

УДК 629.7.085

Расчетный анализ несущих элементов агрегатов стартового комплекса для ракеты космического назначения «Союз -2.1в»

Зверев В. А.^{1,*}, Ульяненок А. В.¹, Языков А. В.¹

[*zverev_vadim@mail.ru](mailto:zverev_vadim@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Работа посвящена расчету общей и местной прочности несущих конструкций агрегатов стартовой системы для ракеты космического назначения «Союз-2» этапа 1В. В качестве нагружения агрегатов рассматривается действие газодинамической струи двигательной установки ракеты. Моделирование агрегатов и их расчет осуществляется при помощи метода конечных и суперэлементов. В работе представлены результаты расчета полей распределения узловых температур в моделях агрегатов стартовой системы, а также напряжения в конечных элементах. В качестве примера расчета местной прочности в работе рассмотрен расчет конструктивного узла кабель-заправочной мачты. Результаты работы были использованы разработчиками агрегатов стартовой системы для ракеты космического назначения «Союз-2» этапа 1В.

Ключевые слова: стартовый комплекс, ракета космического назначения «Союз-2.1В», метод конечных элементов, метод суперэлементов, поля распределения узловых температур

В декабре 2013 года был успешно осуществлен первый запуск новой ракеты космического назначения (РКН) легко класса «Союз-2» этапа 1В. В качестве стартовой системы (СС) для запуска РКН «Союз-2» этапа 1В было решено использовать существующую СС для РКН семейства «Союз» на космодроме Плесецк [1]. Одним из важнейших этапов решения этой задачи явилось проведение расчетного анализа несущих конструкций агрегатов СС с целью получения оценки их общей прочности и жесткости. Учитывая то, что РКН «Союз-2» этапа 1В уступает по стартовой массе РКН «Союз-2» вариантов 1а, 1б и имеет новую двигательную установку (ДУ), входящую в состав первой ступени, то основным расчетным нагружением для оценки прочности и жесткости стало газодинамическое воздействие струй ДУ РКН на несущие конструкции агрегатов СС.

Конструктивная схема СС для РКН «СОЮЗ-2» этапа 1В представлена на рис.1. Объектами расчета являлись несущие конструкции следующих агрегатов СС: опорная ферма (ОФ) (поз.10), сектор силового пояса (ССП), (поз.8), несущая стрела (НС), (поз.9), верхняя кабель-мачты (ВКМ), (поз.1) и кабель-заправочная мачта (КЗМ) (поз.2).

