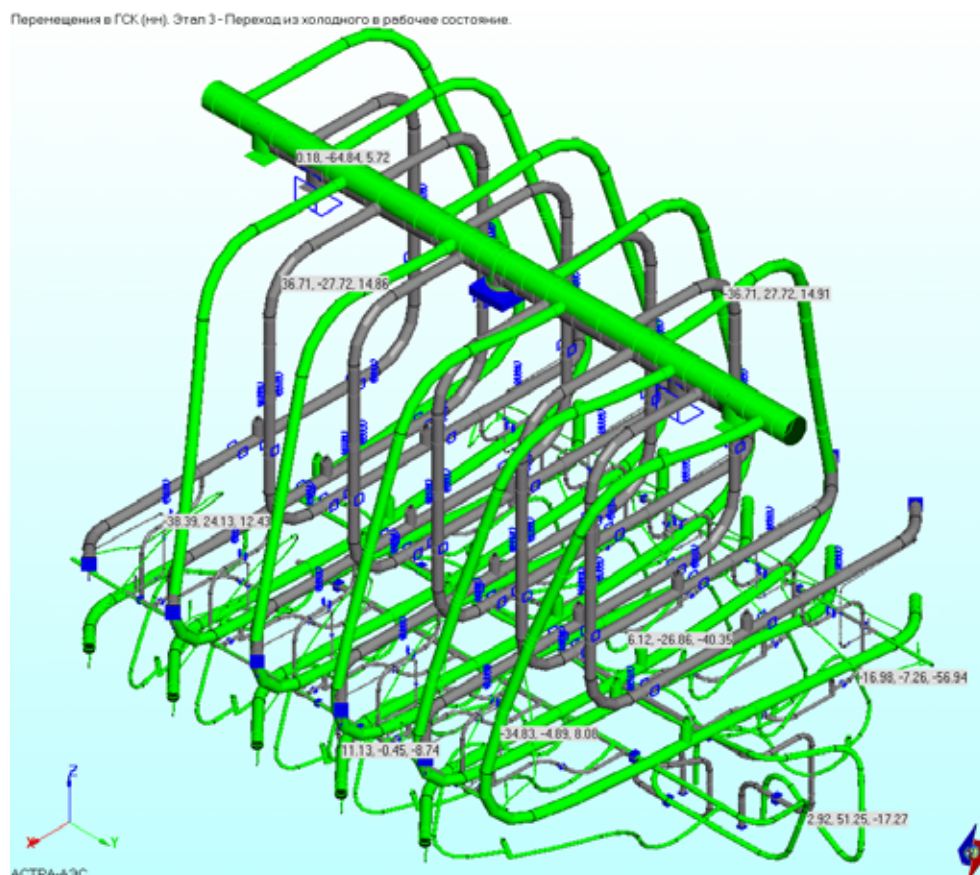


Рис. 4.4 ТС ОКБ ГП № 1. Расчетные перемещения расчетные перемещения при переходе из холодного состояния в рабочее, мм

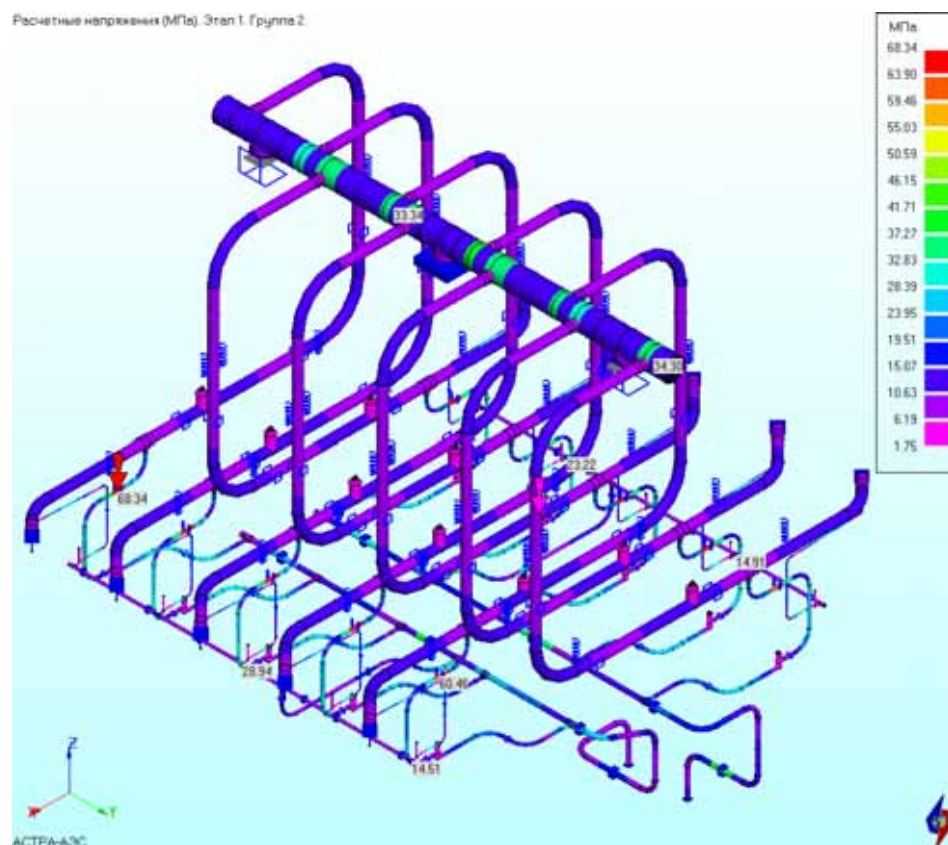


Рис. 4.5 ТС ОКБ ГП № 1. Расчетные напряжения группы $(\sigma)_2$, МПа

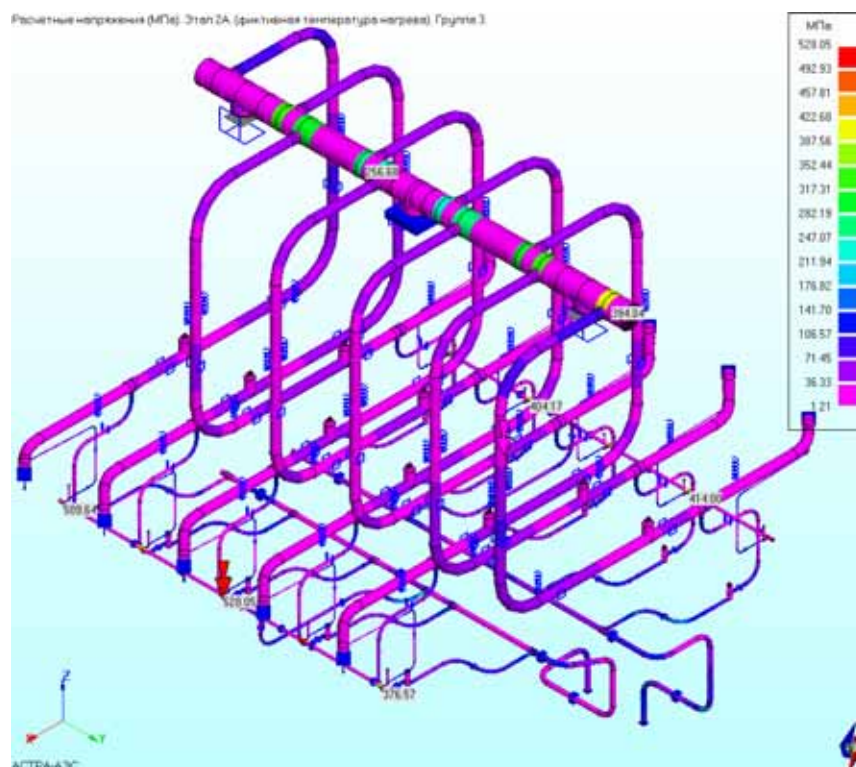


Рис. 4.6 ТС ОКБ ГП № 1. Расчетные напряжения от действия всех квазистатических нагрузок при фиктивной температуре, МПа

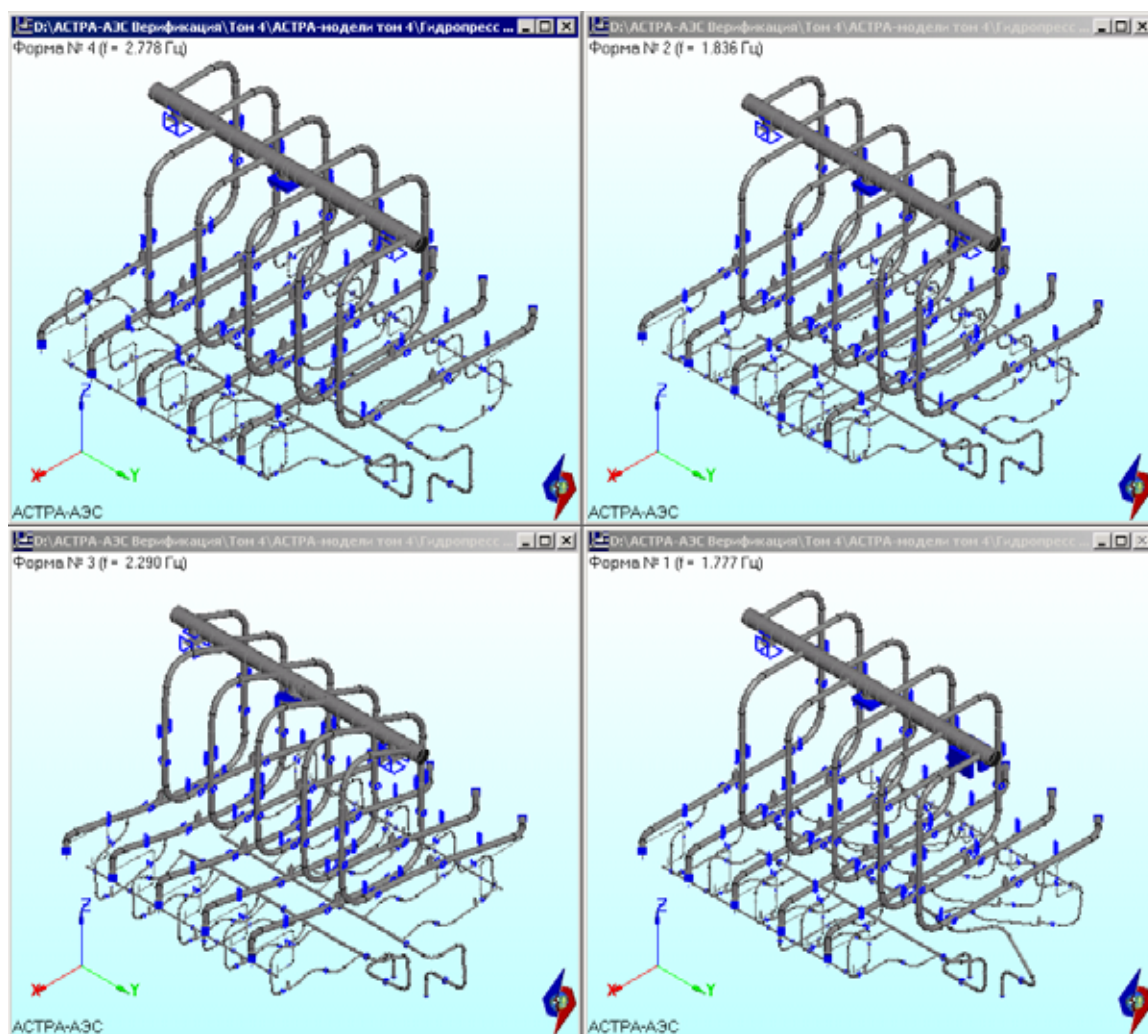


Рис. 4.7 ТС ОКБ ГП № 1. Расчетные низшие формы колебаний

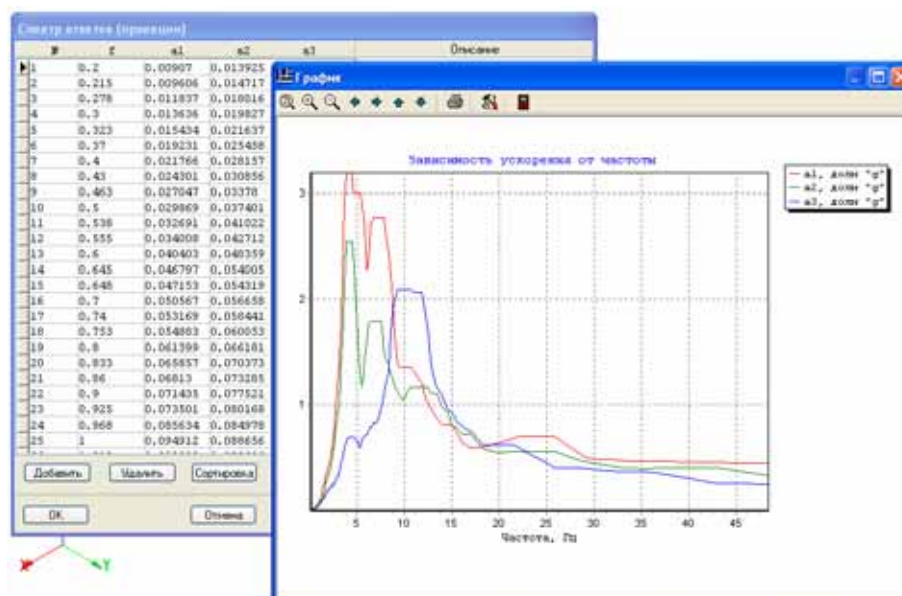


Рис. 4.8 ТС ОКБ ГП № 1. Расчетный трехкомпонентный спектр ответа

Расчетные напряжения (МПа). Воздействие №1 (угол №1). Сеймика + вес + давление.

