электронное научно-техническое издание
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС 77 - 30569. Государственная регистрация №0421100025. ISSN 1994-0408

Расчетный анализ прочности элементов ферменных конструкций наземного оборудования при интенсивном воздействии высокотемпературной струи

77-30569/332009

02, февраль 2012

Игрицкий В. А., Хлыбов В. Ф., Языков А. В.

УДК. 629.7.085

МГТУ им. Н.Э. Баумана
igritsky_v_a@mail.ru
sm8@sm8.bmstu.ru
andr_yaz@sm8.bmstu.ru

Одной из целей Федеральной космической программы России на 2006-2015 годы провозглашено «расширение и повышение эффективности использования космического пространства для решения стоящих перед Российской Федерацией задач в экономической, социальной, научной, культурной и других областях деятельности, а также в интересах безопасности страны»[1]. Достижение этой цели возможно, прежде всего, путем осуществления мероприятий по совершенствованию конкурентоспособности и эффективности отечественной ракетно-космической техники (РКТ), причем одним из наиболее рациональных путей повышения эффективности РКТ является улучшение ее показателей надежности. Применительно к таким дорогим и длительно восстанавливаемым элементам космической инфраструктуры, как ферменные конструкции наземного оборудования пусковых установок ракет космического назначения (РКН) это означает, в частности, требование безусловного сохранения их работоспособности даже при отклонении РКН от номинальной траектории ее полета вследствие, например, отказа одного из двигателей. В этом случае на ферменные конструкции пусковой установки воздействуют струя высокотемпературных газов от двигательной установки (ДУ) РКН, которая, помимо силового газодинамического воздействия, вызывает дополнительное термомеханическое нагружение конструкций, основные положения методики расчетного анализа которого рассматривается в данной статье.

Высокотемпературные газовые струи, воздействующие на конструкции стартового комплекса, обладают в зоне воздействия температурой до 2500 К и высокой излучающей способностью за счет большого содержания многоатомных молекул в продуктах сгорания.

Поэтому, не смотря на малое время воздействия струи на элементы конструкции, составляющее порядка 10…15 секунд, поверхности конструкций успевают существенно прогреться на величину до нескольких сот градусов Цельсия, что определяет необходимость учета термомеханического нагружения при расчете таких конструкций.

Теплообмен на поверхности стержней ферменных конструкций при воздействии высокотемпературной струи определяется конвективной и лучистой составляющими. При этом для определения коэффициентов теплоотдачи конвекцией рационально применять критериальные зависимости для расчета теплообмена на наружной поверхности круглой трубы при обтекании ее под углом, используя при этом дополнительно коэффициенты, учитывающие высокую турбулентность струи ДУ РКН и форму сечений стержней конструкции.

Для расчета теплообмена излучением требуется определить эффективную температуру излучения окружения для элемента ферменной конструкции, что необходимо делать с учетом не только поля температур струи, но и концентрации многоатомных продуктов сгорания, определяющей ее излучающую способность.

Ферменные конструкции наземного оборудования, как правило, выполняются из тонкостенного металлического профиля и отдельных тонких пластин из материалов с достаточно высокой теплопроводностью, что в большинстве случаев, кроме отдельных толстостенных элементов, позволяет принять при расчете допущение о равномерном распределении температуры по толщине стенки каждого из элементов ферменной конструкции. Проведенные оценки показывают, что данное допущение практически не влияет на результат расчета, так как максимальные напряжения от неравномерного по толщине стенки распределения температуры для тонкостенных элементов конструкции более, чем на порядок, меньше других напряжений в конструкции.