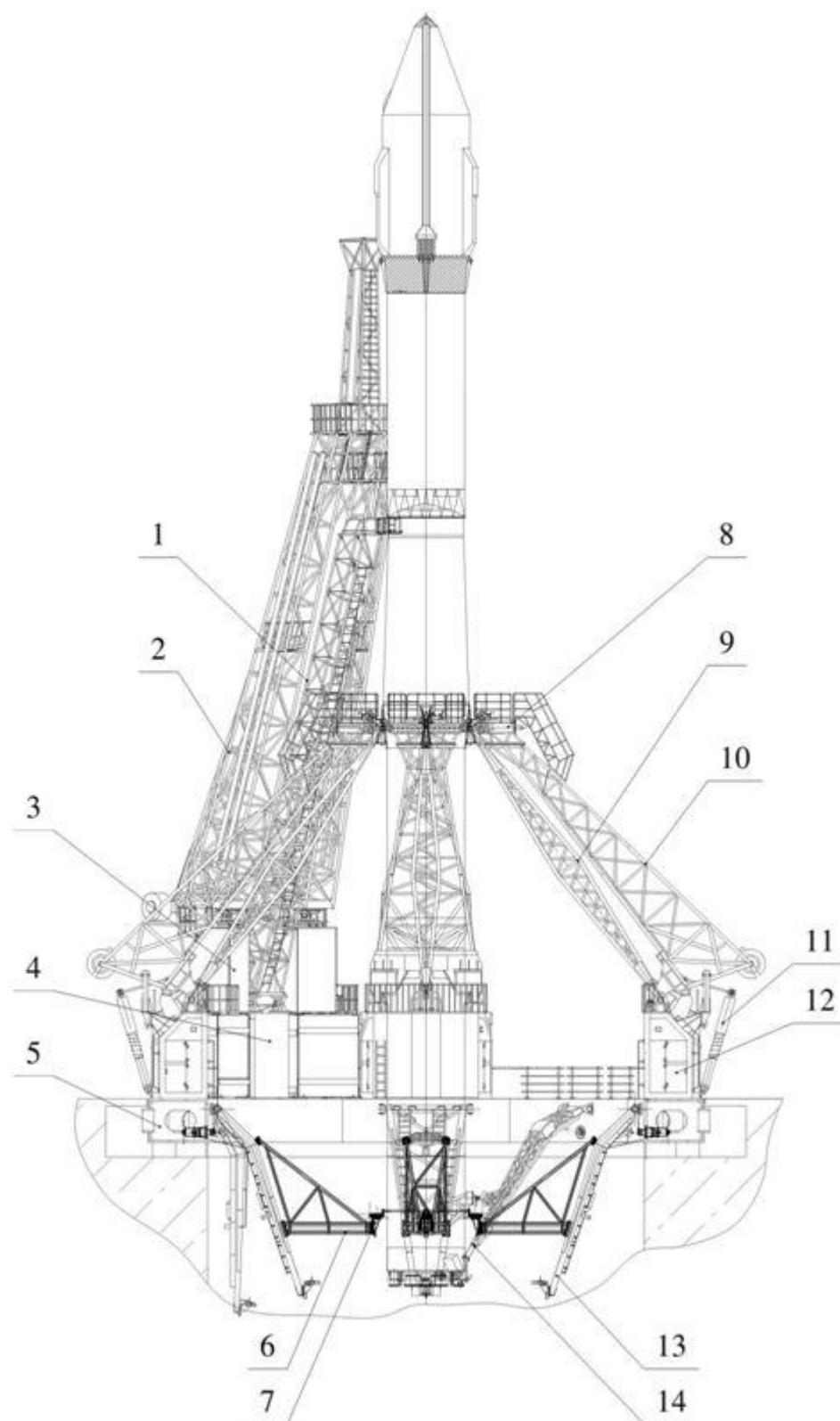


Рис. 1. Конструктивная схема СС для РКН «СОЮЗ-2» этапа 1в:

1– ВКМ, 2 – КЗМ, 3 – основание КЗМ, 4 – основание ВКМ, 5 – опорное кольцо, 6 – кронштейн устройства направляющего, 7 – головка направляющая, 8 – ССП, 9 – НС, 10 – ОФ, 11 – гидробуфер ОФ, 12 – ООФ, 13 – устройство направляющее, 14 – нижняя кабельная мачта

Расчет общей прочности проводился на основе метода конечных элементов и метода суперэлементов при помощи программного комплекса (ПК) «SADAS», разработанного на кафедре СМ8 МГТУ им. Н.Э. Баумана [2], [3], [4]. Формирование физических моделей агрегатов СС проводилось согласно принципам, изложенным в [5].

Исходя из особенностей нагружения и функционирования рассматриваемых агрегатов, часть из них рассчитывалась автономно, а часть - совместно. Так поворотная часть КЗМ и ВКМ представляются отдельными конечноэлементными моделями (рис. 2, рис.3), а ОФ, ССП и НС – в составе суперэлемента, моделирующего систему ОФ-ССП-НС-ООФ (рис. 4). Ориентация моделей и их отдельных элементов соответствуют исходному (откинутому) положению НС, ОФ, КЗМ и ВКМ.

