

УДК 629.198.22

## **Моделирование местной прочности ответственных узлов несущих конструкций агрегатов стартовых комплексов**

*Дружинина М.Ю., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Стартовые ракетные комплексы»*

*Научный руководитель: Ульяненок А.В., старший преподаватель  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[sm8@sm8.bmstu.ru](mailto:sm8@sm8.bmstu.ru)*

Агрегаты стартовых комплексов, как правило, представляют собой весьма сложную пространственную сварную металлоконструкцию. При проектировании таких конструкций особенно актуален вопрос оценки их жесткостных и прочностных характеристик. Для расчетного анализа таких конструкций широко используется метод конечных элементов (МКЭ) и метод суперэлементов (МСЭ) [3,4].

Моделирование жесткостных и прочностных свойств таких сложных конструкций чаще всего проводится в несколько этапов. А именно, на первом этапе ставится цель оценки общей прочности конструкции в целом при различных характерных режимах ее эксплуатации. На этом этапе используются сравнительно простые расчетные схемы. В виде основных расчетных элементов используются стержневые конечные элементы, испытывающие сложное напряженное состояние, а также пластинчатые элементы, работающие как в своей плоскости, так и на изгиб из плоскости. Использование «простых» моделей обусловлено также и имеющимися ограничениями по времени для проведения таких оценок.

Полученные таким образом модели дают возможность оценить напряженно-деформированное состояние конструкции в целом и выявить наиболее нагруженные узлы.

На втором этапе оценки несущей способности конструкции следует уделить особое внимание выявленным опасным узлам. Для расчета на прочность этих узлов, которые и будут определять несущую способность конструкции, целесообразно использовать специальные математические модели, более точно отражающие их реальную геометрию и имеющие для этого более густую сетку конечных элементов [5].

Использовать такие модели можно тремя способами:

1. встроить «подробную» модели узла в общую модель конструкции в целом и провести расчет полученной модели (рис.1);
2. расчет собственно «подробной» модели, где в качестве граничных условий принимаются перемещения узлов «простой» модели конструкции в целом (рис.2);
3. расчет собственно «подробной» модели, где в качестве граничных условий принимаются внутренние силовые факторы в узлах «простой» модели конструкции в целом (рис.3).

Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки. Рассмотрим их подробнее.

Существенным преимуществом первого способа (рис.1) является отсутствие необходимости задания граничных условий. Но при этом нужно обеспечить адекватную стыковку узлов «простой» и «подробной» моделей. Это требует введения дополнительных стыковочных элементов. В результате полученная модель имеет существенно большую размерность, чем исходные, что приводит большим временным затратам на проведение расчета.

Второй способ (рис.2) требует очень точного задания перемещений в граничных узлах, а также введения дополнительных элементов правильно распределяющих эти перемещения по узлам «подробной модели». Времени на расчет такой модели требуется меньше, чем в первом способе.

Третий способ (рис.3), как и второй, использует собственно «подробную» модель рассматриваемого узла, но в качестве параметров внешнего нагружения на граничных узлах требуется задать силы и моменты. В качестве этих граничных внешних силовых факторов используются полученные в результате расчета «простой» модели внутренние силовые факторы в соответствующих узлах. Сложность задания таких внешних силовых факторов заключается в том, что внутренние силовые факторы «простой» модели получены в местной системе координат, связанной с конкретным конечным элементом, а внешние силы и моменты задаются в глобальной системе координат. Время на расчет такой модели требуется приблизительно столько же, сколько и во втором способе.