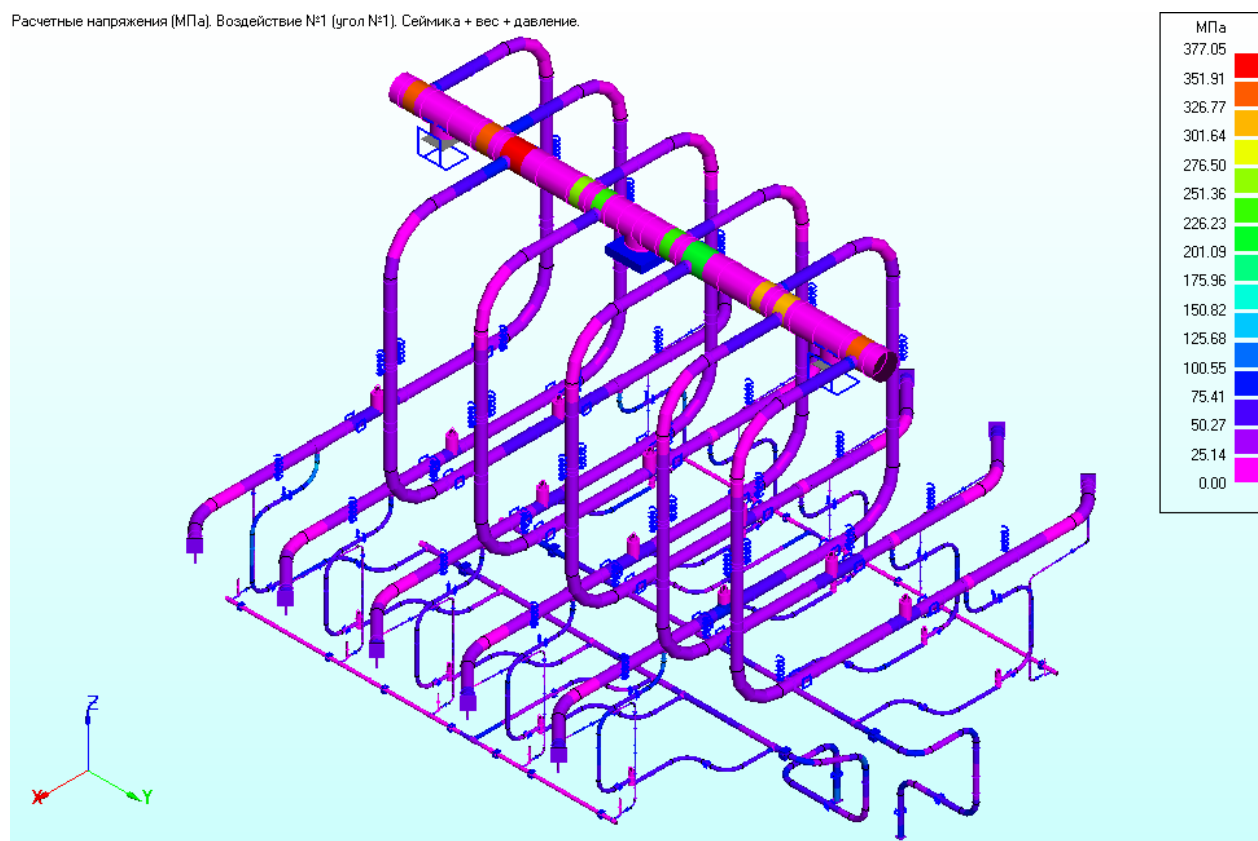


Рис. 4.9 ТС ОКБ ГП № 1. Модель трубопроводной системы. **Статика±Сейсмика**. Приведенные напряжения группы $(\sigma_s)_2$. Максимум **377,05** МПа. АСТРА-СЕЙСМ

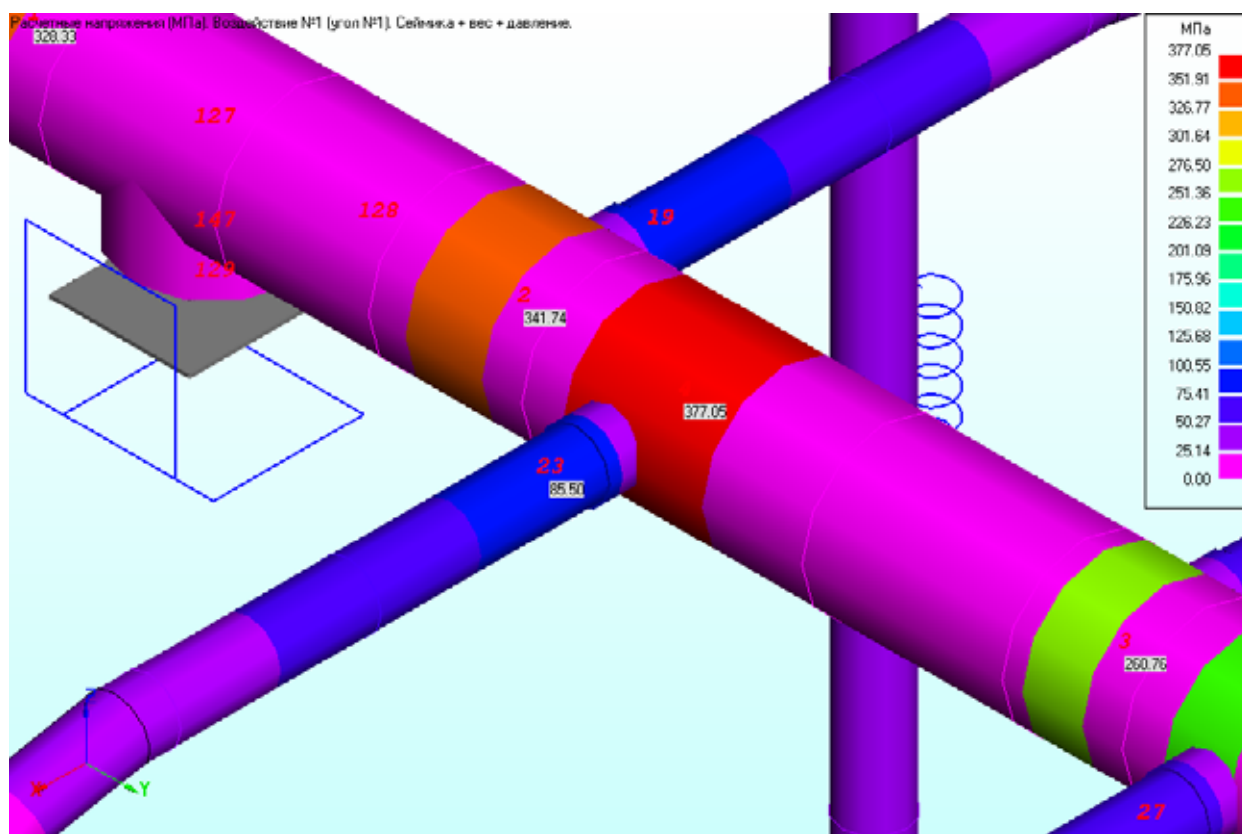


Рис. 4.10 ТС ОКБ ГП № 1. Зона тройника №3. Статика±Сейсмика.
Приведенные напряжения группы $(\sigma_s)_2$. Максимум **377,05** МПа. АСТРА-СЕЙСМ

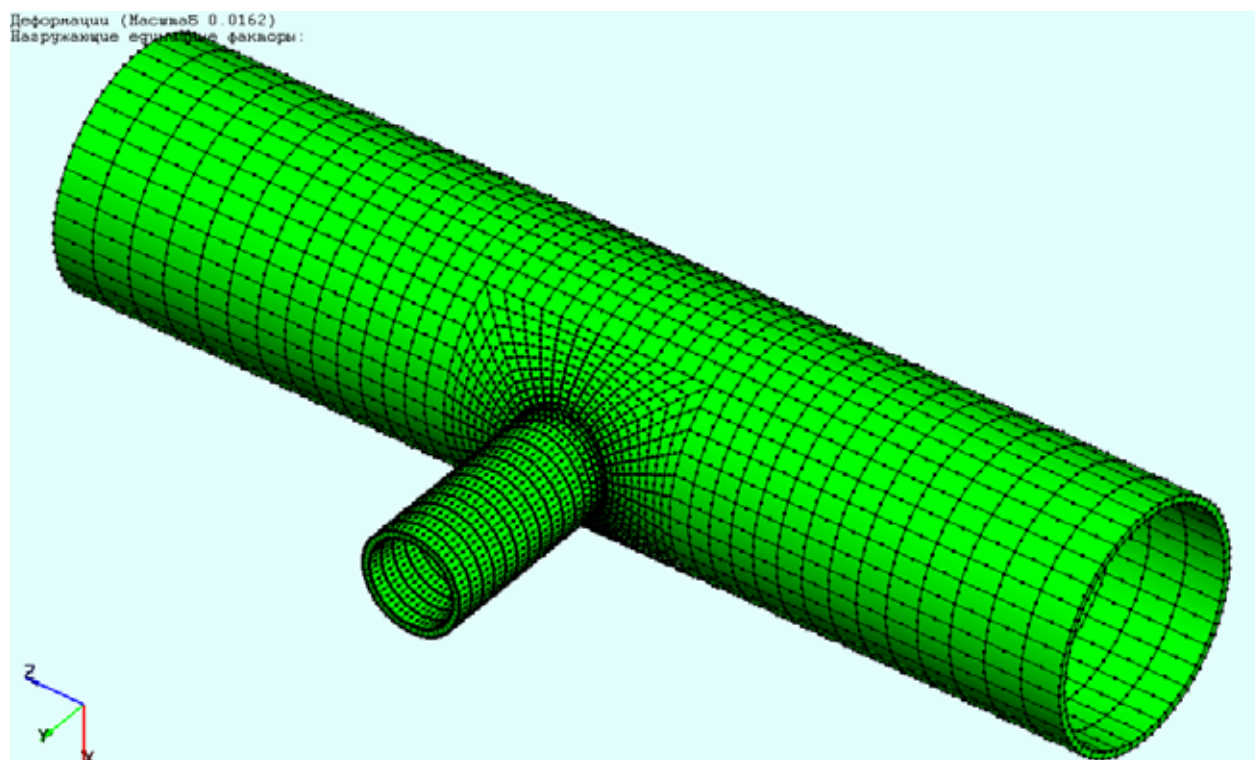


Рис. 4.11 ТС ОКБ ГП № 1. Оболочечная КЭ-модель тройника.
Общий вид. АСТРА-СТАДИО

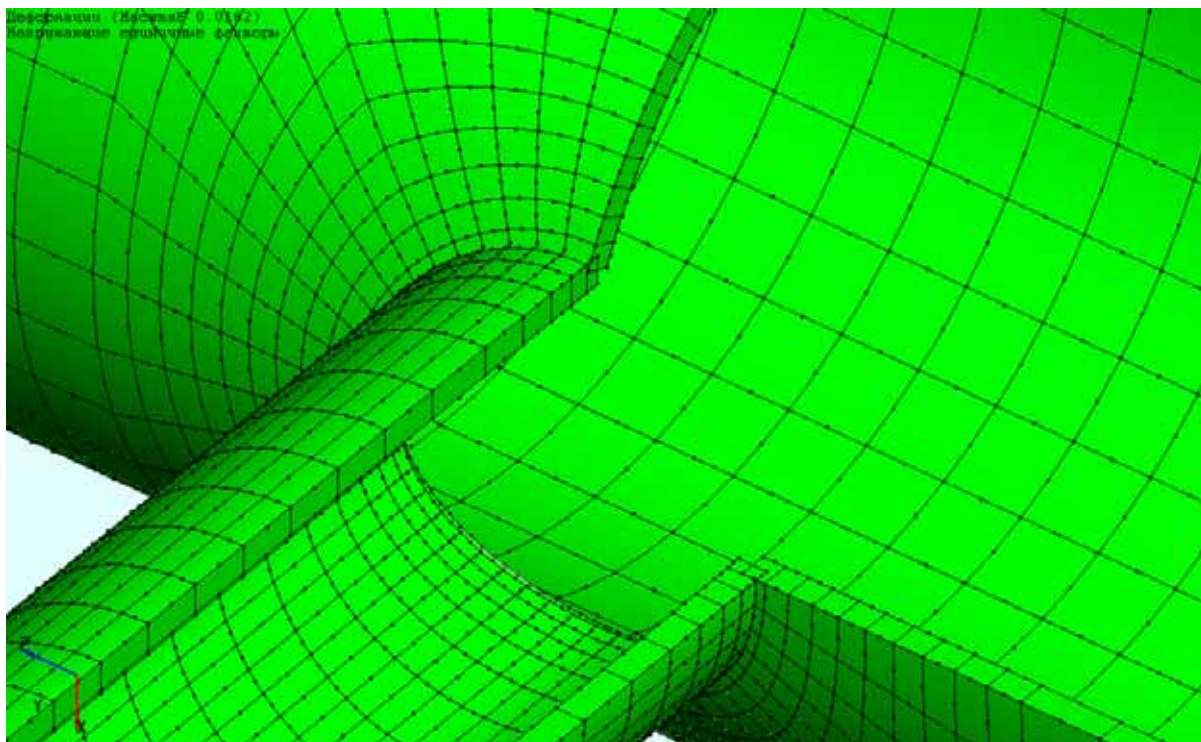


Рис. 4.12 ТС ОКБ ГП № 1. АСТРА-СТАДИО. Оболочечная КЭ-модель тройника. Зона пересечения оболочек. АСТРА-СТАДИО