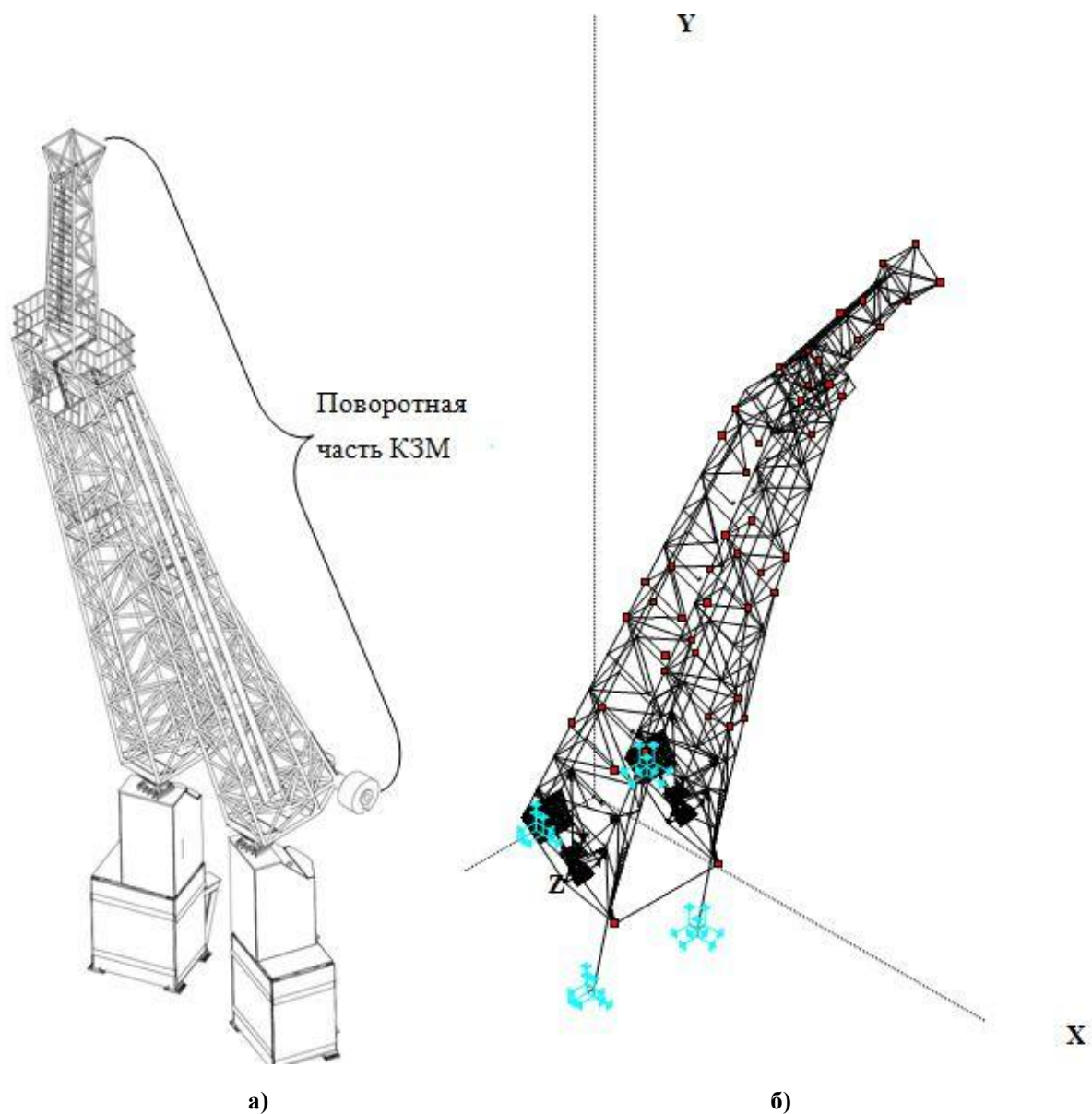


Рис.2 – Поворотная часть КЗМ:

а - конструктивная схема; *б* - расчетная схема

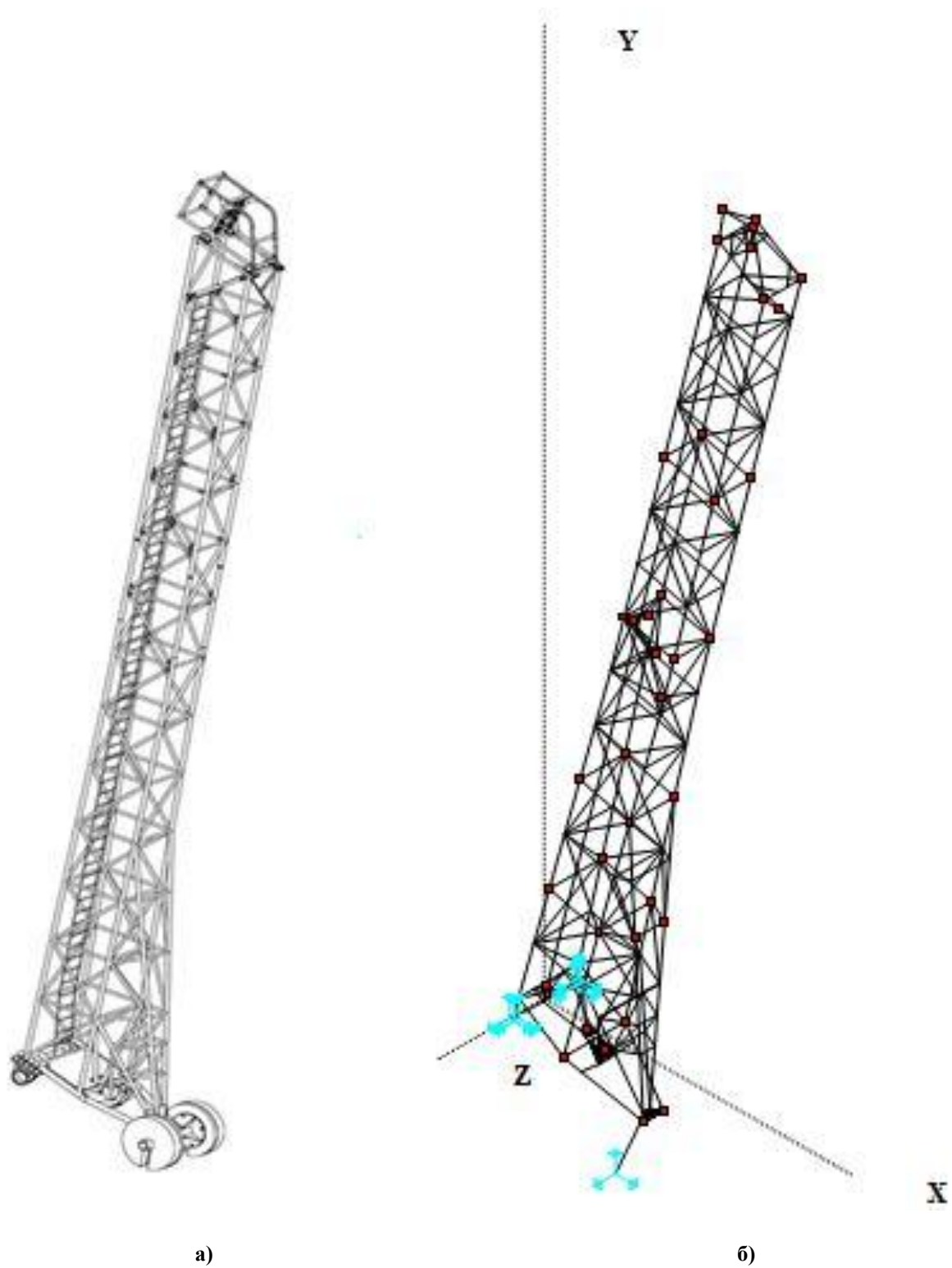


Рис. 3 – Верхняя кабель-мачта:
а - конструктивная схема; *б* - расчетная схема

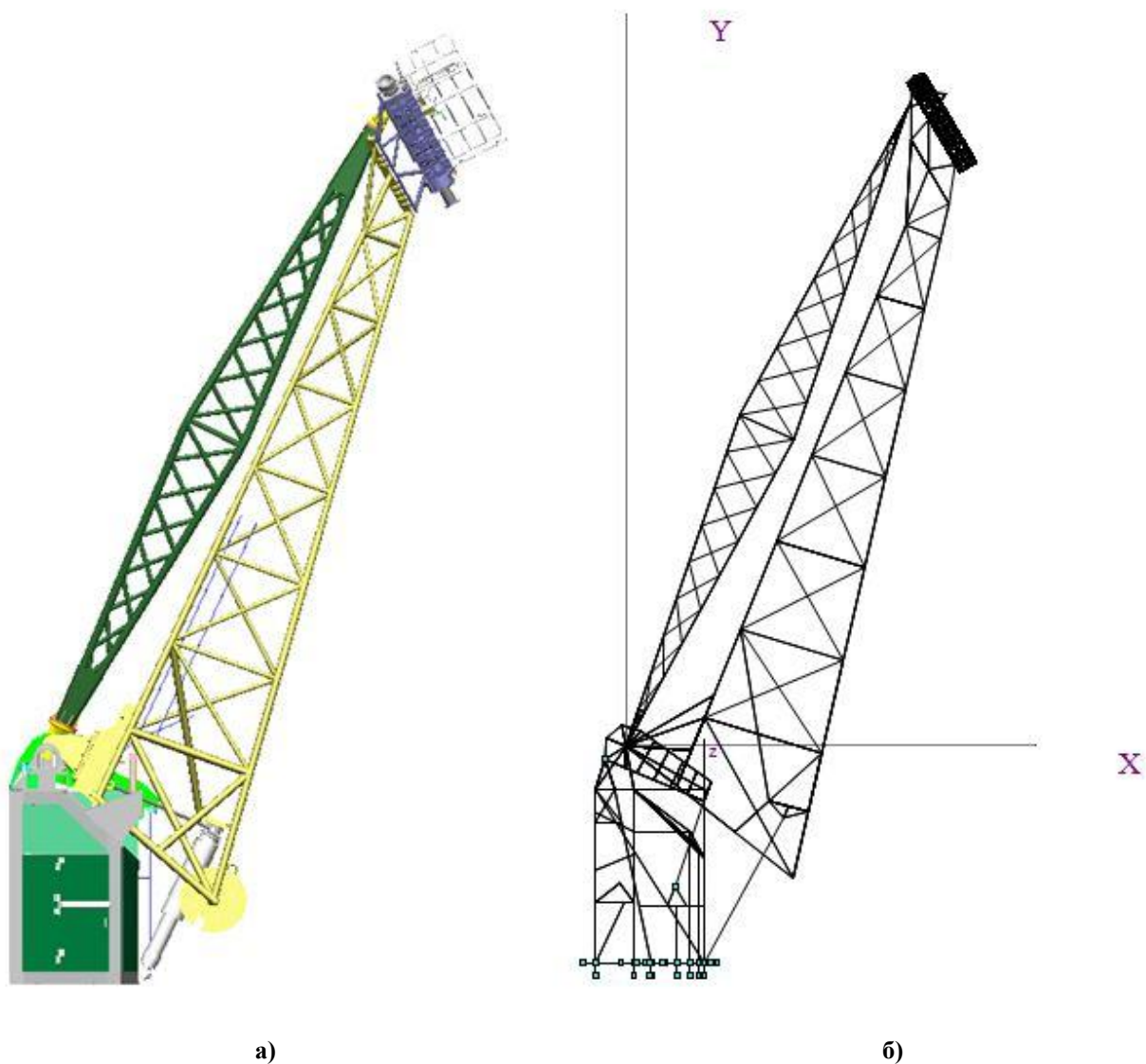


Рис.4 – Система ОФ-ССП-НС-ООФ:

а - конструктивная схема; *б* - расчетная схема

Как уже отмечалось, в качестве нагружения агрегатов рассматривались их собственный вес и воздействие газодинамической струи ДУ РКН «Союз-2» этапа 1В.

