

Анализ прочности и работоспособности системы аварийного расхолаживания реактора АЭС

Руководитель: *А.В. Петренко,
Авторы доклада: *А.А. Назаренко, *Д.В. Филягин
(*ОАО «СПбАЭП»)

В процессе проектирования и эксплуатации к АЭС предъявляют повышенные требования по надежности и безопасности. Особенную роль в обеспечении безопасности эксплуатации АЭС играет система аварийного расхолаживания (САРХ) с воздушными теплообменниками (ВТО) (рис.1) реактора АЭС. САРХ предназначена как для аварийного расхолаживания активной зоны и отвода остаточных энерговыделений, так и для планового расхолаживания установки при останове и отводе остаточных энерговыделений при перегрузке топлива.

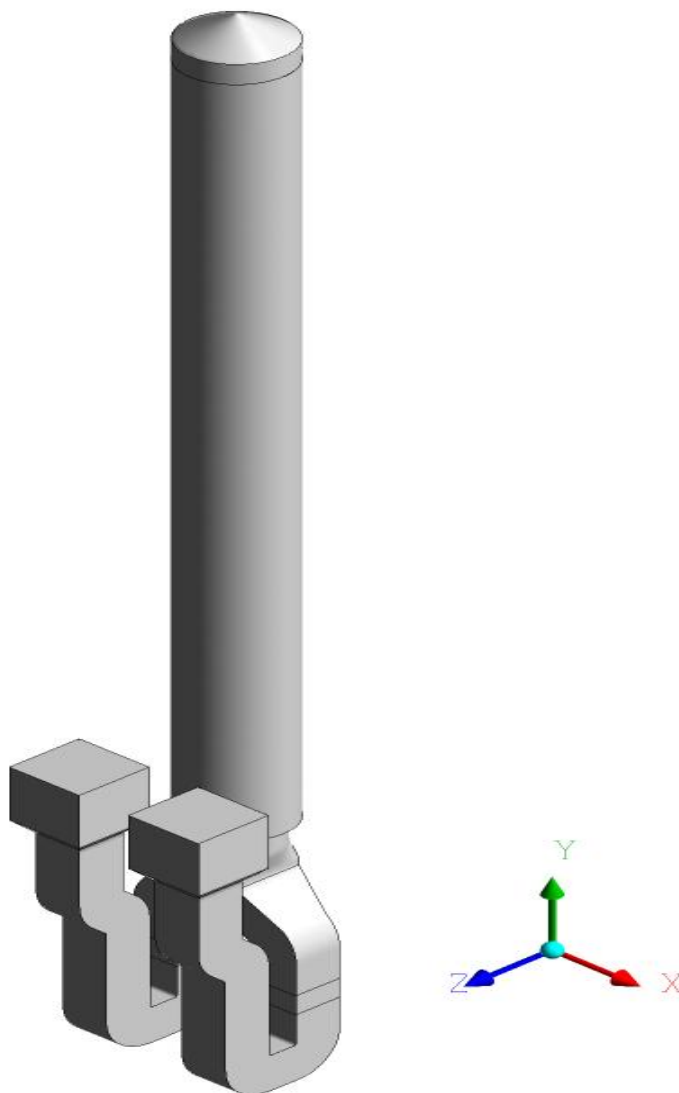


Рис.1. Модель САРХ ВТО

Для рассматриваемой САРХ в режиме аварийного расхолаживания с каждого из двух теплообменников системы должно сниматься заданное значение тепловой мощности. Для этого при наиболее неблагоприятной с точки зрения теплообмена температуре наружного воздуха +40 °С необходимо, чтобы массовый расход воздуха через каждый теплообменник оставался на требуемом уровне. Тогда при заданной высоте трубы (порядка 60 м при протяженности всего тракта около 100 м) охлаждающий воздух на выходе из теплообменника будет иметь температуру, позволяющую получить естественную тягу.

Одной из основных задач моделирования САРХ является ответ на вопрос, обеспечит ли данная система при заданной высоте трубы требуемый уровень теплосъема в режиме аварийного расхолаживания в нужном диапазоне температур наружного воздуха.

Для ответа на этот вопрос проделана работа по аэродинамическому анализу работоспособности САРХ как с помощью уже давно известных методик, так и с использованием одного из современных расчетных газодинамических пакетов CFX. Приводится сравнение полученных результатов.