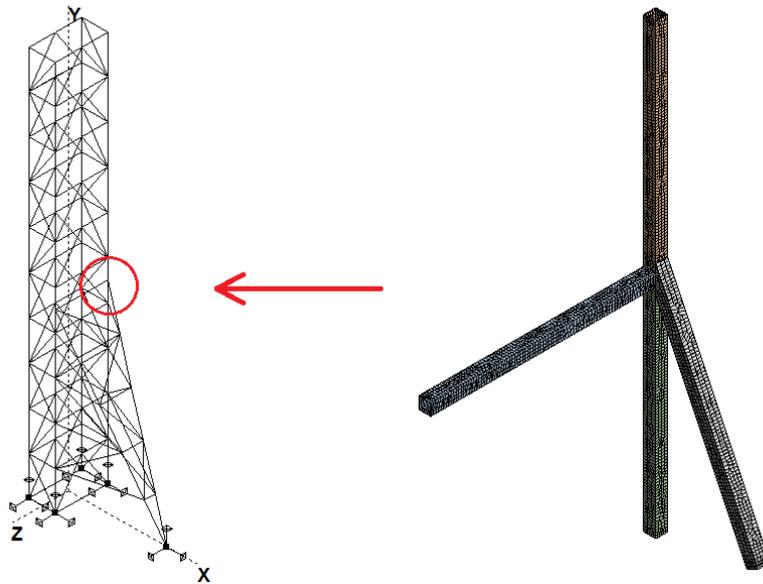


Рис. 1. Встраивание «подробной» модели в модель общей прочности

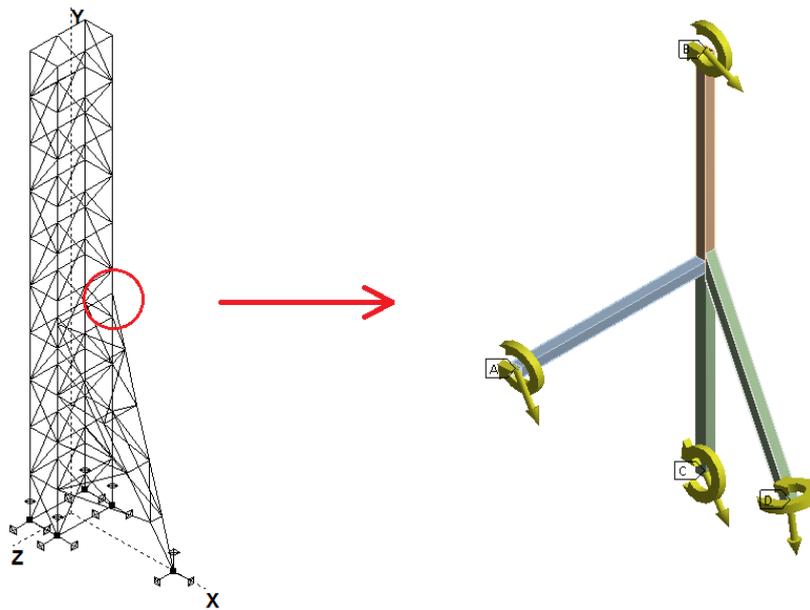


Рис. 2. Задание граничных условий в виде перемещений

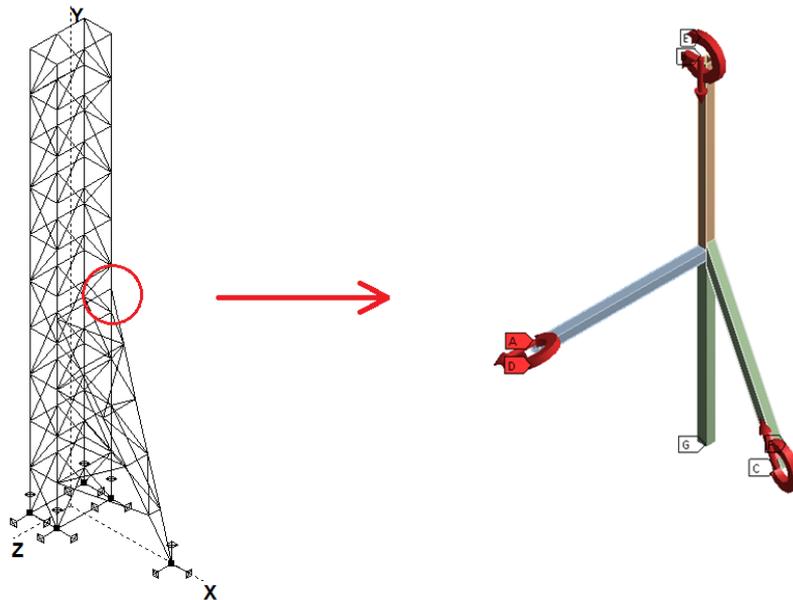


Рис. 3. Задание граничных условий в виде силовых факторов

Учитывая изложенные соображения, предпочтительным представляется второй способ оценки местной прочности ответственного узла конструкции. Рассмотрим использование этого способа на примере расчета конструкции башни обслуживания (БО).

Модель БО (рис.4) представляет собой ферменную конструкцию, состоящую из квадратных труб, выполненные из стали 10Г2С, по ГОСТ 8639-82 «Трубы стальные квадратные». Ветви БО имеют сечение 80x4 мм, а стойки и раскосы – 50x3.5 мм (рис.5).