В соответствии с принципами МКЭ нагрузки формировались приведенными к узлам конечных элементов моделей агрегатов СС. Узловые нагрузки обусловленные собственным весом агрегатов и размещенного на них оборудования определяются путем умножения узловых масс физической модели агрегата на ускорение свободного падения. Узловые нагрузки обусловленные газодинамическим воздействием струи ДУ РКН «Союз-2» этапа 1В включают в себя нагрузки, вызванные скоростным напором и фиктивные нагрузки, эквивалентные температурному нагружению, вызванному теплообменом элементов конструкции агрегата СС со струей ДУ РКН. Данные узловые нагрузки определялись при помощи методик, изложенных в [6], [7], [8] на основании полей потока

импульса и температур торможения, вычисленных для различных положений РКН, соответствующих заданной траектории ее подъема и сноса.

В результате расчета были получены поля распределения узловых температур в моделях ОФ, НС, ВКМ, КЗМ, а также максимальные напряжения в элементах их моделей. Общие результаты расчета агрегатов СС представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 Максимальные температуры в конструктивных элементах агрегатов СС

Агрегат (конструктивный элемент) СС	Максимальная температура (°C)
ОФ	121
НС	83
ССП	109
КЗМ	249
ВКМ	293

Таблица 2 Максимальные напряжения в конструктивных элементах СС при действии собственного веса и газодинамических нагрузок, вызванных действием струи ДУ РКН

Агрегат (конструктивный элемент) СС	$\sigma_{\max}$ МПа	$[\sigma]^*$, МПа
ОФ	162	208
НС	106	208
ССП	77	208
ВКМ	197	208
КЗМ	>>245	245

* $\sigma_{\max}$, $[\sigma]$ – соответственно максимальные и допускаемые напряжения в элементах конструкций агрегатов СС

Из данных приведенных в таблицах следует, что наиболее уязвимым элементом стартовой системы по критерию общей прочности является КЗМ.

По результатам проведенных расчетов конструкций были предложены усиления наиболее нагруженных узлов и проведен расчет их местной прочности. В качестве примера рассмотрим стык ветвей фермы поворотной части КЗМ (рис.5).

Усиленный стык ветвей фермы поворотной части КЗМ представляет собой сложную составную конструкцию (рис.6.). Особенности данного элемента конструкции трудно полностью учесть в модели поворотной части КЗМ, использовавшейся для оценки общей прочности. Это требует более подробного расчетного анализа местной прочности данного элемента.

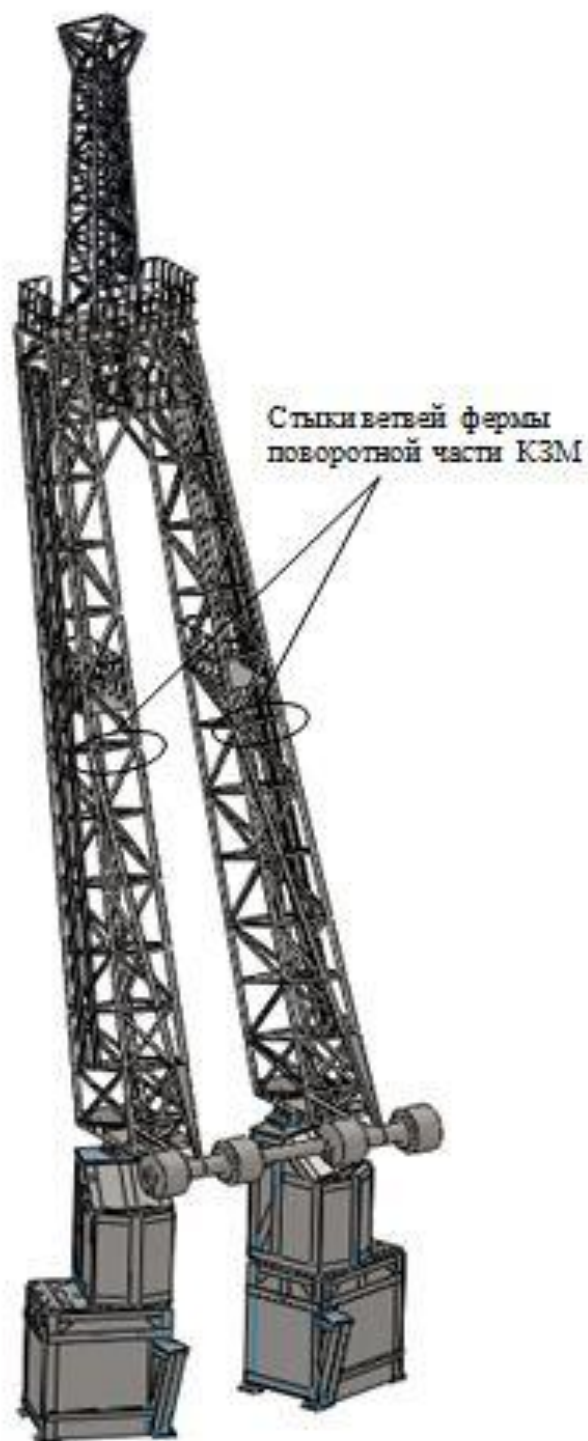


Рис.5 – Конструктивная схема КЗМ с указанием узлов стыков ветвей фермы

Для оценки местной прочности рассматриваемого узла была создана его модель на основе треугольных пластинчатых КЭ (рис. 7). Данная подробная конечноэлементная модель была встроена в модель поворотной части КЗМ, которая использовалась для расчета общей прочности (рис.8). В результате расчета были получено общее распределение напряжений в конечных элементах модели (рис.9) при действии на поворотную часть КЗМ сил собственного веса и сил, вызванных газодинамической струей