Еще одним важным вопросом является прочность конструкции САРХ при особых внешних динамических воздействиях. Поскольку предлагаемая геометрия конструкции является достаточно сложной, то расчет на сейсмическое воздействие целесообразно выполнять с помощью метода конечных элементов, что позволяет максимально достоверно отразить действительную геометрию. В данной работе приводится конечно-элементный расчет, выполненный в многофункциональном пакете ANSYS линейно-спектральным методом.

Аэродинамический анализ

Были выполнены оценочные «гидравлические» расчеты проточного тракта системы при заданном номинальном расходе и фиксированных входной и выходной температурах охлаждающего воздуха. Расчеты показывают, что суммарная величина потерь давления в подводящих и отводящих воздуховодах САРХ в совокупности с заданным перепадом давления на воздушном теплообменнике находится на уровне, близком к величине полезной тяги. А именно, консервативная оценка [1] (с выбором максимально возможных коэффициентов сопротивления элементов проточного тракта) дает значение на 8,3 % превышающее допустимое. Более оптимистичная оценка [1] (с выбором коэффициентов местных сопротивлений по другой методике), напротив, дает величину полных потерь на 7 % меньше величины полезной тяги.

В сложившейся ситуации представлялось необходимым провести дополнительное уточняющее исследование, состоящее в приложении метода численного моделирования к расчету пространственных турбулентных течений и теплообмена в элементах проточной части системы. Такое исследование позволило бы:

1. уточнить величину потерь полного давления в подводящих и отводящих воздуховодах САРХ в текущем варианте конструкции;
2. получить детальное представление о течении в проточной части, на основе которого, возможно, будет вынесено предложение по улучшению существующей конструкции;
3. уточнить величину полезной тяги путем непосредственного учета теплообмена охлаждающего воздуха с боковой поверхностью сборной вертикальной трубы;
4. непосредственно учесть зависимость коэффициентов аэродинамического сопротивления и теплоотдачи ВТО от расхода охлаждающего воздуха.

Численное моделирование течения в проточной части САРХ подразумевает под собой численное решение осредненных по Рейнольдсу стационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемой вязкой среды, замкнутых при помощи той или иной дифференциальной модели турбулентности. Дискретизация уравнений производится по методу конечных объемов с использованием многоблочных неструктурированных расчетных сеток. Такие расчеты требуют проведения вычислений на высокопроизводительных многопроцессорных системах при помощи развитых коммерческих программных пакетов, таких как ANSYS CFX или ANSYS Fluent. В данном расчете предпочтение было отдано первому из перечисленных пакетов.

Отличительной особенностью аэродинамического анализа от механического является моделируемая область. В то время как в механических задачах нас интересует напряженно-деформируемое состояние конструкции (стенки труб, оборудования и т.п.), в задачах газодинамики интерес представляют внутренние объемы этих конструкций для задач внутреннего течения либо внешняя геометрическая форма объекта исследования для задач обтекания.

В данном случае мы имеем задачу о внутреннем течении воздуха по трактам воздуховода САРХ, с целью обеспечить необходимую циркуляцию для отвода излишнего тепла через воздушный теплообменник.

Еще одним важным вопросом при численном решении аэродинамической задачи является правильный выбор толщины элементов пристеночного слоя для наиболее точного моделирования ввиду того, что течение вблизи стенки намного меньше скорости течения в основной части потока.

Пример расчетной сетки с учтенными требованиями, предъявляемыми при численном моделировании, можно наблюдать на рис. 2.

Схема приложения граничных условий приведена на рис. 3., где на входе задается массовый расход, а выход остается в положении "открыт". В модель включены поверхность теплоотдачи САРХ ВТО с окружающей средой, аэродинамическое сопротивление УПКВ и тепловая мощность, испускаемая от пучков труб теплообменника.

Проведенный анализ показал, что конструкция САРХ ВТО удовлетворяет необходимым требованиям по циркуляции воздуха для отвода излишних энерговыделений.