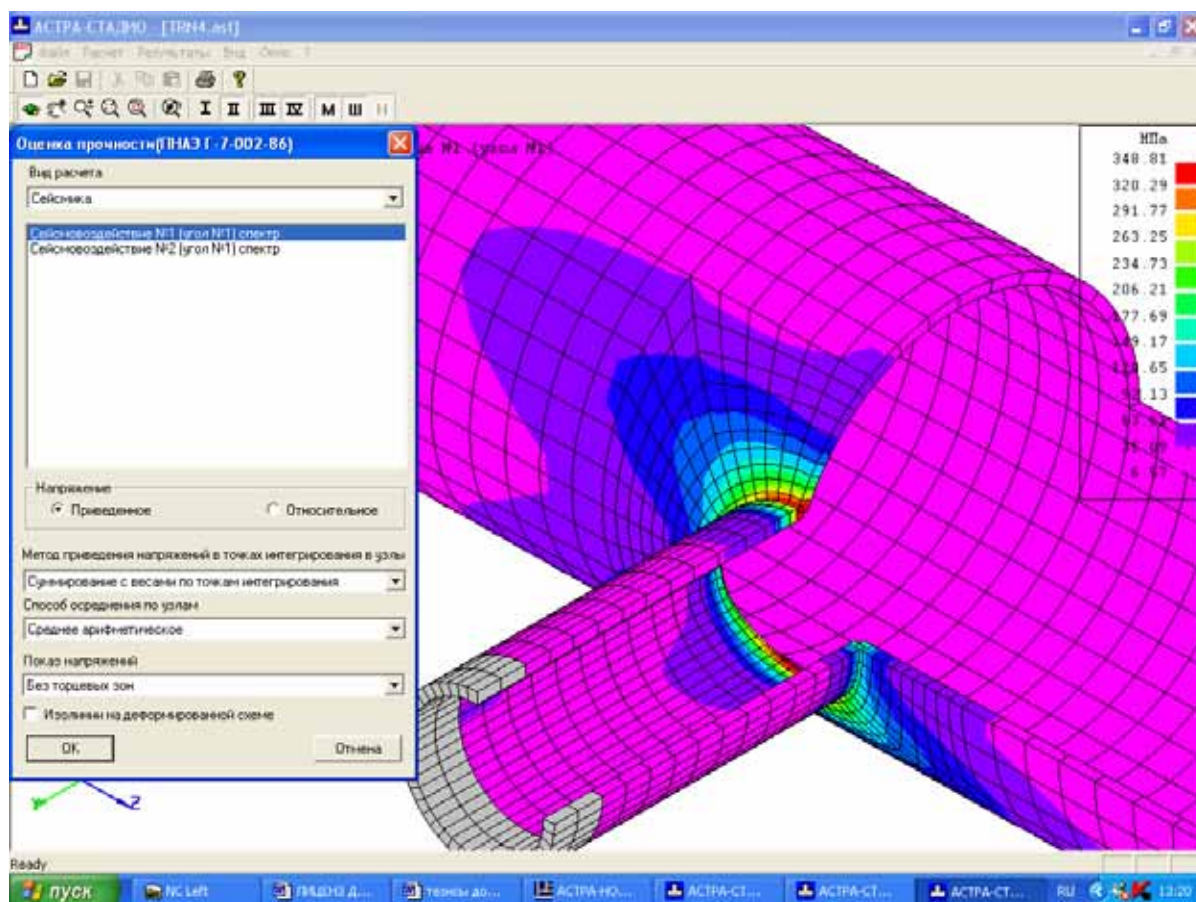


Рис. 4.13 ТС ОКБ ГП № 1. Оболочечная КЭ-модель тройника №3. *Сейсмика*. Приведенные напряжения группы $(\sigma_s)_2$. Максимум **348,81** МПа (387,13 МПа). АСТРА-СТАДИО

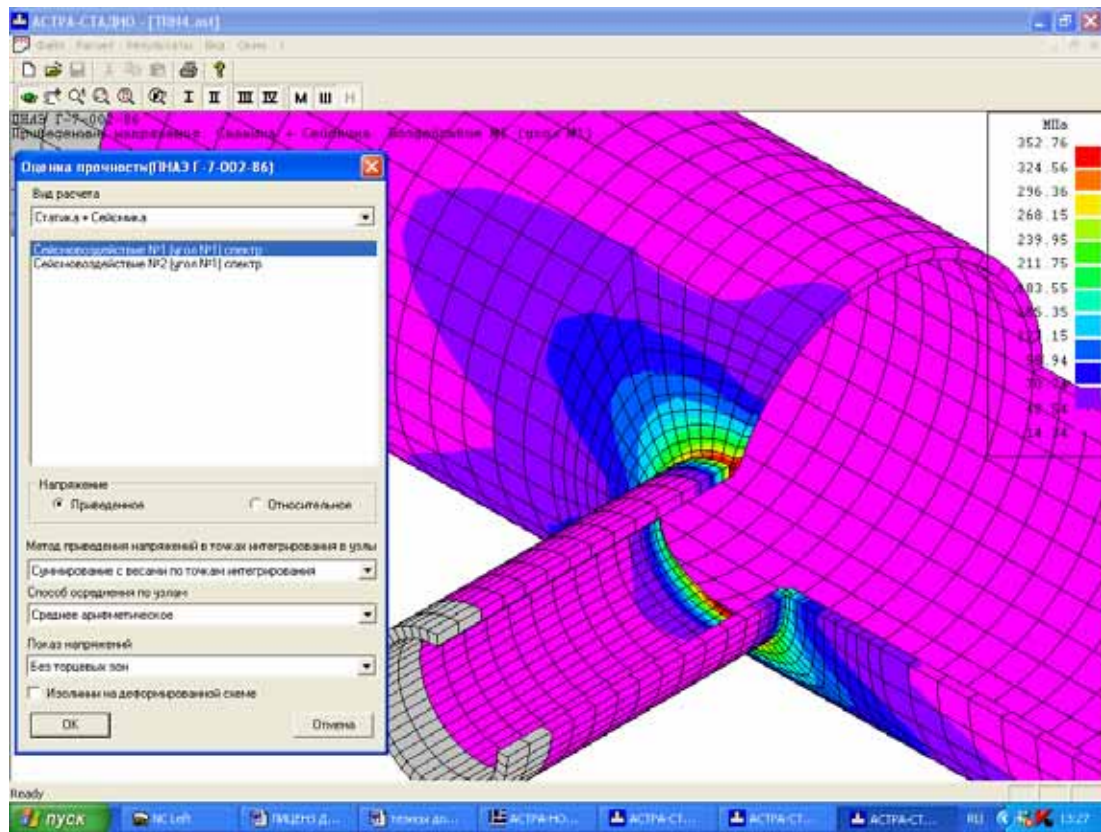


Рис. 4.14 ТС ОКБ ГП № 1. Оболочечная КЭ-модель тройника №3. Статика+Сейсмика
Приведенные напряжения группы (σ_s)₂. Максимум **352,76 МПа**
(377,05 МПа – по АСТРА-СЕЙСМ)

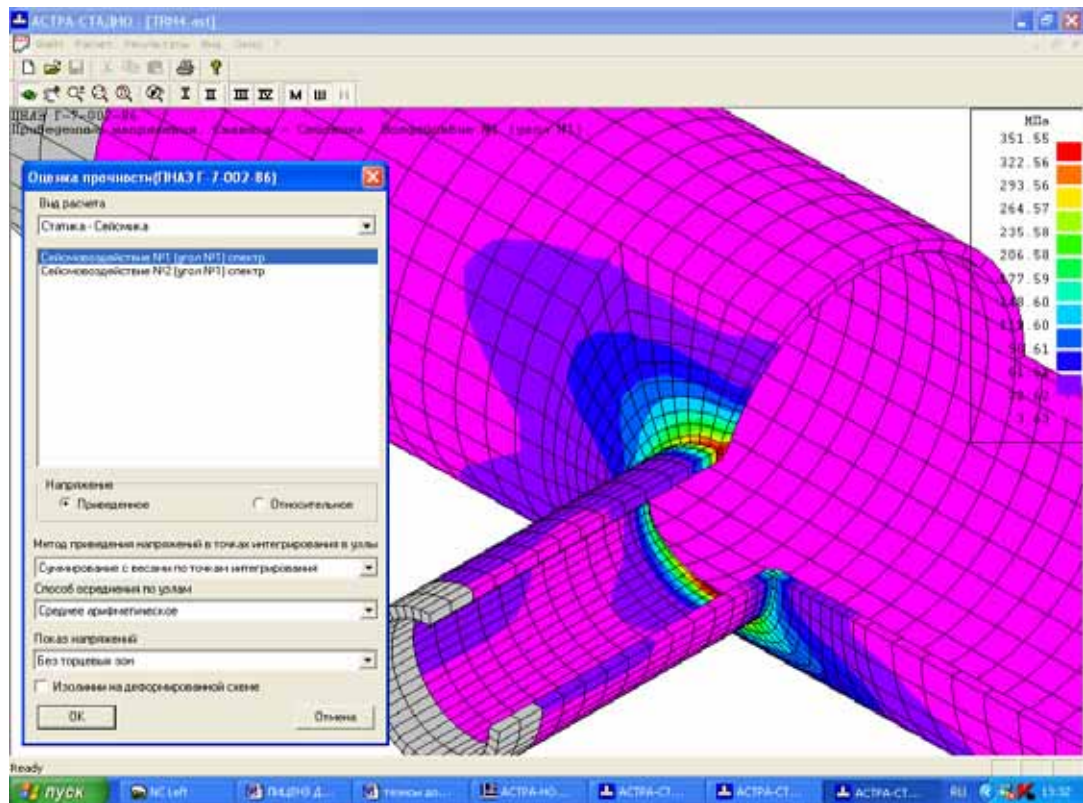


Рис. 4.15 ТС ОКБ ГП № 1. Оболочечная КЭ-модель тройника №3. *Статика-Сейсмика*.
Приведенные напряжения группы (σ_s)₂. Максимум **351,55 МПа**
(377,05 МПа – по АСТРА-СЕЙСМ)