ДУ РКН «СОЮЗ-2» этапа 1в. На основании полученных данных были определены области в модели стыка ветвей поворотной части КЗМ с максимальными напряжениями (рис.10).

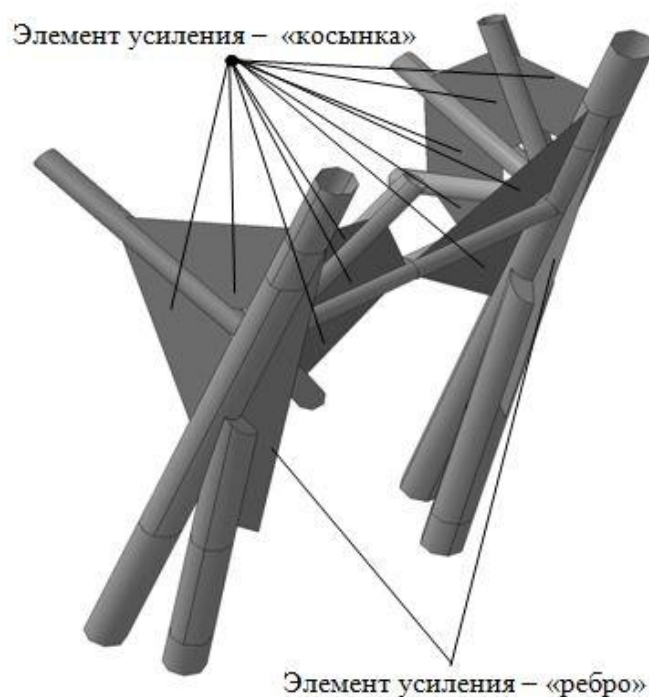
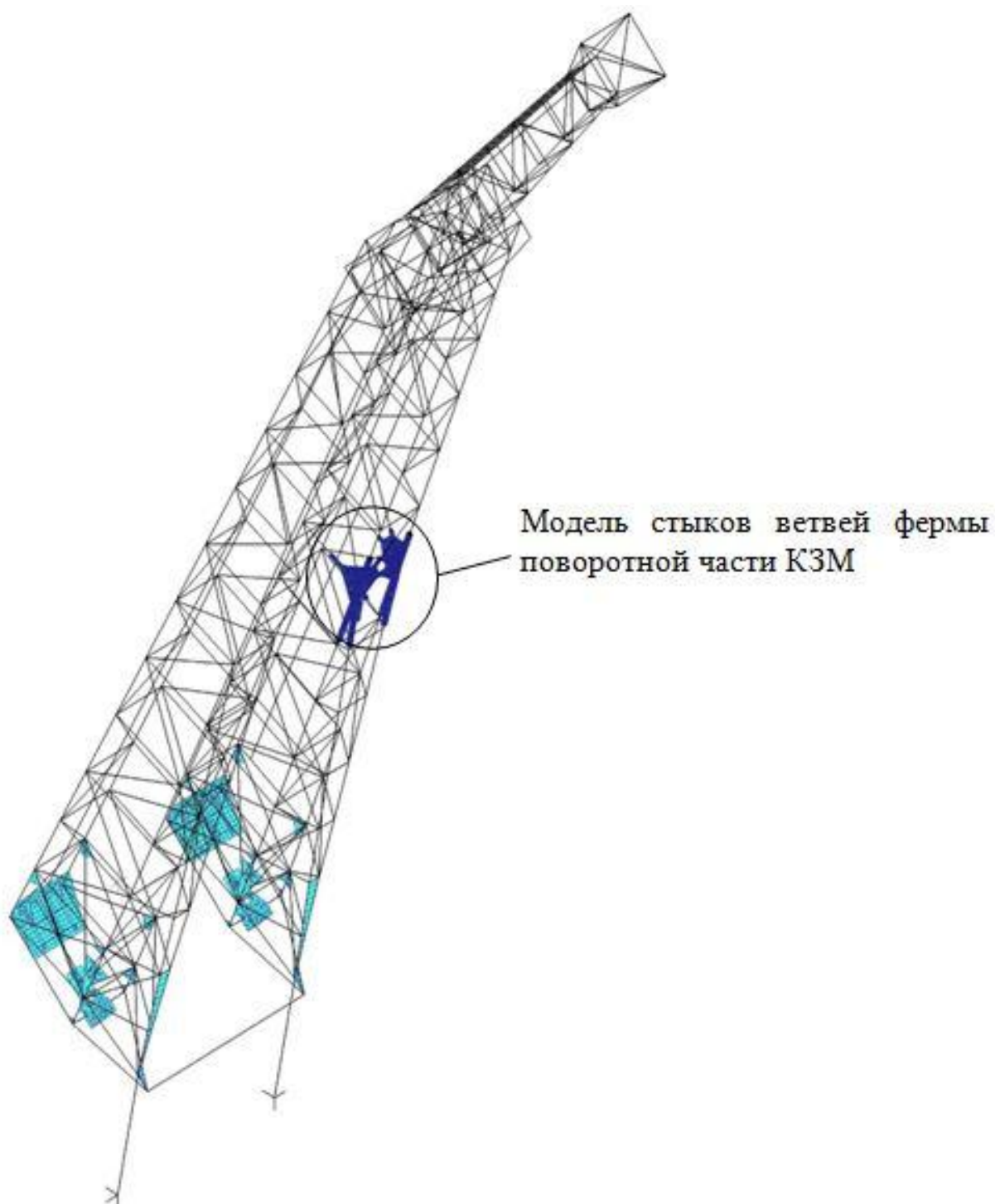