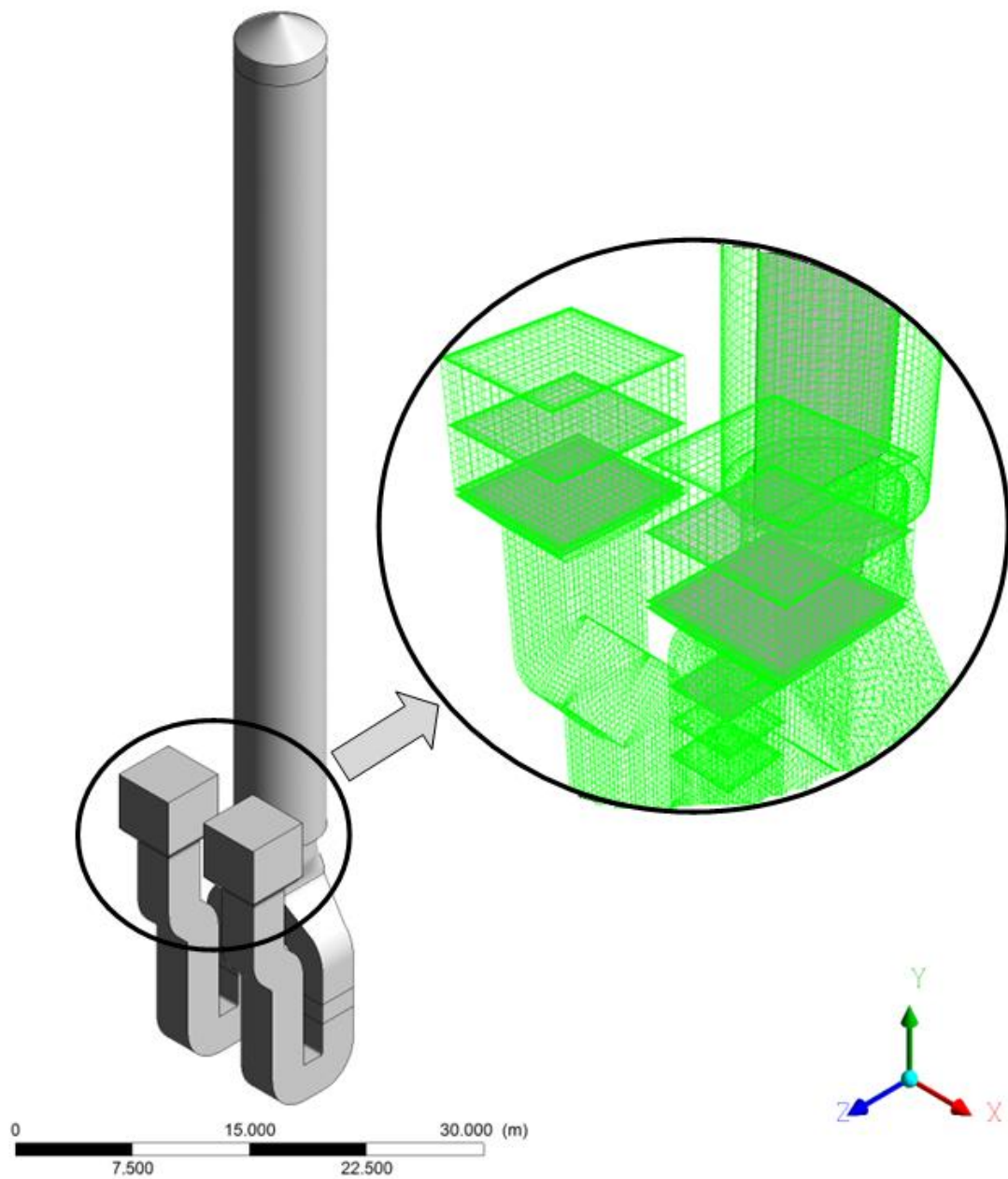


Рис.2. Модель с расчетной сеткой

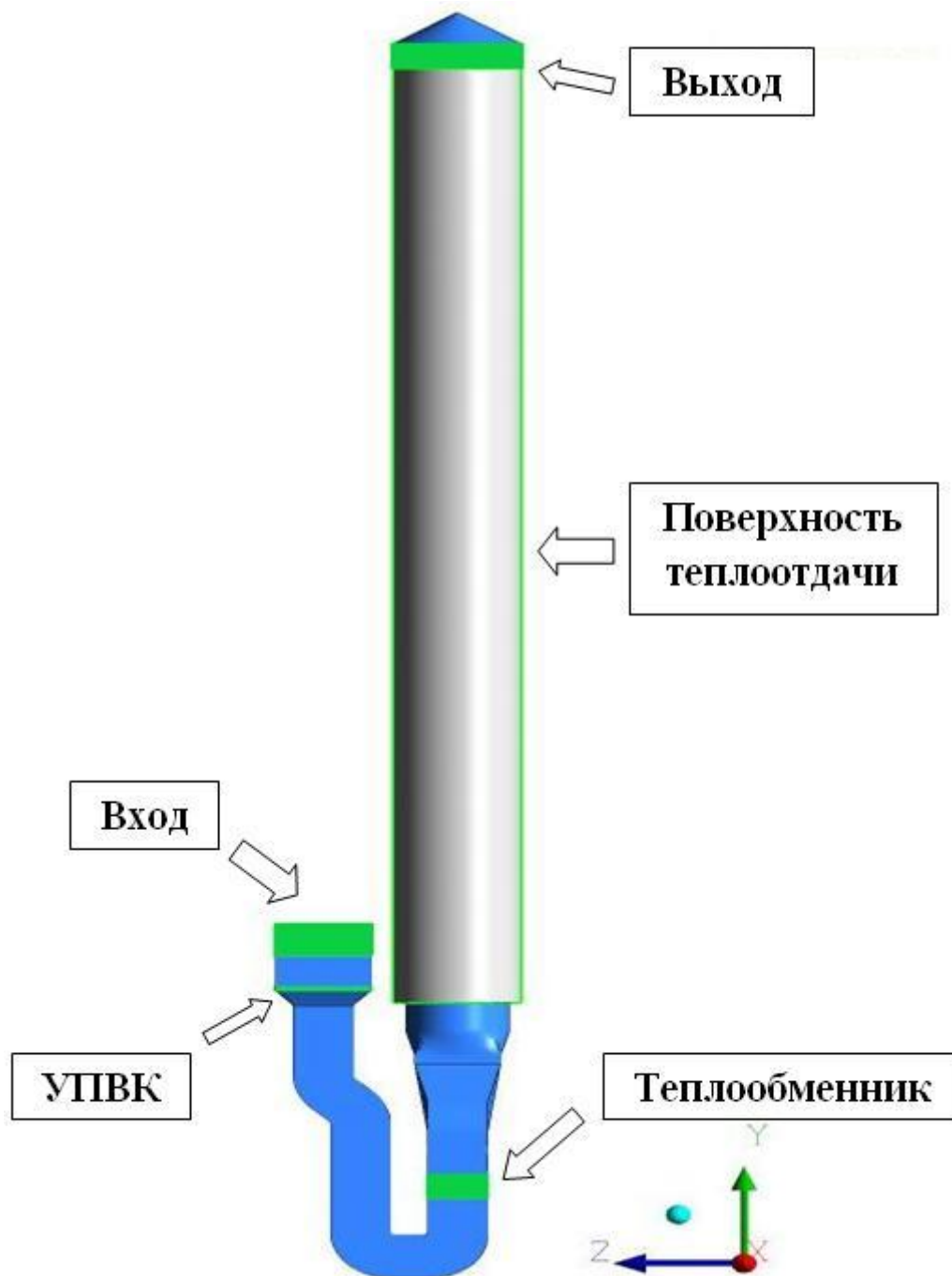


Рис. 3. Схема приложения граничных условий

Анализ прочности при особых внешних динамических воздействиях

Рассмотренная конструкция отнесена к I категории сейсмостойкости, и возможными динамическими воздействиями для нее являются землетрясение, падение самолета и ударная волна от взрыва.

Расчет производился методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе ANSYS. При моделировании воздуховода использовались оболочечные конечные элементы. Общее количество узловых соединений в модели 15469 (92814 степеней свободы). Общий вид модели представлен на рис.4.

Отклик конструкции от сейсмических нагрузок определялся с использованием линейно-спектрального метода (ЛСМ), основанного на представлении сейсмического воздействия в виде спектров отклика (СО) и использовании принципа модальной суперпозиции [2,3]. С помощью СО определяются максимумы R_i абсолютных величин модальных откликов (перемещения, внутренние усилия, напряжения, реакции и пр.). Такие модальные отклики R_i должны быть сложены для получения суммарного сейсмического отклика системы R . Характерные огибающие СО для данных воздухопроводов представлены на рис.5.