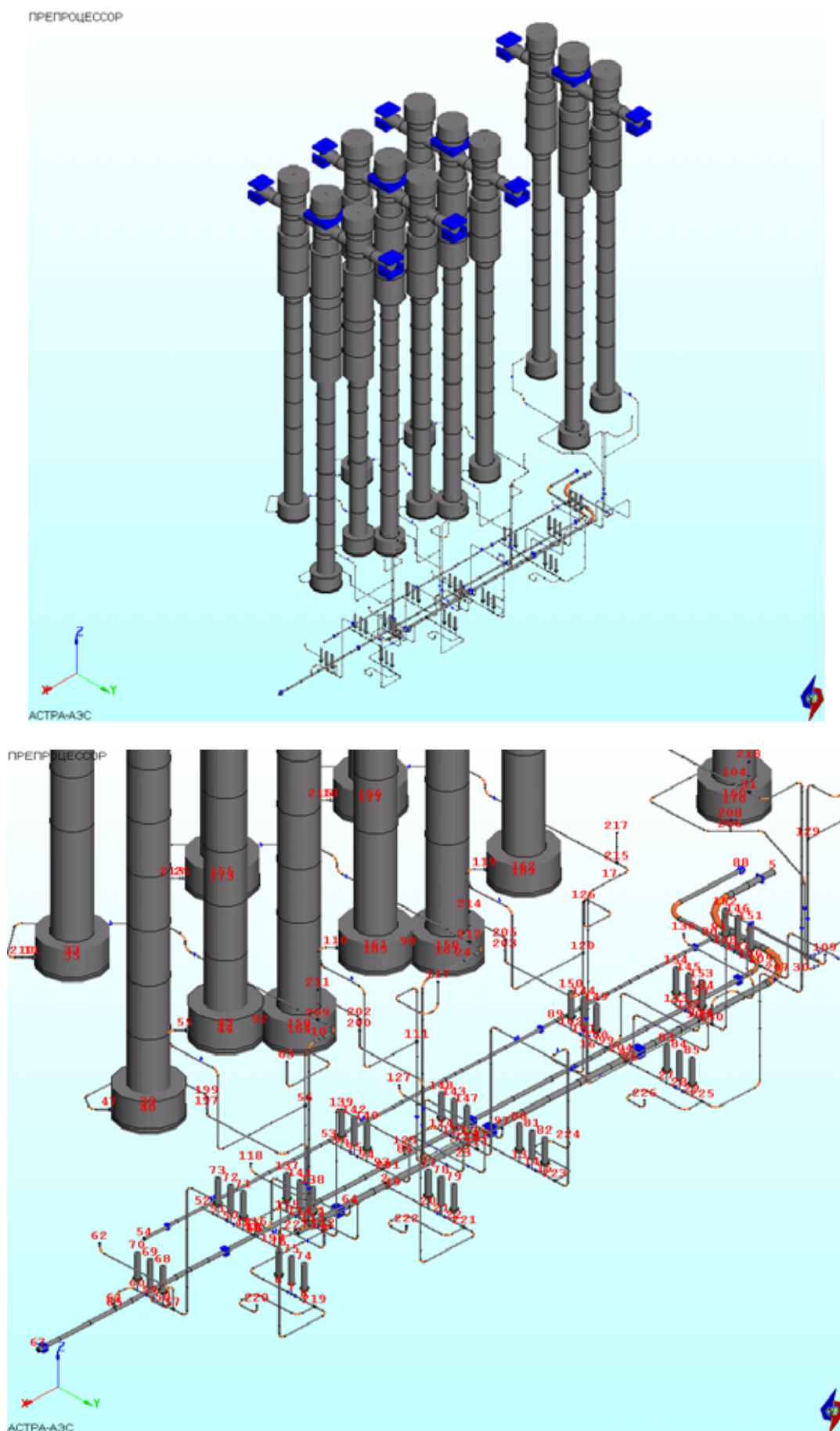


Рис. 4.16 Расчетная АСТРА-модель ТС ОКБ ГП № 2. Узлы суперэлементов

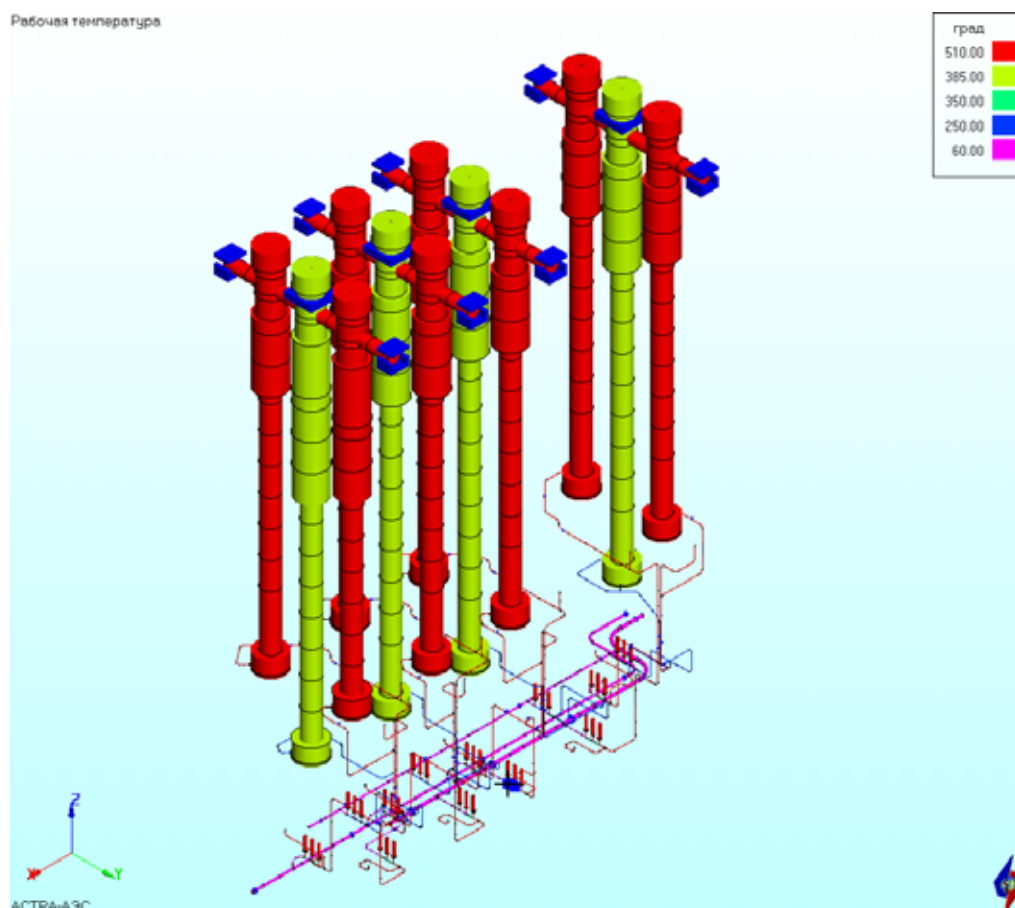


Рис. 4.17 Рабочая температура. ТС ОКБ ГП № 2

Перемещения в ГСК (мм). Этап 3 - Переход из холодного в рабочее состояние.

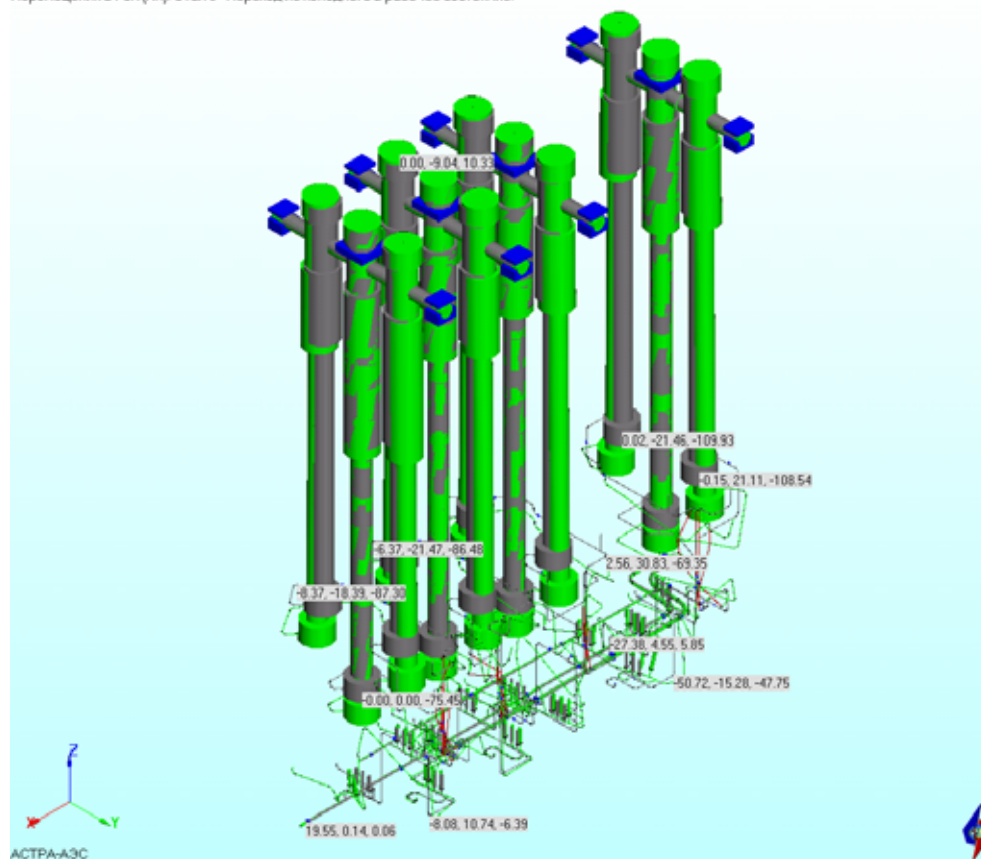


Рис. 4.18 ТС ОКБ ГП № 2. расчетные перемещения при переходе из холодного состояния в рабочее, мм

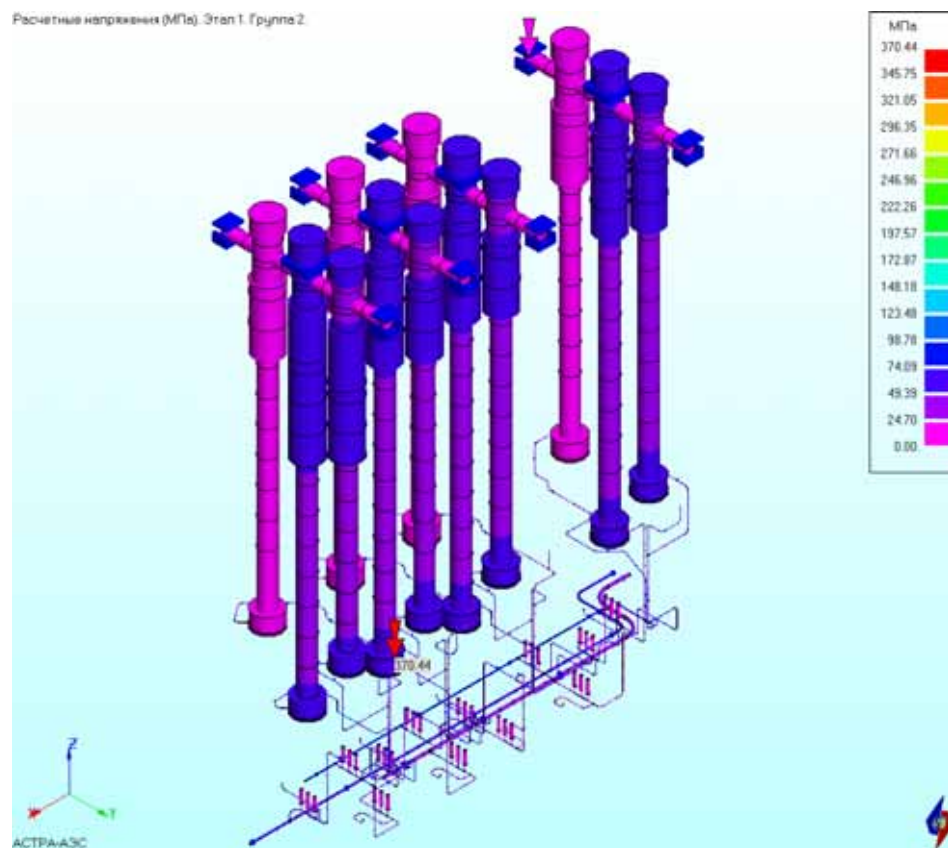


Рис. 4.19 ТС ОКБ ГП № 2. Расчетные напряжения группы (σ)₂, МПа

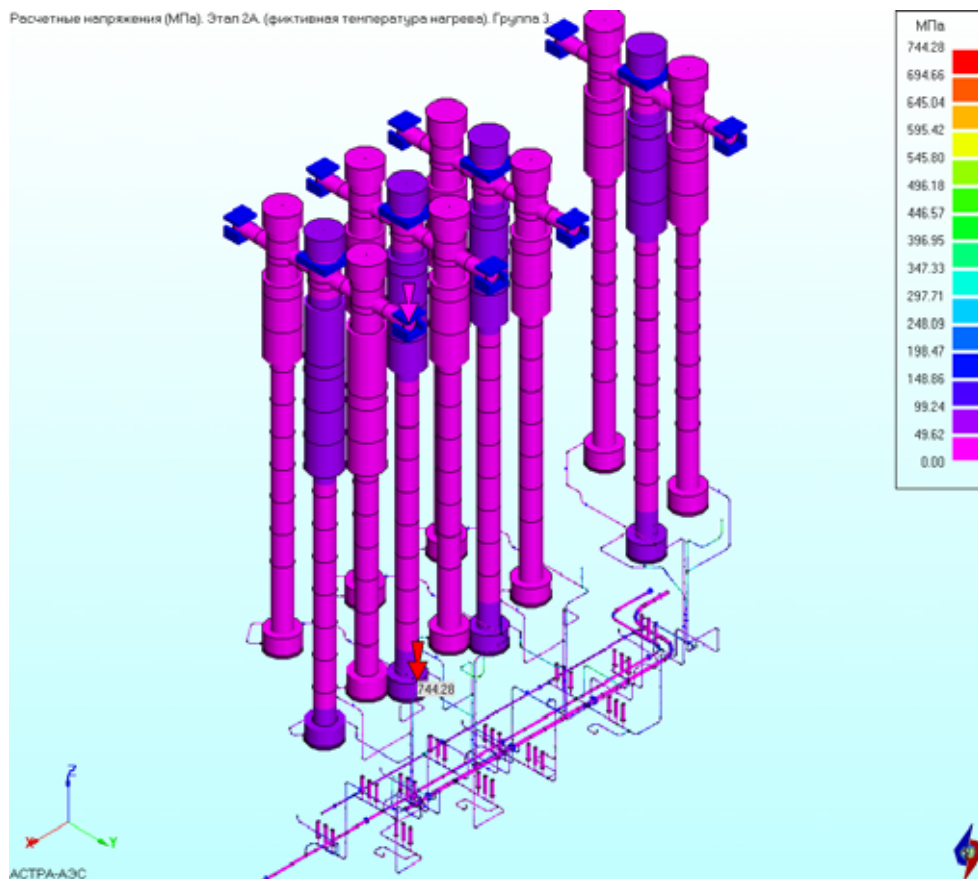


Рис. 4.20 ТС ОКБ ГП № 2. Расчетные напряжения от действия всех квазистатических нагрузок при фиктивной температуре, МПа

5. Разветвленная трубопроводная система (Киевский “Энергопроект”)

В данном разделе представлена разветвленная трубопроводная система, спроектированная и рассчитанная на прочность с применением ПК АСТРА-АЭС'2009 в ОАО “Киевский Энергопроект”. Приведена расчетная модель и некоторые представительные результаты расчета (рис. 5.1 – 5.7).

Размерность модели: 135 участков-суперэлементов, 122 суперэлементных узла, 1249 элементов, 2745 динамических степеней свободы.