Рис. 6 – Конструктивная схема усиленного стыка ветвей фермы поворотной части КЗМ



Рис. 7 – Конечноеэлементная модель стыков ветвей поворотной части КЗМ



Модель стыков ветвей фермы
поворотной части КЗМ

Рис.8. Модель стыков ветвей фермы, встроенная в общую модель КЗМ

Из рис. 9...10 видно, что в рассматриваемой конструктивном узле поворотной части КЗМ есть области, в которых напряжения превышают допускаемые значения. Однако эти области имеют локальный характер и не влияют на прочность узла в целом.



Рис.9. Общее распределение напряжений в модели стыков ветвей фермы поворотной КЗМ

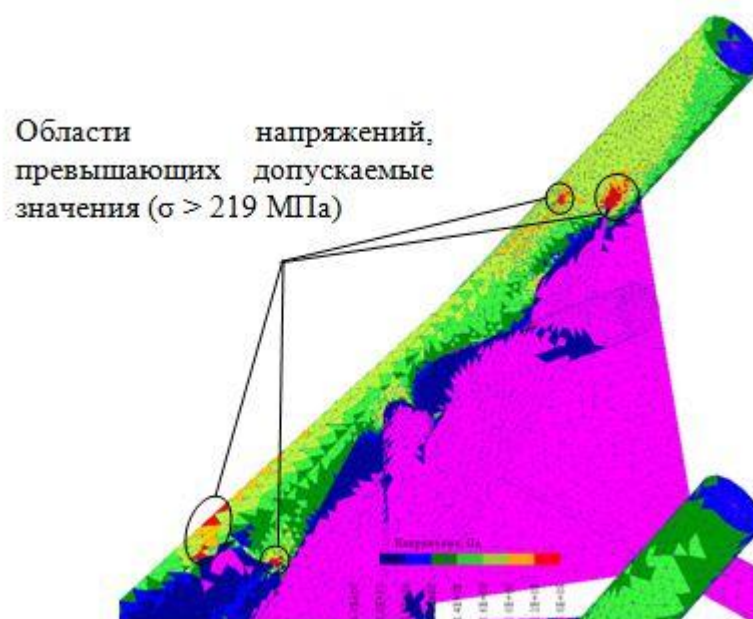


Рис. 10 – Области напряжений в модели стыков ветвей фермы поворотной части КЗМ, превышающие допустимые значения

По результатам проведенных исследований было выработано техническое решение, направленное на обеспечение прочности поворотной части КЗМ, которое впоследствии

было реализовано в СС на космодроме Плесецк, обеспечивающей запуск новой РКН «Союз-2» этапа 1В.

Список литературы

1. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники. Кн. 3. / Под ред. И.В. Бармина. М.: ДС «Полиграфикс РПК», 2012. 251 с.
2. Батэ К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов: пер. с англ. М.: Изд-во «Озон», 2012. 445 с.
3. Шапошников Н.Н., Тарабасов Н.Д., Петров В.Б., Мяченков В.И. Расчёт машиностроительных конструкций на прочность и жёсткость. М.: Машиностроение, 1981. 333 с.
4. Постнов В.А. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений. Л.: Судостроение, 1979. 288 с.
5. Зверев В.А., Ломакин В.В. Особенности моделирования несущих конструкций агрегатов стартовых комплексов для ракет космического назначения семейства «Союз» // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 12. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/278572.html> (дата обращения 01.08.2014)
6. Зверев В.А., Ломакин В.В., Языков А.В. Расчет нагрузок на ферменные конструкции агрегатов стартового комплекса при газодинамическом и ветровом воздействии // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 3. С. 179-190. DOI: [10.7463/0313.0541205](https://doi.org/10.7463/0313.0541205)
7. Бармин И.В., Зверев В.А., Украинский А.Ю., Чугунков А.Ю., Языков А.В. Обоснование некоторых основных характеристик стартового оборудования космодромов XXI века // Актуальные проблемы развития ракетно-космической техники и систем вооружения: 75 лет факультету «Специальное машиностроение»: сб. ст. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С. 215-227.
8. Игрицкий В.А., Чугунков В.В., Языков А.В. Методика прогнозирования температур и температурных напряжений в элементах конструкций стартового оборудования при газодинамическом воздействии струй двигателей стартующей ракеты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. Спец. вып. С. 53-60.