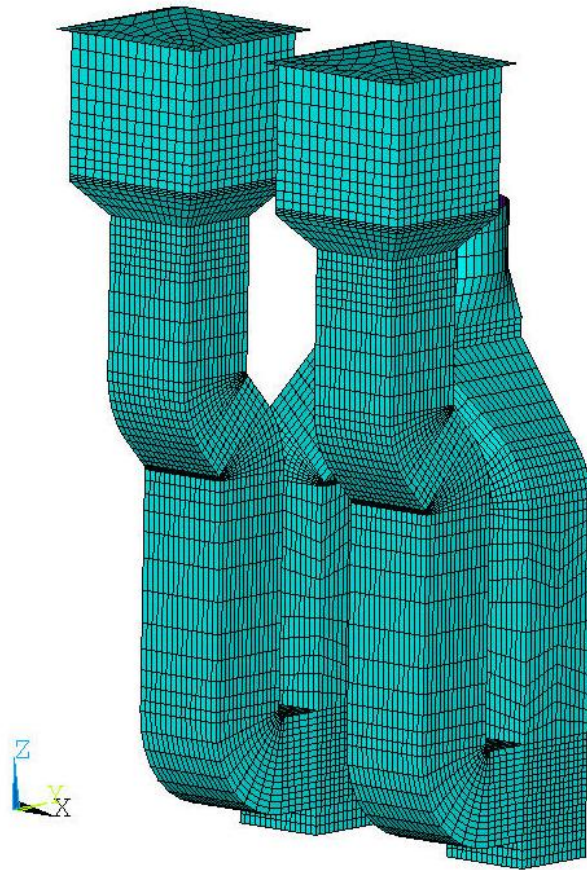


Рис.4. КЭ модель воздуховода

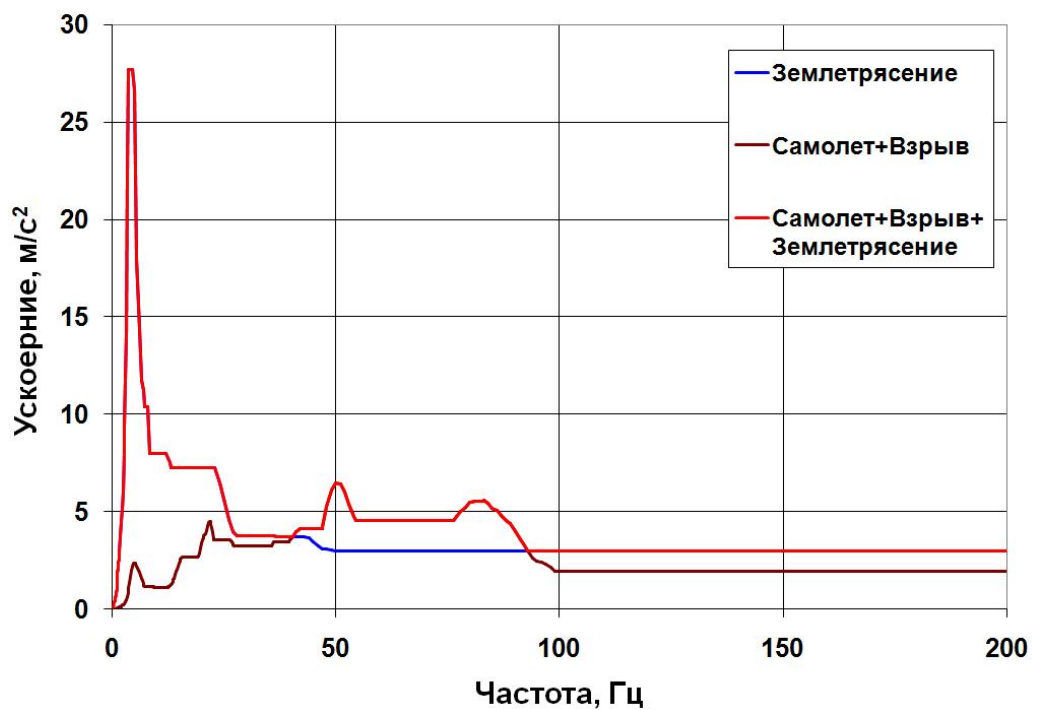


Рис.5. Огибающая спектров ответа

Расчет конструкции по ЛСМ можно условно разделить на следующие этапы:

1. вычисление собственных частот и форм конструкции;
2. вычисление модальных (соответствующих каждой из собственных форм) инерционных сейсмических нагрузок на конструкцию для заданного направления воздействия;

3. вычисление требуемых модальных откликов конструкции (перемещений, внутренних усилий и пр.) при действии модальных инерционных сейсмических нагрузок для заданного направления воздействия;

4. вычисление суммарного отклика конструкции путем суммирования модальных откликов от воздействия в заданном направлении в соответствии с [2] по правилу «ККСК»:

$$R_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n R_{ik}^2}, \text{ где } k = x, y, z; \quad n - \text{ количество учитываемых форм};$$

5. вычисление суммарного отклика путем суммирования откликов от трех направлений сейсмического воздействия по правилу «ККСК» [2]:

$$R = \pm \sqrt{\sum_{k=x,y,z} R_k^2}, \text{ где } R_k - \text{ отклик от каждой компоненты воздействия};$$

В результате расчета было получено напряженно-деформированное состояние воздухопроводов (рис.6). Однако максимальное значение возникающих напряжений в несколько раз превосходит допустимые значения.

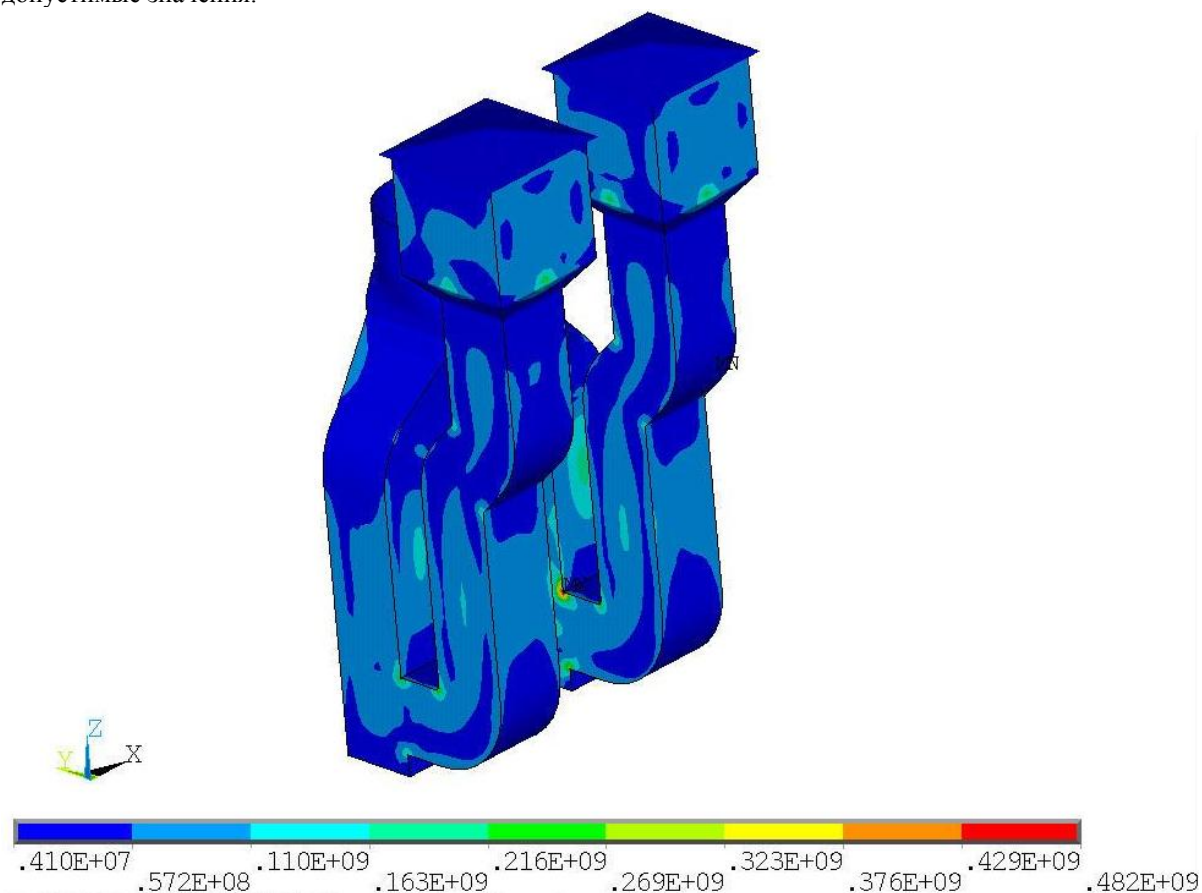


Рис.6. Распределение приведенных напряжений (исходная конструкция)

Для уменьшения максимального уровня напряжений в конструкции проблемные области можно укрепить, к примеру, как показано на рис. 7.

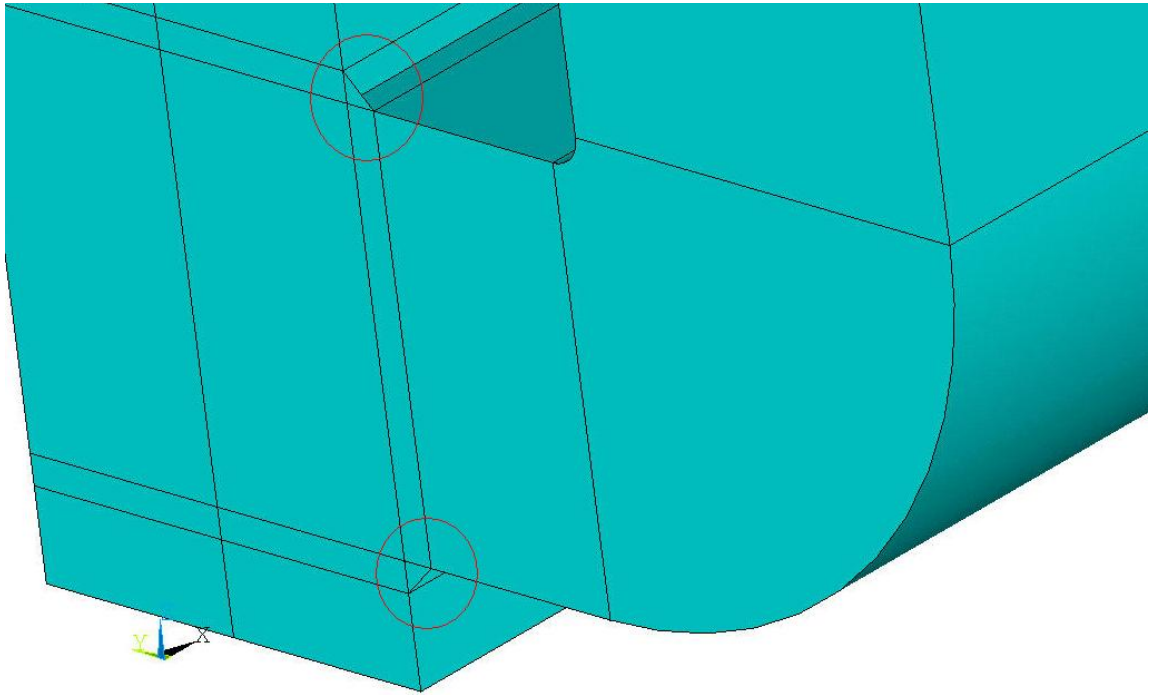


Рис.7. Изменение в конструкции

В таком случае получим картину напряжений, приведенную на рис.8, из которой видно, что максимум напряжений уменьшился в 3.2 раза и соответствует требованиям [2].