ПРЕПРОЦЕССОР

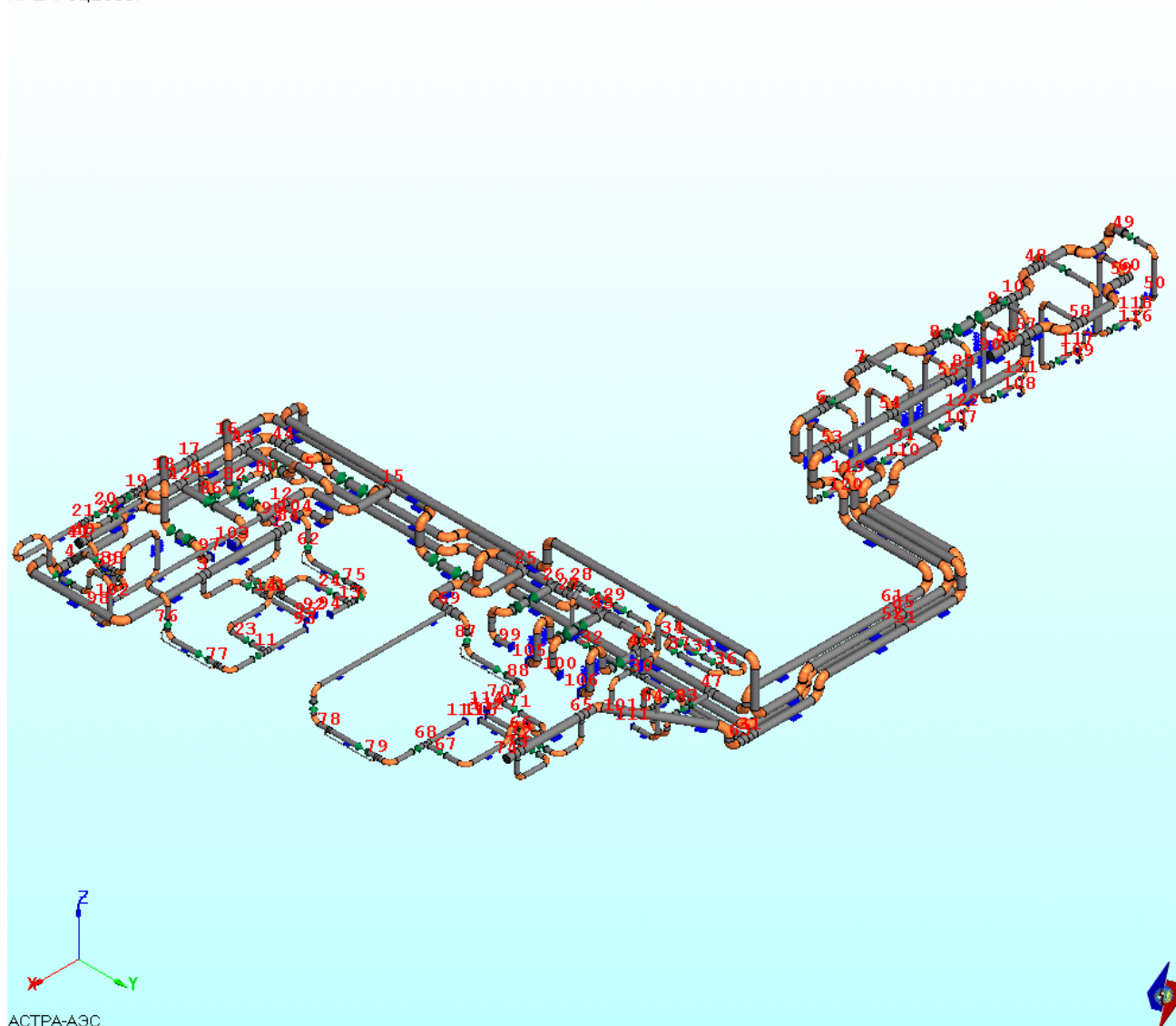


Рис. 5.1 Расчетная АСТРА-модель. Номера узлов суперэлементов

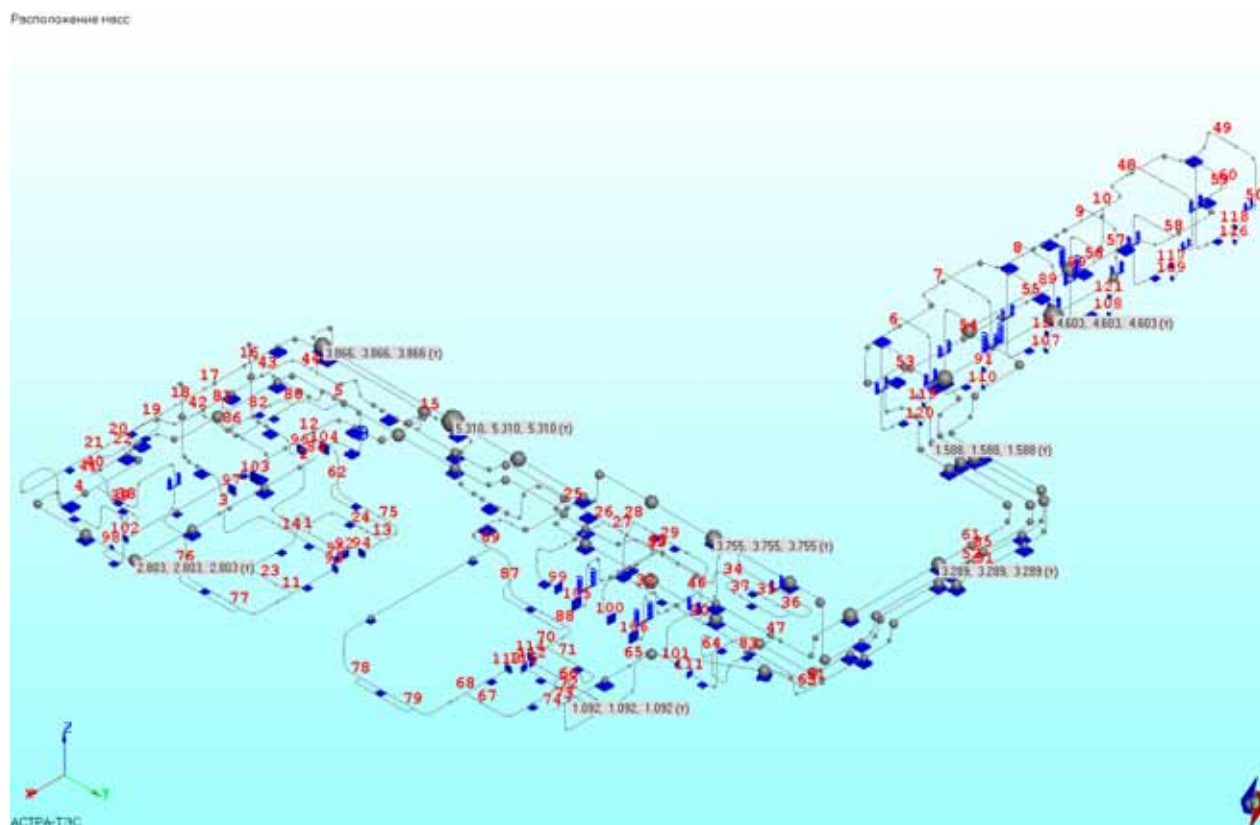


Рис. 5.2 Расчетная динамическая модель (массы – в т)

Перемещения в ГСК (мм). Этап 3 - Переход из холодного в рабочее состояние.

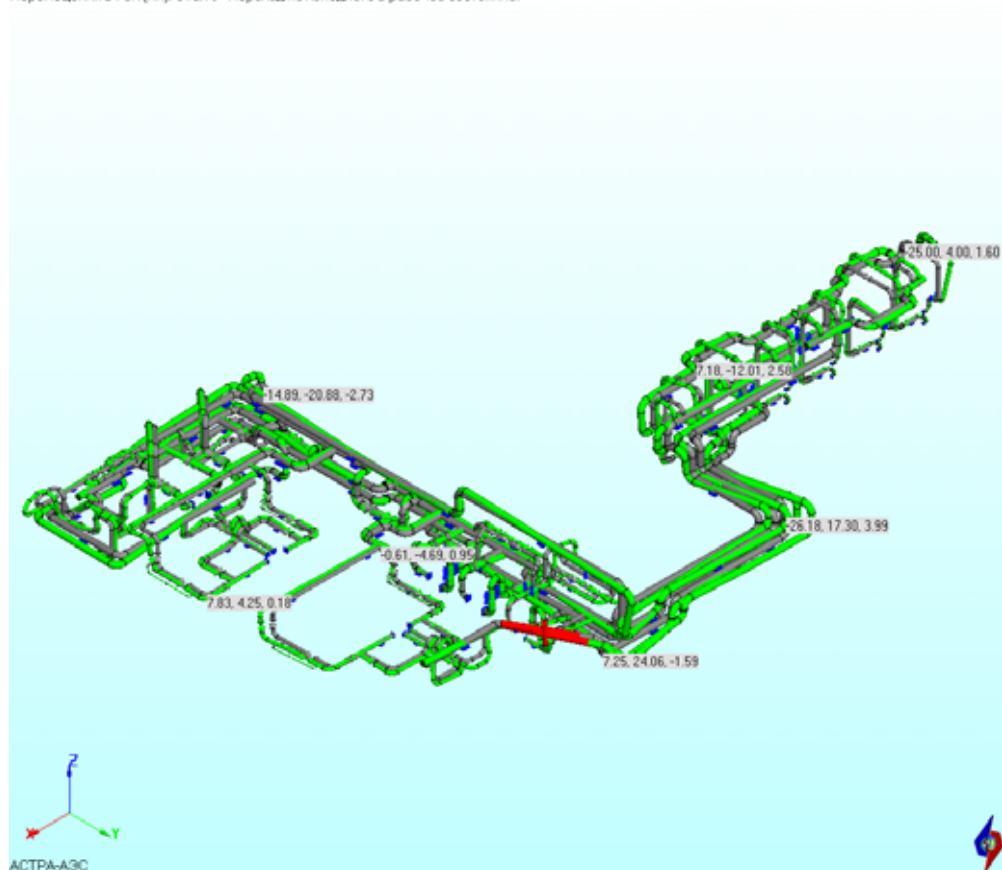


Рис. 5.3 Расчетные перемещения при переходе из холодного состояния в рабочее, мм

Расчетные напряжения (МПа). Этап 3. Группа 3.

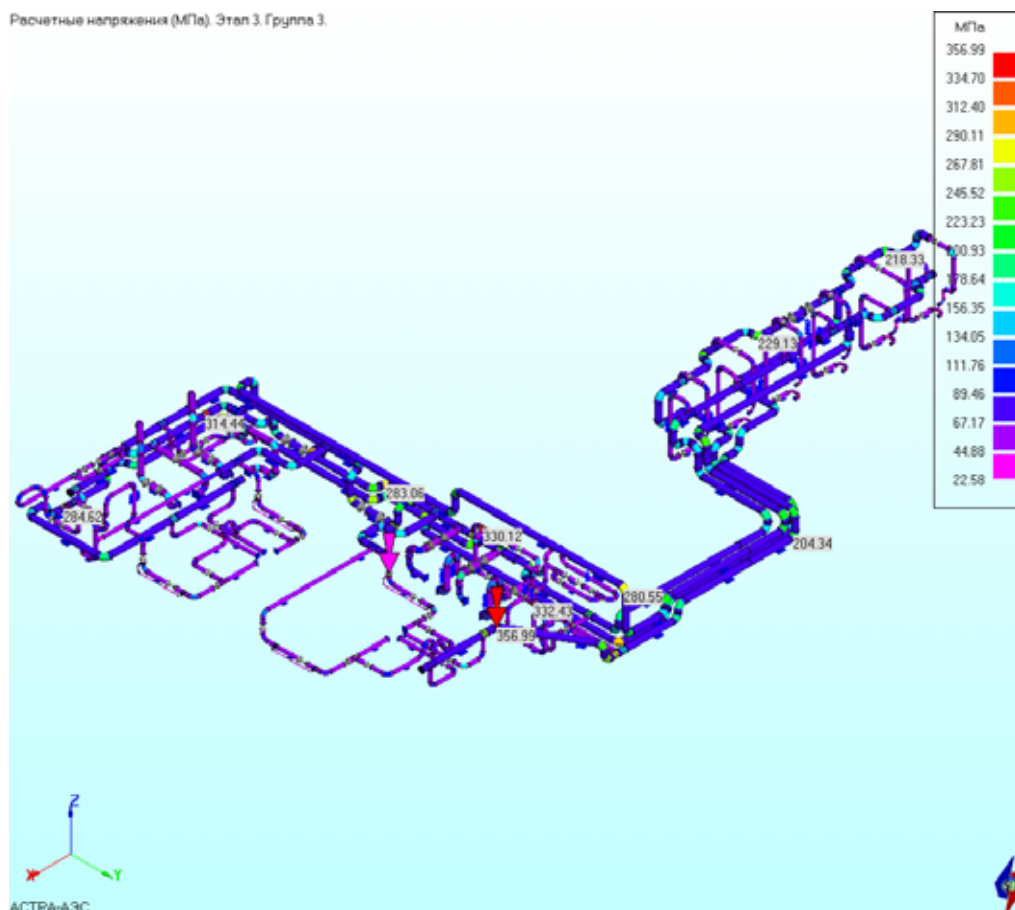


Рис. 5.4 Расчетные напряжения группы $(\sigma)_{RK}$, МПа

Перемещения в ГСК (мм). Этап 25 - Все нагрузки в рабочем состоянии.



Рис. 5.5 Расчетные перемещения от действия всех квазистатических нагрузок, мм

Расчетные напряжения (МПа). Этап 1. Группа 2.