В качестве еще одного допущения в расчете принимается, что под действием газовых струй ДУ происходит мгновенный прогрев тонкостенных стержней и пластин по всему их сечению, в связи с чем в них не возникает температурного изгиба. Основанием для такого допущения служит тот факт, что воздействующие на конструкцию высокотемпературные струи ДУ РКН характеризуются очень высокой степенью турбулизации потока, что не только существенно увеличивает интенсивность теплообмена, но и способствует более равномерному распределению локального коэффициента теплоотдачи конвекцией по границе сечения элемента. Также этому способствует то, что используемые при проектировании ферменных конструкций наземного оборудования профили, как правило, имеют равностенные сечения. В частности, широкое применение находят тонкостенные стальные трубы.

Для расчета прочности ферменной конструкции при термомеханическом нагружении предлагается использовать метод конечных элементов, применяя одни и те же конечноэлементные модели как в тепловой, так и в механической части расчета. При этом при расчете общей прочности конструкции стержневые элементы ферм моделируются стержневыми конечными элементами (КЭ).

Расчет температур производится для обоих концов каждого стержневого КЭ (рисунок 1) по уравнению теплового баланса:

$$\frac{dT_i}{d\tau} = \frac{U}{F\rho C_p} q_{i'}$$

где T_i – температура i-го узла; τ – время; U – периметр сечения стержневого элемента; F – площадь его сечения; ρ – плотность материала стержневого элемента; Cp – удельная изобарная теплоемкость материала стержневого элемента; q – суммарный удельный тепловой поток, передаваемый от окружающей среды к единице наружной поверхности элемента конструкции:

$$q = \varepsilon_т \alpha_к \cdot (T_в - T_i) + c_0 \varepsilon_{пр} \varphi \cdot \left(\left(\frac{T_{ио}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 \right),$$

где $\varepsilon_т$ – коэффициент интенсификации конвекции турбулентностью; $\alpha_к$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией; $T_в$ – температура восстановления струи в области рассматриваемого узла; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_{пр}$ – приведенный коэффициент черноты при теплообмене с окружающей средой; φ – средний угловой коэффициент видимости (учитывает самозатенение поверхностей сложных профилей и для выпуклых сечений равен единице); $T_{ио}$ – температура излучения окружения.

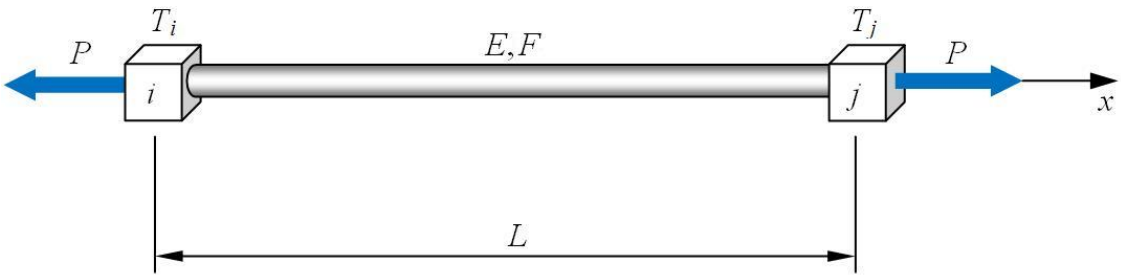


Рис. 1. К термомеханическому расчету стержневого конечного элемента
T_i, T_j – температуры i-го и j-го узлов соответственно; P – эквивалентные силы, обеспечивающие деформацию стержневого КЭ, равную температурной; E – модуль упругости материала стержня; F – площадь сечения стержня; L – длина КЭ.

В то же время, при решении задач, связанных с нагревом элементов конструкции струями работающей двигательной установки (ДУ) РКН, представление элемента фермы

одним стержневым конечным элементом невозможно в связи с неравномерностью нагрева протяженного элемента по длине. Проведённый анализ показал, что для учёта краевого эффекта и неравномерности прогрева при моделировании элемента ферменной конструкции достаточно представить его в виде трёх стержней расчётной схемы (двух коротких по концам, величиной 5...6 характерных размеров сечения и длинного в середине). При моделировании коротких элементов ферм (длиной до 15 характерных размеров сечения) возможно представлять их одним конечным элементом расчётной схемы.