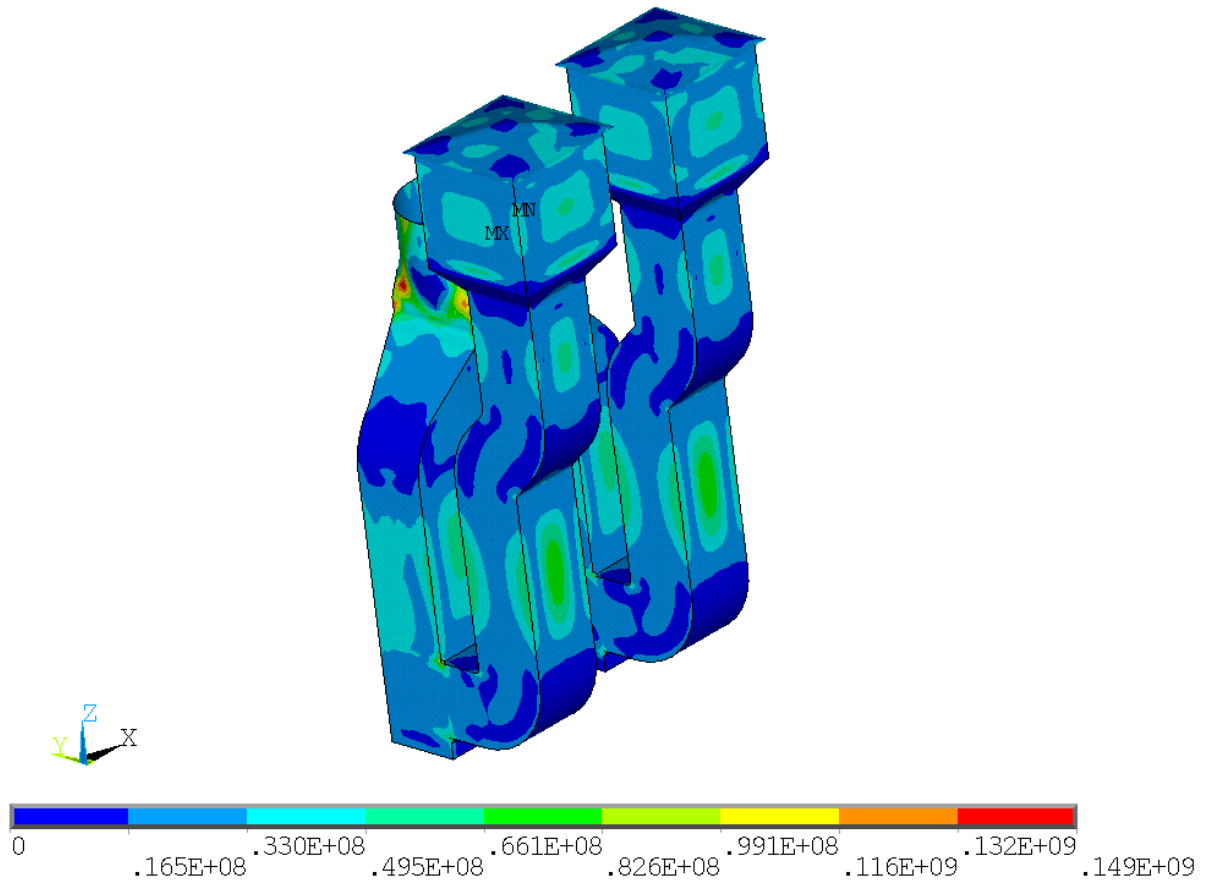


Рис.8. Распределение приведенных напряжений (измененная конструкция)

Приведенные напряжения определяются по теории максимальных касательных напряжений. Проверка сейсмостойкости конструкции при сочетании нагрузок НУЭ + МРЗ осуществляется сравнением полученных суммарных приведенных напряжений с соответствующими допускаемыми значениями [2].

Выводы

В результате проведенных расчетов удалось:

- Уточнить величину потерь полного давления в подводящих и отводящих воздуховодах САРХ в текущем варианте конструкции
- Получить детальное представление о течении в проточной части; при этом необходимости в улучшении конструкции с точки зрения газодинамики нет.
- Уточнить величину полезной тяги путем непосредственного учета теплообмена охлаждающего воздуха с боковой поверхностью сборной вертикальной трубы.
- Оценить прочность конструкции при возможных динамических воздействиях и внести необходимые изменения для ее работоспособности.

Список литературы

1. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/Под ред. М.О. Штейнберга.–3-е изд., перераб. и доп.–М.:Машиностроение, 1992.–672с.: ил.
2. ПНАЭ Г-7-002-86 "Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок"/Госатомнадзор СССР.–М.:1989.–525 с.
3. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. –СПб:Наука,1998.–225с.