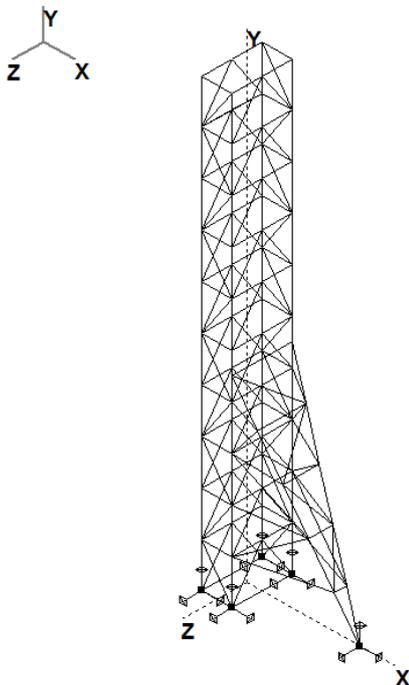


Рис. 4. Модель для расчета общей прочности

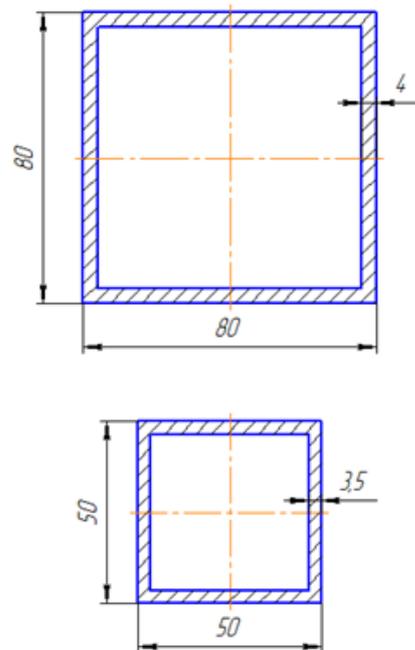


Рис. 5. Выбранные сечения

Условия нагружения представляют собой нагрузку от сил веса и две сдвигающие силы в направлении оси X и равные по 17500 Н каждая, приложенные к верхним узлам модели (рис.6).

Расчет общей прочности был произведен в ПК SADAS, разработанный на кафедре СМ8. В результате расчета при выбранном варианте нагружения были получены распределение коэффициентов запаса в модели БО, приведенные на рис.7 в виде цветовой карты. Минимальное значение коэффициента запаса равно 1.202 (рис.8), что является критическим и приводит к необходимости проверки местной прочности этого узла модели.