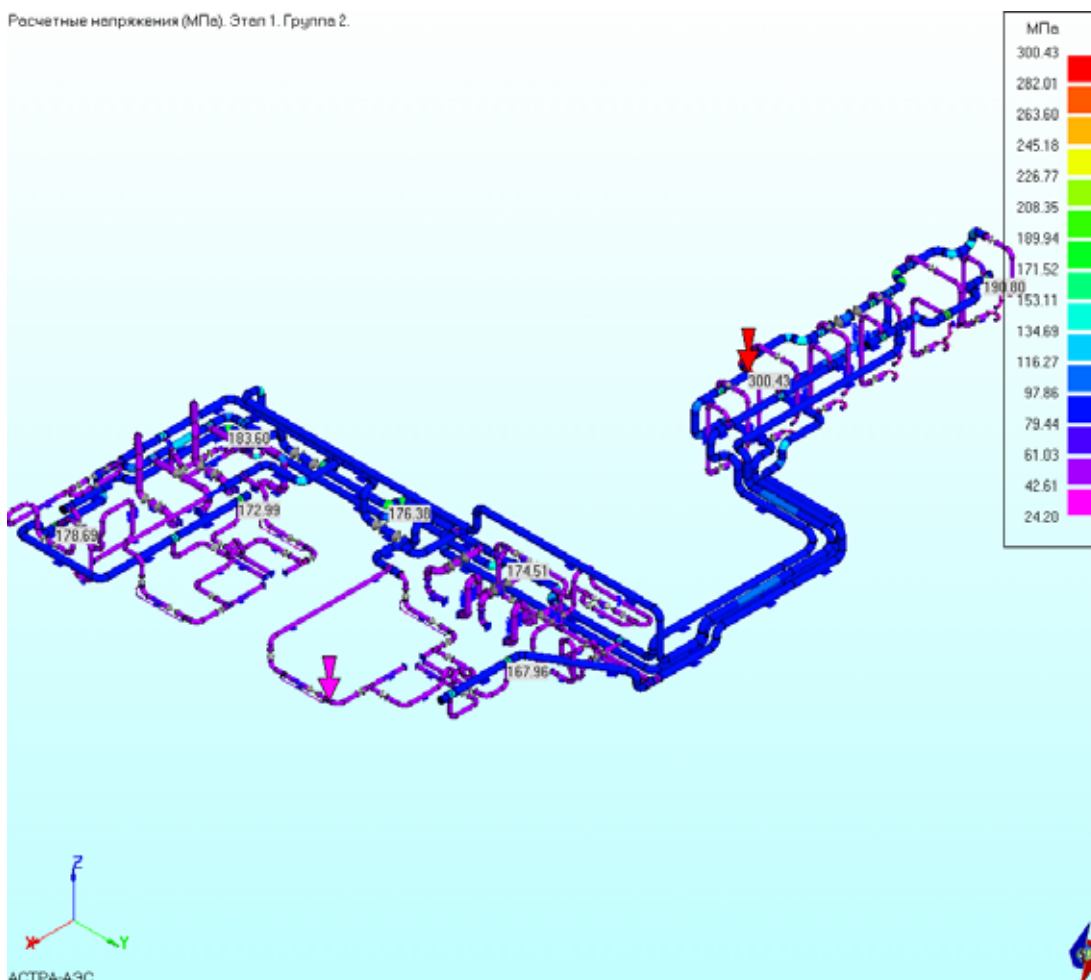
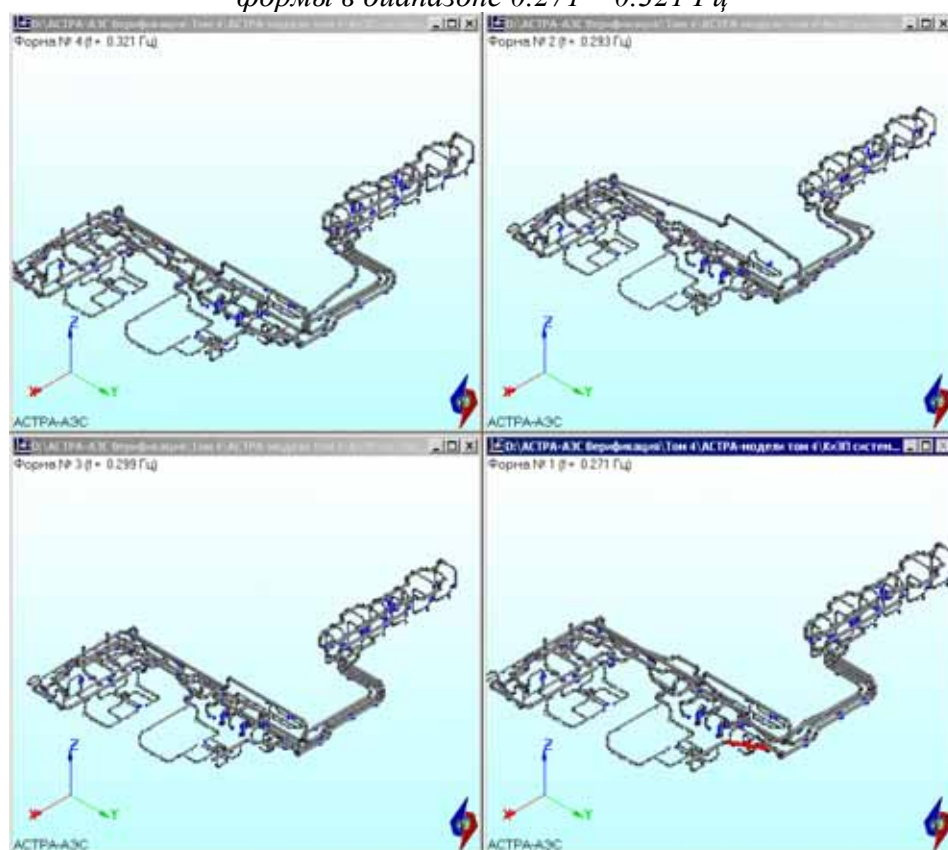


Рис. 5.6 Расчетные напряжения группы $(\sigma)_2$, МПа

формы в диапазоне 0.271 – 0.321 Гц



формы в диапазоне 28.674 – 28.808 Гц

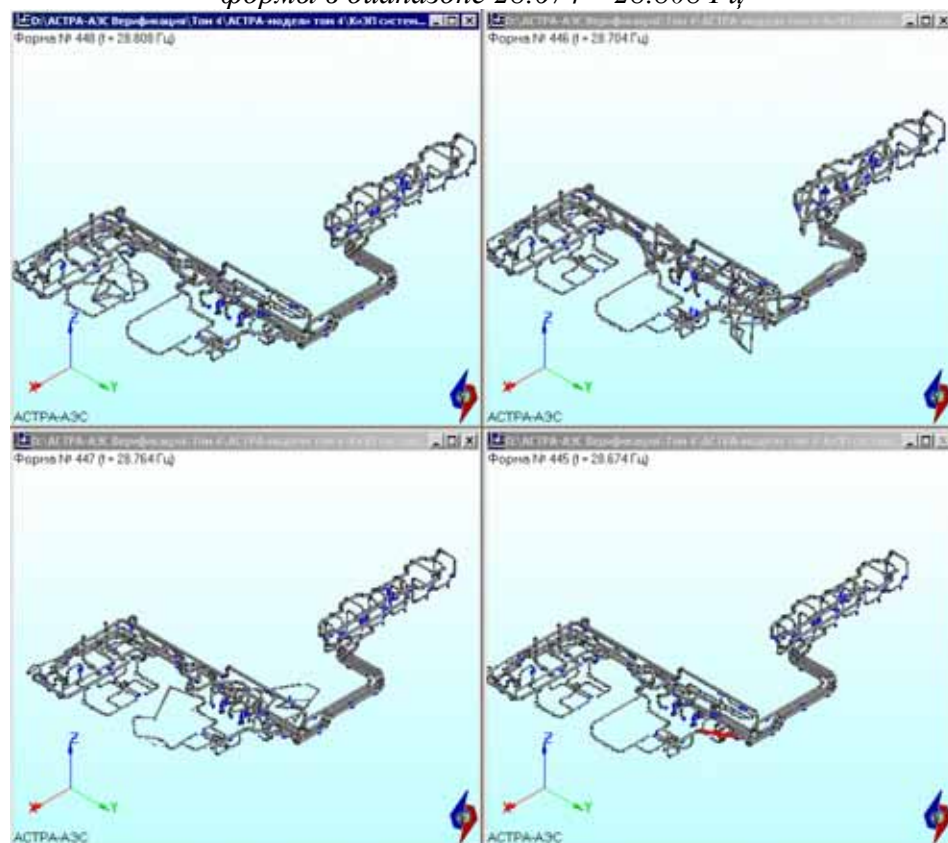


Рис. 5.7 Расчетные собственные формы колебаний

6. Разветвленный трубопровод, трубная решетка (Подольский машзавод, 2008 г.)

В данном разделе представлена трубопроводная система трубной решетки, спроектированная и рассчитанная на прочность с применением ПК АСТРА-АЭС'2009 в ОАО “Подольский машзавод”. Приведена расчетная модель (рис. 6.1 – 6.2) и некоторые представительные результаты расчета (рис. 6.3 – 6.6, таблица 6.1).

Размерность модели: 1553 участков-суперэлементов, 809 суперэлементных узлов, 2871 элементов, 6672 динамических степеней свободы.

Задача интересна своей размерностью и большим числом идентичных подсистем, приводящих к собственным частотам большой кратности. АСТРА-АЭС с помощью блочного метода Ланцоша успешно справилась с этой нетривиальной вычислительной задачей (таблица 6.1).