Computing Analysis of Bearing Elements of Launch Complex Aggregates for Space Rocket "Soyuz-2.1v"

V. A. Zverev^{1,*}, A.V. Ul'yanenkov¹, A.V. Yazykov¹

[*zverev_vadim@mail.ru](mailto:zverev_vadim@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: FEM, launch complex, space rocket "Soyuz-2.1V", nodal temperature field distribution

The research is devoted to the computational analysis of bearing structures of launch system aggregates, which are designed for the prelaunch preparation and launch security of space rocket (SR) "SOYUZ-2" of 1B stage. The bearing structures taken under consideration are the following: supporting trusses (ST), bearing arms (BA), the upper cable girder (UCG), the umbilical mast (UM). The SR "SOYUZ-2" of 1B stage has the characteristics of the propulsion unit (PU) thrust, different from those of the "Soyuz" family space rockets exploited before.

The paper presents basic modeling principles to calculate units and their operating loadings. The body self-weight and the influence of a gas-dynamic jet of "SOYUZ-2.1B" propulsion unit have been considered as a load of units. Parameters of this influence are determined on the basis of impulse stream fields and of deceleration temperatures calculated for various SR positions according to the specified path of its ascent and demolition.

Physical models of the aggregates and calculations are based on the finite elements method and super-elements method using "SADAS" software package developed at the chair SM8 of Bauman Moscow State Technical University.

Fields of nodal temperatures distribution in the ST, BA, UCG, UM models, and fields of tension in finite elements as well represent the calculation results.

Obtained results revealed the most vulnerable of considered starting system aggregates, namely UM, which was taken for local durability calculation. As an example, this research considers calculation of local durability in the truss branches junction of UM rotary part, for which the constructive strengthening has been offered. For this node a detailed finite-element model built in the model of UM rotary part has been created. Calculation results of local durability testify that the strengthened node meets durability conditions.

SR developers used calculation results of launch system aggregates for the space rocket "SOYUZ-2.1B", as well as technical solutions on separate nodes strengthening with appropriate correction of engineering design package.

References

1. Barmin I.V., ed. *Tekhnologicheskie ob"ekty nazemnoi infrastruktury raketno-kosmicheskoi tekhniki. Kn. 3* [Ground-based space infrastructure of rocket and space technology. Book 3]. Moscow, "Poligrafiks RPK" Publ., 2012. 251 p. (in Russian).
2. Bathe K.-J., Wilson E.L. *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1976. (Russ. ed.: Bathe K.-J., Wilson E.L. *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov*. Moscow, "Ozon" Publ., 2012. 445 p.).
3. Shaposhnikov N.N., Tarabasov N.D., Petrov V.B., Miachenkov V.I. *Raschet mashinostroitel'nykh konstruksii na prochnost' i zhestkost'* [Engineering design calculation of the strength and stiffness]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 333 p. (in Russian).
4. Postnov V.A. *Metod superelementov v raschetakh inzhenernykh sooruzhenii* [Superelements method in the calculation of engineering structures]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1979. 288 p. (in Russian).
5. Zverev V.A., Lomakin V.V. Features of simulation of bearing structures units of launch complex for space rockets family "Soyuz". *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 12. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/278572.html>, accessed 01.08.2014. (in Russian).
6. Zverev V.A., Lomakin V.V., Iazykov A.V. Calculation of loads on truss frames of launching plant units caused by gas-dynamic and wind influence. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 3, pp. 179-190. DOI: [10.7463/0313.0541205](https://doi.org/10.7463/0313.0541205) (in Russian).
7. Barmin I.V., Zverev V.A., Ukrainskii A.Iu., Chugunkov A.Iu., Iazykov A.V. Justification of some basic characteristics of the starting equipment of spaceports of the 21 century. *Aktual'nye problemy razvitiia raketno-kosmicheskoi tekhniki i sistem vooruzheniia: 75 let fakul'tetu "Spetsial'noe mashinostroyeniye": sb. st.* [Actual problems of rocket and space technology and weapon systems: 75 years of the Faculty of Special engineering: collected articles]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013, pp. 215-227. (in Russian).
8. Igritskii V.A., Chugunkov V.V., Iazykov A.V. Technique of predicting temperatures and temperature stresses of structure members of launch equipment under jets' gasdynamic impact of rocket's engines at liftoff. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2010, spec. iss., pp. 53-60. (in Russian).