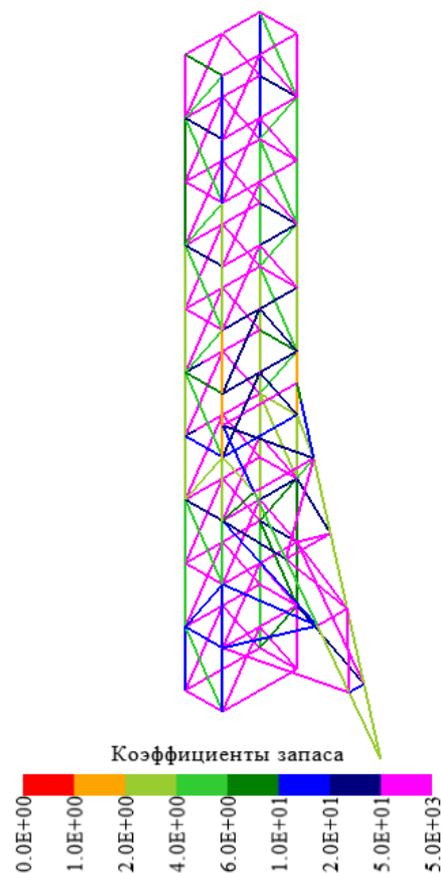
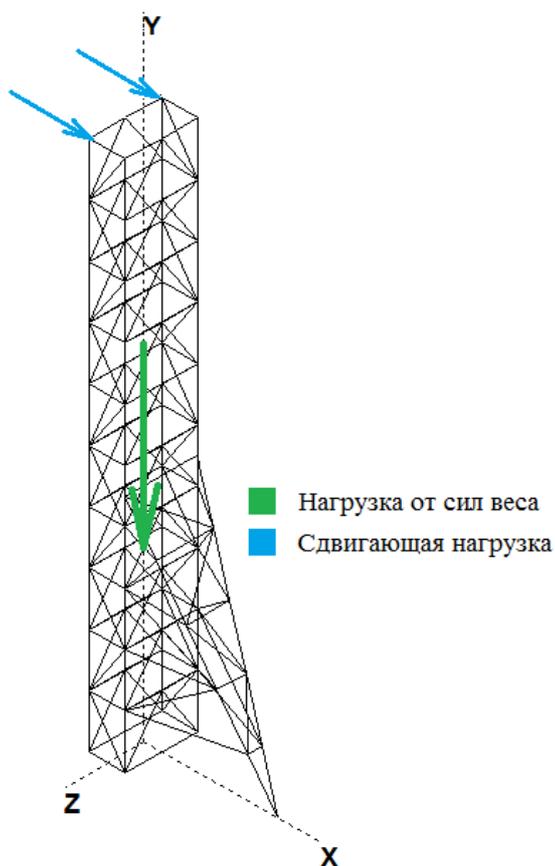