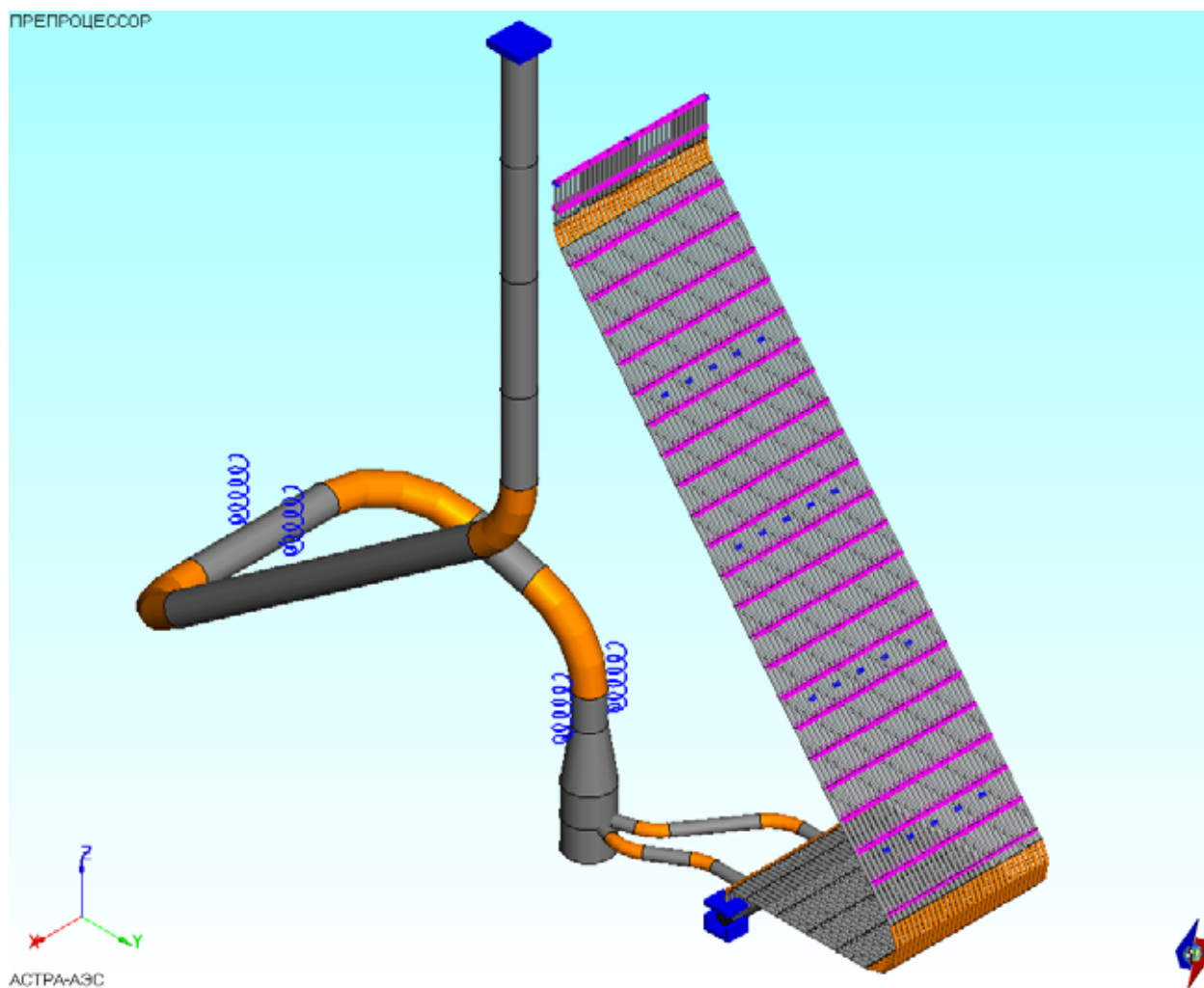


Рис. 6.1 Расчетная АСТРА-модель

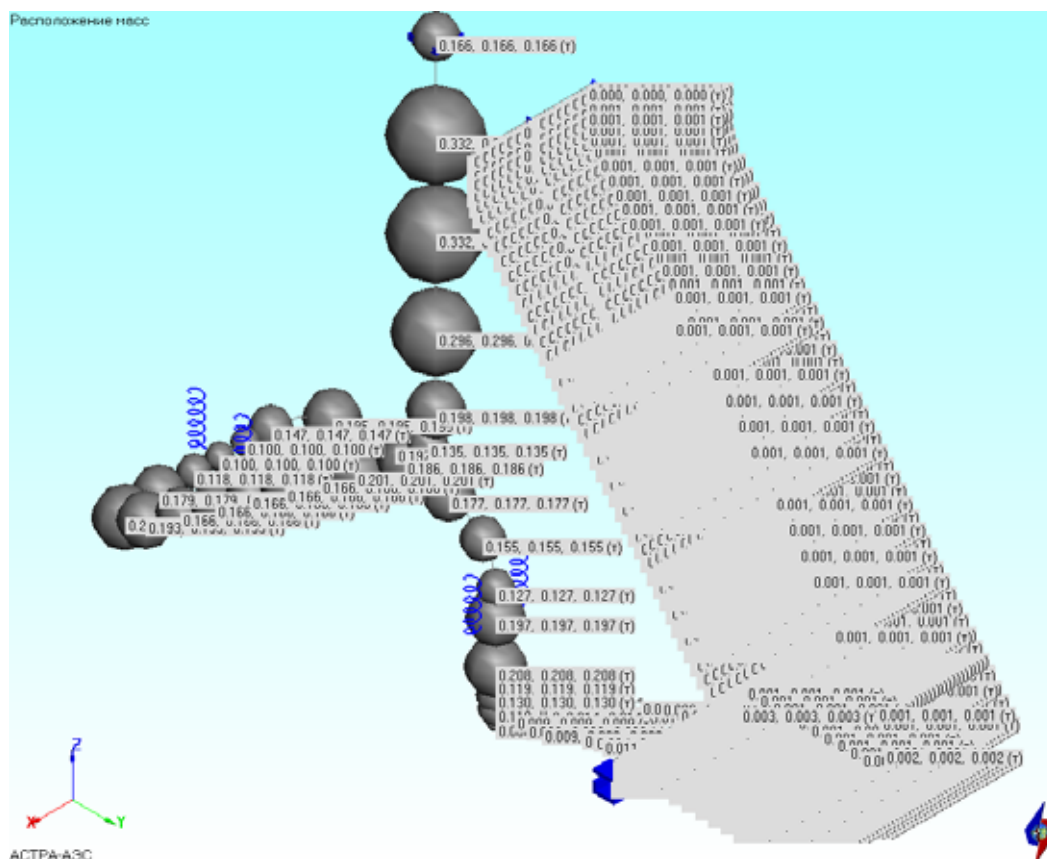


Рис. 6.2 Расчетная динамическая модель

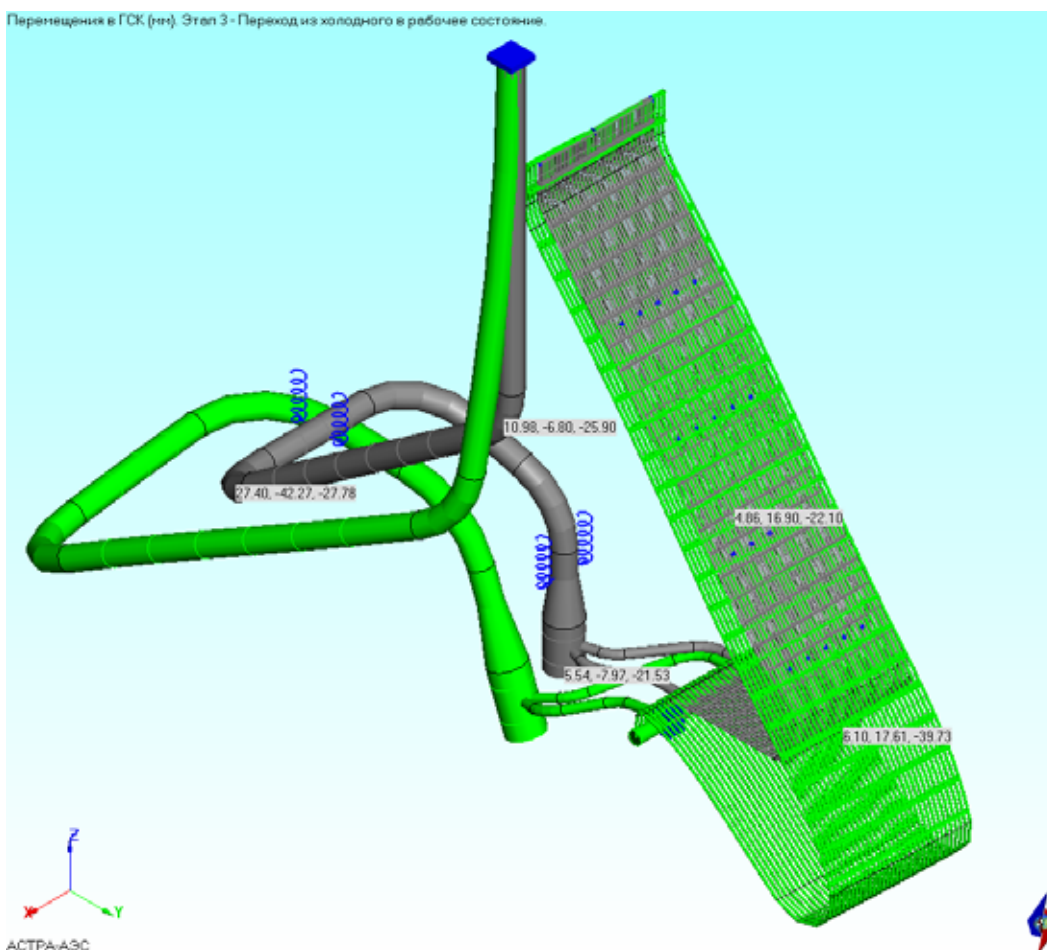


Рис. 6.3 Расчетные перемещения при переходе из холодного в рабочее состояние, мм

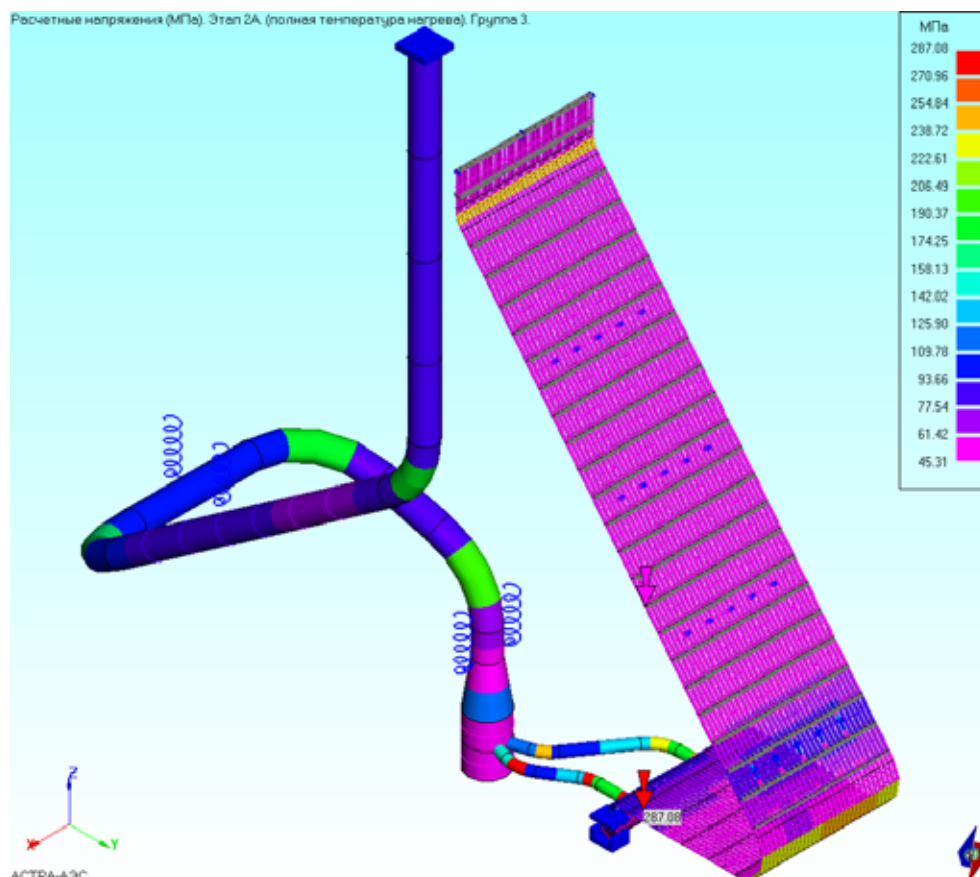


Рис. 6.4 Расчетные напряжения от действия всех квазистатических нагрузок до саморастяжки, МПа

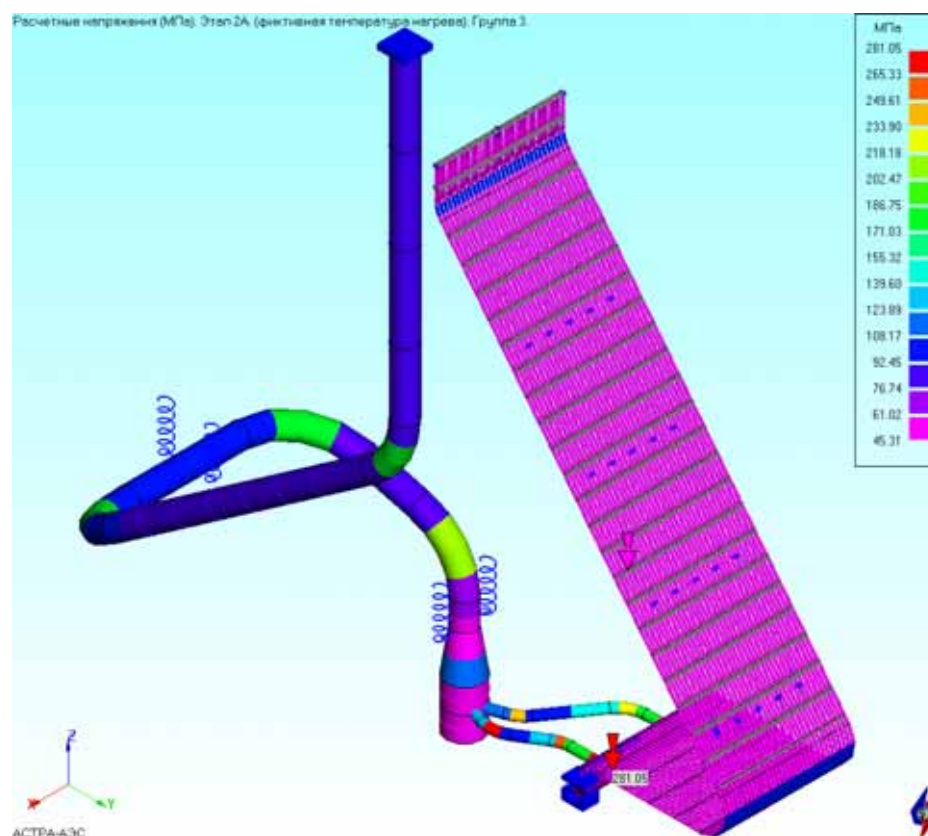
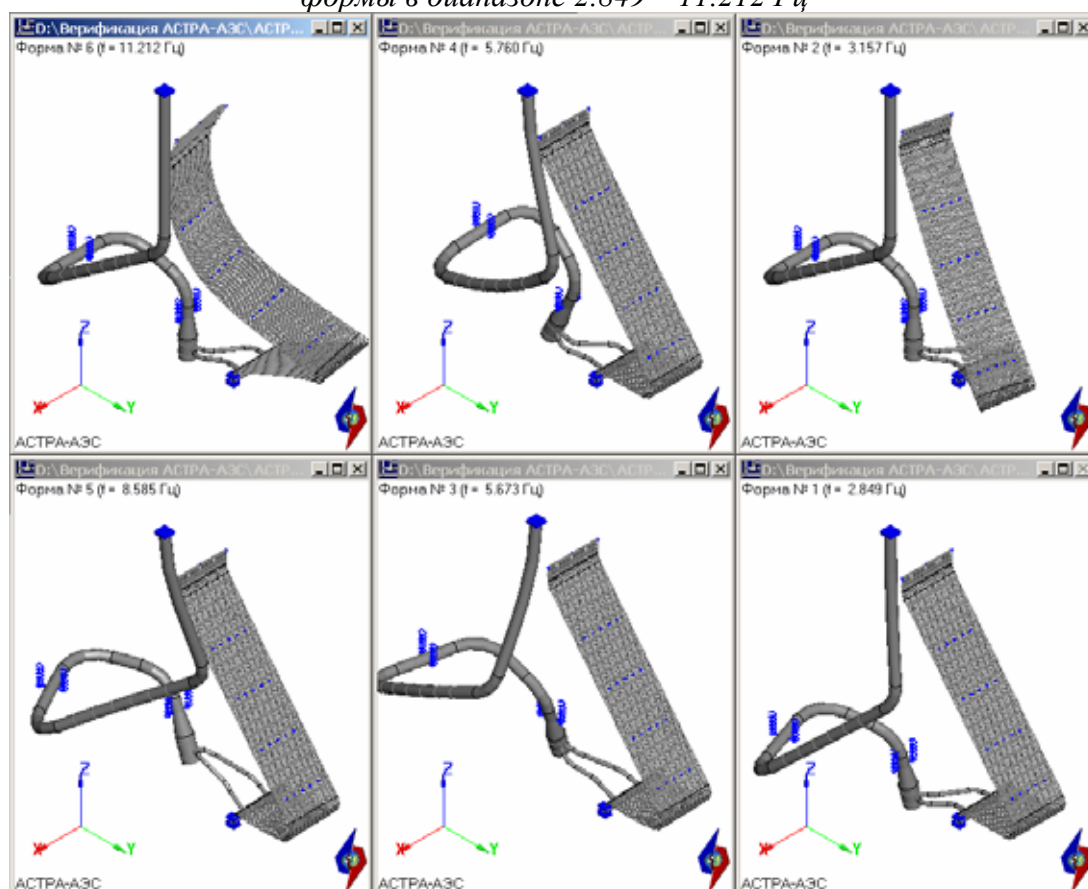


Рис. 6.5 Расчетные напряжения от действия всех квазистатических нагрузок после саморастяжки, МПа

формы в диапазоне 2.849 – 11.212 Гц



формы в диапазоне 32.470 – 32.560 Гц

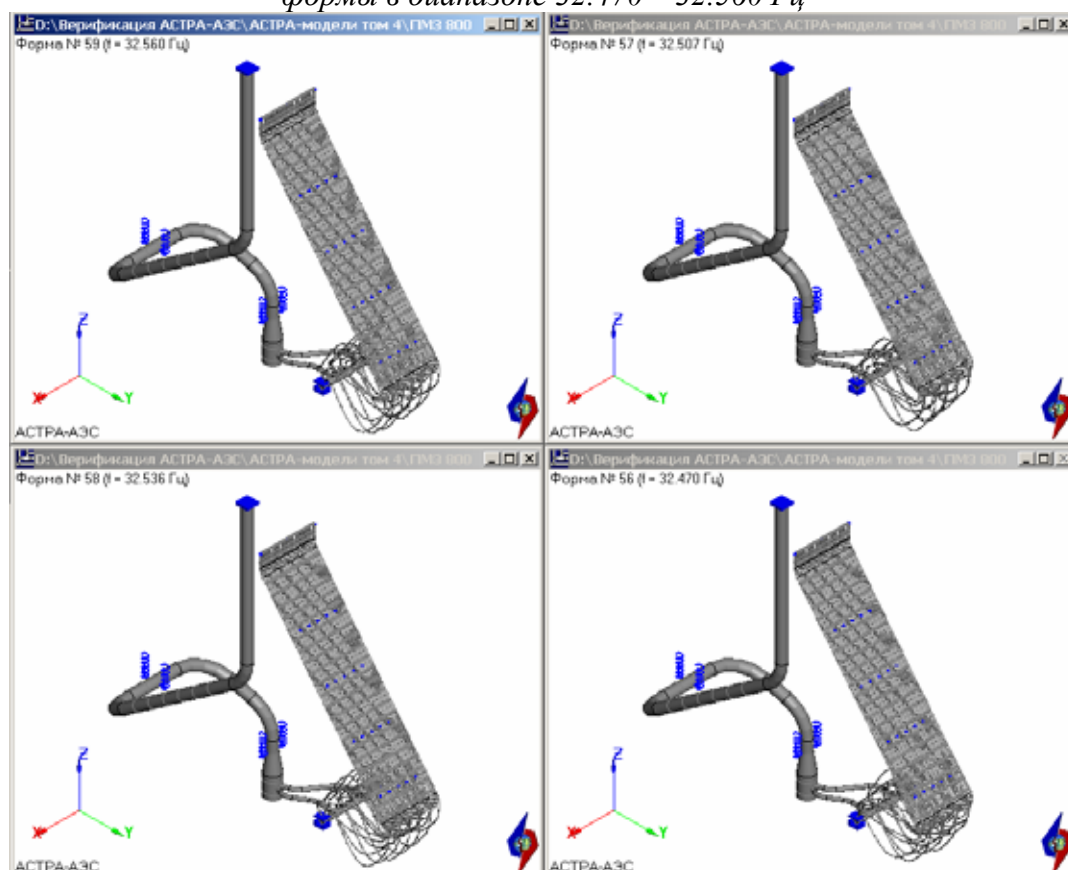


Рис. 6.6 Расчетные собственные формы колебаний

Таблица 6.1

Расчетные собственные частоты и формы колебаний

| N | () | () | () | | | | |
|----|--------|--------|----------|----|--------|--------|--------|
| | | | / | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 17.898 | 2.8485 | 3- 4 | 9 | 1.000 | 0.511 | -0.512 |
| 2 | 19.836 | 3.1570 | 12- 105 | 14 | 1.000 | -0.082 | 0.075 |
| 3 | 35.647 | 5.6733 | 3- 4 | 15 | 1.000 | -0.583 | 0.235 |
| 4 | 36.189 | 5.7597 | 3- 4 | 16 | 0.071 | 1.000 | -0.087 |
| 5 | 53.943 | 8.5853 | 3- 4 | 18 | 1.000 | -0.221 | 0.003 |
| 6 | 70.449 | 11.212 | 15- 113 | 13 | -1.000 | 0.003 | -0.033 |
| 7 | 78.644 | 12.517 | 3- 4 | 10 | -0.141 | 0.319 | -1.000 |
| 8 | 87.173 | 13.874 | 3- 4 | 4 | -0.231 | -1.000 | -0.421 |
| 9 | 100.82 | 16.047 | 172- 240 | 13 | -0.444 | -0.047 | 1.000 |
| 10 | 114.27 | 18.187 | 172- 240 | 11 | 1.000 | 0.006 | -0.283 |
| 11 | 117.10 | 18.636 | 13- 104 | 10 | 1.000 | -0.004 | 0.208 |
| 12 | 123.58 | 19.668 | 172- 240 | 10 | 1.000 | 0.004 | -0.114 |
| 13 | 124.00 | 19.735 | 172- 240 | 10 | 1.000 | 0.003 | -0.085 |
| 14 | 124.98 | 19.892 | 172- 240 | 10 | 1.000 | -0.006 | 0.147 |
| 15 | 125.71 | 20.007 | 9- 108 | 10 | -1.000 | 0.003 | -0.046 |
| 16 | 127.13 | 20.234 | 21- 119 | 10 | 1.000 | 0.000 | -0.001 |
| 17 | 127.88 | 20.353 | 16- 114 | 10 | 1.000 | 0.000 | -0.006 |
| 18 | 128.62 | 20.470 | 159- 234 | 10 | 1.000 | 0.000 | 0.001 |
| 19 | 129.28 | 20.575 | 8- 109 | 10 | 1.000 | 0.000 | 0.009 |
| 20 | 129.85 | 20.666 | 164- 227 | 10 | 1.000 | -0.001 | 0.016 |
| 21 | 130.34 | 20.744 | 11- 106 | 10 | -1.000 | -0.001 | 0.012 |
| 22 | 130.83 | 20.822 | 168- 236 | 10 | 1.000 | 0.000 | -0.010 |
| 23 | 131.24 | 20.887 | 157- 232 | 10 | -1.000 | 0.000 | -0.004 |
| 24 | 131.59 | 20.944 | 165- 226 | 10 | -1.000 | 0.001 | -0.019 |
| 25 | 131.91 | 20.993 | 19- 117 | 10 | -1.000 | -0.001 | 0.013 |
| 26 | 132.14 | 21.032 | 165- 226 | 10 | -1.000 | 0.000 | -0.008 |
| 27 | 132.45 | 21.080 | 14- 112 | 10 | -1.000 | 0.000 | 0.007 |
| 28 | 132.69 | 21.118 | 159- 234 | 10 | -1.000 | 0.000 | 0.003 |
| 29 | 132.95 | 21.159 | 164- 227 | 10 | 1.000 | 0.000 | -0.008 |
| 30 | 133.15 | 21.191 | 165- 226 | 10 | -1.000 | 0.000 | -0.007 |
| 31 | 133.32 | 21.219 | 8- 109 | 10 | 1.000 | 0.000 | 0.003 |
| 32 | 133.36 | 21.225 | 20- 118 | 10 | -1.000 | -0.001 | 0.021 |
| 33 | 133.47 | 21.242 | 19- 117 | 10 | -1.000 | 0.000 | 0.006 |
| 34 | 133.59 | 21.261 | 17- 115 | 10 | -1.000 | 0.000 | 0.001 |
| 35 | 133.69 | 21.277 | 19- 117 | 10 | -1.000 | 0.000 | 0.001 |
| 36 | 133.77 | 21.290 | 160- 231 | 10 | 1.000 | 0.000 | 0.002 |
| 37 | 133.84 | 21.301 | 163- 228 | 10 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 38 | 133.89 | 21.309 | 166- 194 | 10 | -1.000 | 0.000 | 0.001 |
| 39 | 133.93 | 21.315 | 6- 111 | 10 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 40 | 133.95 | 21.318 | 166- 194 | 10 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 41 | 134.30 | 21.374 | 17- 115 | 10 | -1.000 | 0.002 | -0.052 |
| 42 | 135.17 | 21.513 | 161- 230 | 10 | -1.000 | 0.001 | -0.004 |
| 43 | 165.19 | 26.290 | 172- 240 | 9 | 0.231 | -0.116 | 1.000 |
| 44 | 171.50 | 27.296 | 167- 235 | 9 | 1.000 | -0.035 | 0.193 |
| 45 | 178.14 | 28.352 | 13- 104 | 9 | -0.165 | -0.159 | 1.000 |
| 46 | 184.12 | 29.304 | 13- 104 | 9 | -0.264 | -0.163 | 1.000 |
| 47 | 188.97 | 30.075 | 3- 4 | 14 | -0.078 | -0.516 | 1.000 |
| 48 | 192.65 | 30.661 | 172- 240 | 8 | -0.073 | 0.162 | -1.000 |
| 49 | 195.38 | 31.096 | 6- 111 | 8 | -0.026 | -0.214 | 1.000 |
| 50 | 200.47 | 31.906 | 165- 226 | 8 | -0.001 | 0.219 | -1.000 |
| 51 | 200.88 | 31.971 | 3- 4 | 13 | 1.000 | -0.089 | 0.045 |
| 52 | 201.83 | 32.122 | 18- 116 | 8 | 0.024 | -0.214 | 1.000 |
| 53 | 202.58 | 32.242 | 160- 231 | 8 | -0.002 | 0.218 | -1.000 |
| 54 | 203.09 | 32.323 | 9- 108 | 8 | -0.022 | -0.219 | 1.000 |
| 55 | 203.75 | 32.428 | 21- 119 | 8 | -0.008 | 0.219 | -1.000 |
| 56 | 204.02 | 32.470 | 16- 114 | 8 | 0.001 | 0.220 | -1.000 |
| 57 | 204.25 | 32.507 | 15- 113 | 8 | -0.003 | -0.223 | 1.000 |
| 58 | 204.43 | 32.536 | 20- 118 | 8 | -0.002 | -0.222 | 1.000 |
| 59 | 204.58 | 32.560 | 170- 238 | 8 | 0.001 | -0.223 | 1.000 |
| 60 | 204.71 | 32.580 | 170- 238 | 8 | -0.009 | 0.223 | -1.000 |
| 61 | 204.81 | 32.596 | 9- 108 | 8 | 0.003 | 0.224 | -1.000 |
| 62 | 204.89 | 32.609 | 157- 232 | 8 | 0.001 | 0.224 | -1.000 |

| N | (/) | () | () | | | | |
|-----|--------|--------|----------|----|--------|--------|--------|
| | | | / | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 |
| 63 | 204.95 | 32.619 | 171- 239 | 8 | 0.011 | 0.224 | -1.000 |
| 64 | 205.00 | 32.627 | 158- 233 | 8 | 0.000 | 0.224 | -1.000 |
| 65 | 205.05 | 32.634 | 163- 228 | 8 | -0.003 | 0.224 | -1.000 |
| 66 | 205.08 | 32.640 | 12- 105 | 8 | 0.002 | -0.224 | 1.000 |
| 67 | 205.11 | 32.644 | 171- 239 | 8 | 0.001 | 0.224 | -1.000 |
| 68 | 205.13 | 32.648 | 171- 239 | 8 | 0.001 | -0.224 | 1.000 |
| 69 | 205.15 | 32.651 | 165- 226 | 8 | -0.001 | -0.224 | 1.000 |
| 70 | 205.17 | 32.654 | 167- 235 | 8 | -0.001 | -0.224 | 1.000 |
| 71 | 205.18 | 32.656 | 161- 230 | 8 | 0.003 | 0.225 | -1.000 |
| 72 | 205.19 | 32.658 | 17- 115 | 8 | 0.001 | 0.225 | -1.000 |
| 73 | 205.20 | 32.659 | 11- 106 | 8 | 0.002 | 0.225 | -1.000 |
| 74 | 205.21 | 32.660 | 10- 107 | 8 | 0.000 | 0.224 | -1.000 |
| 75 | 205.22 | 32.661 | 168- 236 | 8 | 0.000 | 0.224 | -1.000 |
| 76 | 205.22 | 32.662 | 167- 235 | 8 | 0.000 | 0.225 | -1.000 |
| 77 | 205.22 | 32.662 | 14- 112 | 8 | 0.000 | -0.224 | 1.000 |
| 78 | 205.23 | 32.663 | 21- 119 | 8 | 0.000 | 0.224 | -1.000 |
| 79 | 205.49 | 32.705 | 172- 240 | 8 | -0.004 | -0.225 | 1.000 |
| 80 | 214.81 | 34.188 | 13- 104 | 8 | -0.045 | 0.262 | -1.000 |
| 81 | 220.63 | 35.114 | 13- 104 | 8 | 0.492 | -0.234 | 1.000 |
| 82 | 250.98 | 39.944 | 72- 745 | 1 | 0.043 | -1.000 | -0.033 |
| 83 | 274.48 | 43.686 | 193 | | -0.014 | 1.000 | 0.710 |
| 84 | 281.63 | 44.823 | 193 | | -0.115 | -1.000 | -0.779 |
| 85 | 284.47 | 45.274 | 456- 488 | 1 | -0.594 | 1.000 | 0.673 |
| 86 | 296.69 | 47.220 | 168- 236 | 7 | 1.000 | 0.047 | -0.155 |
| 87 | 297.36 | 47.326 | 168- 236 | 7 | 1.000 | 0.089 | -0.201 |
| 88 | 306.02 | 48.705 | 10- 107 | 6 | 1.000 | -0.044 | 0.115 |
| 89 | 312.84 | 49.790 | 172- 240 | 6 | 1.000 | 0.054 | -0.086 |
| 90 | 313.63 | 49.915 | 13- 104 | 6 | 1.000 | 0.013 | -0.012 |
| 91 | 313.73 | 49.931 | 172- 240 | 6 | 1.000 | -0.085 | 0.134 |
| 92 | 315.02 | 50.138 | 21- 119 | 6 | -1.000 | 0.005 | -0.004 |
| 93 | 315.25 | 50.173 | 16- 114 | 6 | -1.000 | -0.008 | 0.005 |
| 94 | 315.45 | 50.205 | 171- 239 | 6 | 1.000 | 0.005 | -0.009 |
| 95 | 315.57 | 50.224 | 8- 109 | 6 | -1.000 | 0.009 | -0.013 |
| 96 | 315.61 | 50.230 | 12- 105 | 14 | 1.000 | 0.002 | 0.002 |
| 97 | 315.68 | 50.242 | 12- 105 | 6 | 1.000 | -0.010 | 0.016 |
| 98 | 315.76 | 50.254 | 165- 226 | 14 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 99 | 315.76 | 50.255 | 157- 232 | 14 | -1.000 | -0.001 | -0.002 |
| 100 | 315.77 | 50.257 | 167- 235 | 14 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |

Литература

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