Рис. 6. Нагружение для расчета общей прочности

Рис. 7. Эпюра коэффициентов запаса

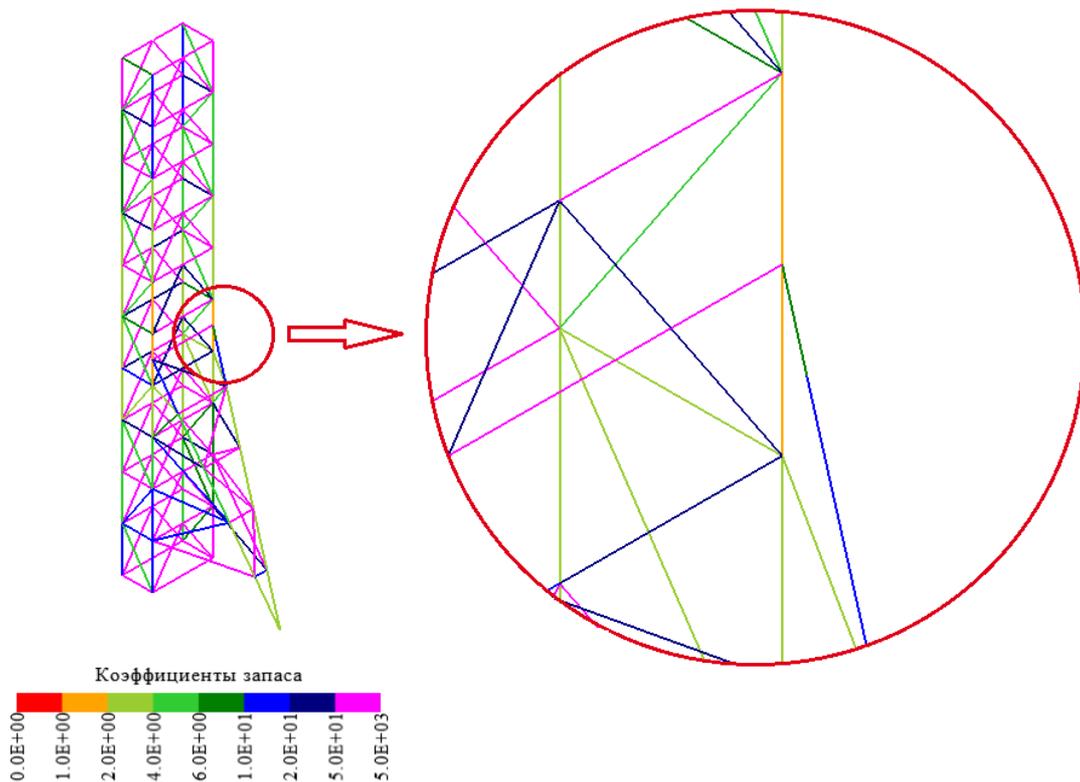


Рис. 8. Элемент конструкции, выбранный для расчета местной прочности

Исследование местной прочности указанного узла модели БО начинаем с создания трехмерной модели в ПК ANSYS 13 [1,2] (рис.9, рис.10). Для прочностного анализа создается сетка конечных элементов с приоритетом гексагональных элементов путем автоматического разбиения (рис.11). Исходными данными для расчета местной прочности являются перемещения узлов (рис.12), приведенные в таблице 1, получаемые из расчета общей прочности в ПК SADAS. Эти перемещения задаются в качестве граничных условий для расчета модели местной прочности рассматриваемого узла конструкции.

Таблица 1

Перемещения узлов модели общей прочности, м

| № узла | № | $Q_x$  | $Q_y$   | $Q_z$  | $Q_{fx}$ | $Q_{fy}$ | $Q_{fz}$ |
|--------|---|--------|---------|--------|----------|----------|----------|
| 76     | A | 0,0044 | -0,0063 | 0,0004 | -0,0001  | 0,0005   | -0,0035  |
| 77     | B | 0,0177 | -0,0074 | 0,0005 | 0,0001   | 0,0002   | -0,0132  |
| 78     | C | 0,0045 | -0,0055 | 0,0005 | -0,0001  | 0,0005   | 0,0035   |
| 79     | D | 0,0044 | -0,0074 | 0,0002 | -0,0002  | 0,0008   | 0        |

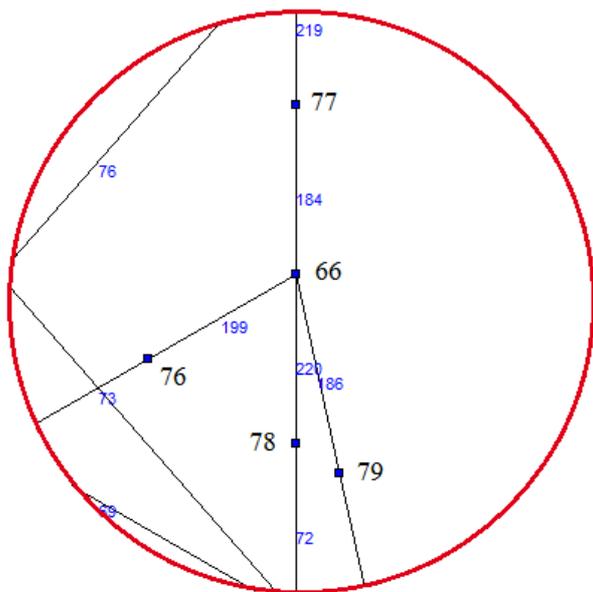


Рис. 9. Выбранный элемент на исходной модели

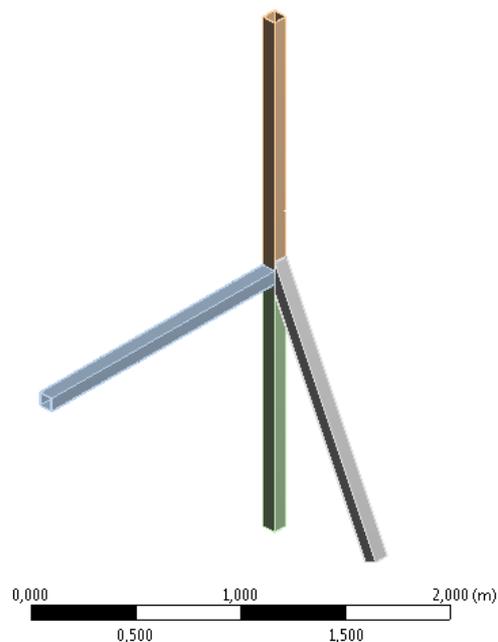


Рис. 10. Модель для расчета МП



Рис. 11. Сетка конечных элементов

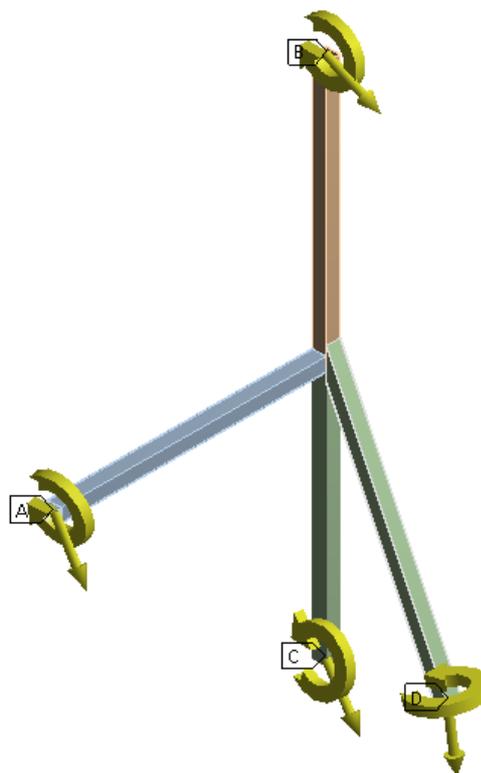


Рис. 12. Задание граничных условий

В результате статического расчета в ПК ANSYS была получена картина распределения коэффициентов запаса в модели конструкции. На рис.13 приведена подробная информация о коэффициентах запаса в исследуемой области.

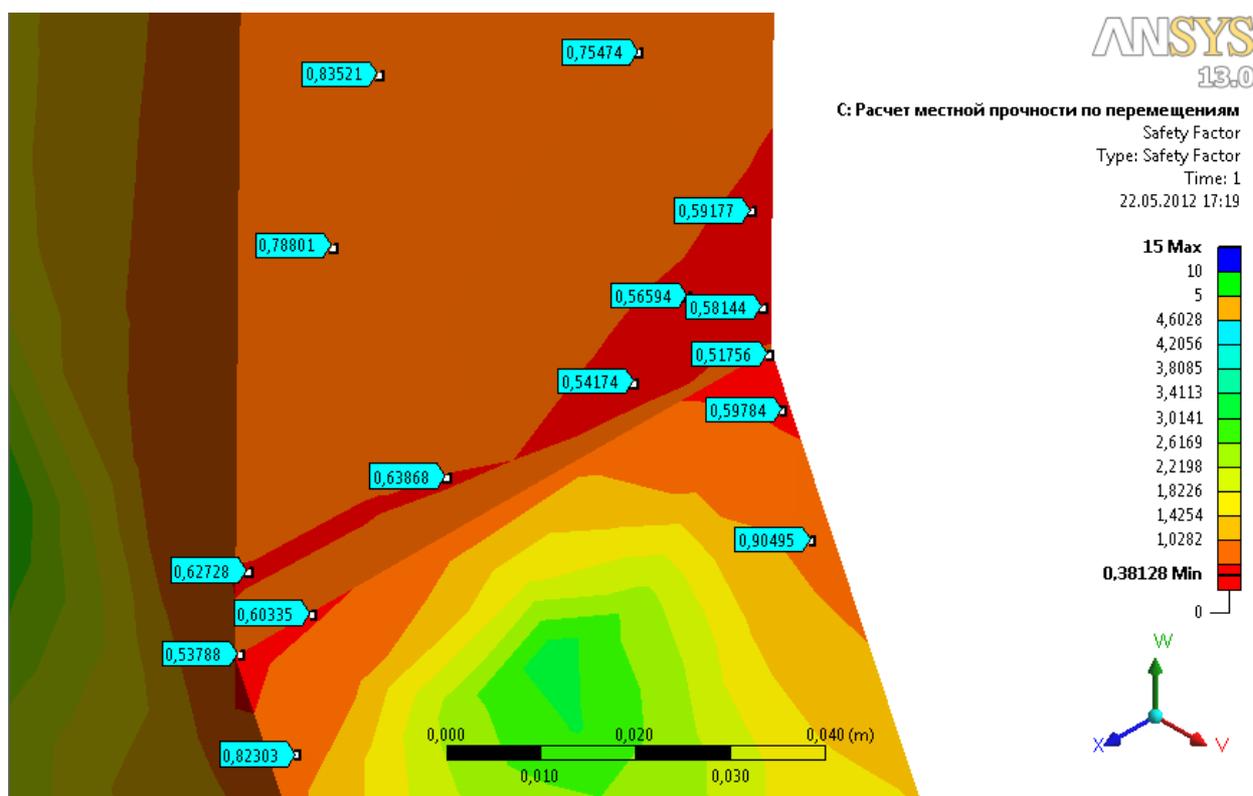


Рис. 13. Эпюры коэффициентов запаса в критической области исследуемого элемента

Анализ полученных результатов показал, что величина минимального коэффициента запаса в модели составляет 0,52. Кроме этого, на рис.13 видно, что область модели, где коэффициент запаса ниже допускаемого значения 1,2 весьма велика и, следовательно, конструкция рассматриваемого узла нуждается в усилении.

В таблице 2 приведены результаты расчета перемещений центрального узла модели, полученные в моделях общей прочности конструкции БО и местной прочности рассматриваемого узла. Сравнение полученных результатов показывает их незначительное различие, что позволяет говорить о достоверности расчета напряжений в модели местной прочности.

Таблица 2

Перемещения центрального узла, мм

| Направление | Расчет общей прочности | Расчет местной прочности по перемещениям |
|-------------|------------------------|--|
| X           | 3,59                   | 3,85                                     |
| Y           | -6,43                  | -6,02                                    |
| Z           | 0,44                   | 0,38                                     |

## Выводы

Расчет общей прочности башни обслуживания показал, что в конструкции башни имеется узел с критическим значением коэффициента запаса. На основании этих данных был произведен статический расчет трехмерной модели узла в ПК «ANSYS 13.0», где в качестве граничных условий были заданы перемещения, полученные в расчете общей прочности.

Анализ результатов расчета местной прочности узла конструкции при задании граничных условий в виде перемещений узлов выявил области с коэффициентом запаса ниже допустимого значения и необходимость конструктивного усиления узла башни обслуживания.

## Список литературы

1. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учебное пособие / В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адвянов. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. – 271 с.: ил.
2. ANSYS для инженеров: Справочное пособие / Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 318 с.
4. Абакумов В.С., Зверев В.А., Ломакин В.В., Чугунков В.В., Языков А.В. Методический аппарат для расчетного анализа прочности конструкций стартового комплекса ракет-носителей серии «Союз» // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2008. Спец. выпуск. С. 124-130.
5. «ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АГРЕГАТОВ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ЗАДАНИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В ВИДЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ» Статья / М.Ю.Дружинина, А.В.Ульяненок – Москва: Электронный журнал «Инженерный вестник», 2012 г.