Для удобства вычислений при этом в местах соединения стержней температура узла, содержащего стык, определяется как средняя между расчетными температурами концов всех стержней, входящих в узел стыка по зависимости:

$$T_{ст} = \frac{\sum_{k=1}^{n}\left(F_k \rho_k C_{p_k} T_k\right)}{\sum_{k=1}^{n}\left(F_k \rho_k C_{p_k}\right)}$$

где $T_{ст}$ – температура стыка; n – количество стержней входящих в стык; F_k, ρ_k, C_{p_k} – площадь сечения, плотность материала и удельная теплоемкость k-го стержневого КЭ, входящего в стык; T_k – температура совпадающего со стыком узла k-го стержневого КЭ, входящего в стык.

Достоинством такого подхода, является возможность быстрого получения модели для расчета из модели, предназначенной для расчета прочности в задаче силового нагружения конструкции, путем дробления существующих стержней. При этом сохраняется возможность использовать уже заданные в модели силовые нагрузки для анализа прочности конструкции при комбинированном тепловом и силовом нагружении методом конечных элементов.

Полученные таким образом распределения температур по конструкции для различных моментов времени далее используются для расчета температурных деформаций.

Непосредственно расчёт деформаций в модели производится по методике, основанной на вводе в модель фиктивных сил, влияние которых на конструкцию эквивалентно заданной тепловой нагрузке и сложении их с предварительно заданными силовыми нагрузками [2]. При этом вследствие допущения о равномерном прогреве стержневых и тонкостенных пластинчатых элементов модели по сечению, в модель вводятся только силы, действующие по осям стержней и в плоскости пластин. При определении напряжений деформации, вызванные тепловой нагрузкой, вычитаются.

В случае равномерно нагретого по сечению стержня (рис. 1) расчет эквивалентных усилий, которые вызовут такую же деформацию, как и нагрев проводится исходя из того, что при тепловом воздействии такой стержень работает на растяжение–сжатие.

Расчёт ведётся из условия равенства деформаций, вызываемых температурным и силовым нагружениями [3].

Эквивалентная сила, прилагаемая в узлах стержневого КЭ и определяемая из равенства тепловой и силовой деформации, составляет:

$$P = EF\alpha \cdot (T - T_0),$$

где E – модуль упругости материала стержня; F – площадь поперечного сечения стержня; α – коэффициент линейного расширения материала стержня; T_0 – начальная температура конструкции, при которой считается, что тепловая деформация отсутствует; T – средняя температура стержня в момент времени, для которого проводится расчет:

$$T = \frac{T_i + T_j}{2},$$

где T_i, T_j – температуры в узлах i и j стержневого КЭ соответственно (рисунок 1).

Полученные эквивалентные силы для всех КЭ модели добавляются в ее узлы, после чего происходит расчет перемещений как при расчете чисто механического нагружения. Однако полученные перемещения вдоль стержня пересчитываются в нормальные напряжения в стержне по модифицированной зависимости:

$$\sigma_n = E\frac{\Delta x_n^{ij}}{L} - \frac{P}{F},$$

где Δx_n^{ij} – относительное перемещение конечных узлов стержневого КЭ вдоль его оси; L – длина стержневого КЭ.

Учитывая те же соображения особенностей режима теплообмена в рассматриваемом классе задач, что и при расчете общей прочности, при расчете местной прочности элементов ферменной конструкции, подвергающихся воздействию высокотемпературной струи рационально использовать плоские КЭ с равномерным по толщине прогревом (рис. 2), для расчета температурного режима которых можно использовать специальные фиктивные стержни, размещаемые таким образом, чтобы коэффициенты теплоотдачи и теплоемкости узлах получались равными параметрам соответствующих пластин. Перемещения и напряжения в пластинах в этом случае вычисляются аналогично случаю стержня путем определения эквивалентных сил и дальнейшего учета температурной деформации при определении напряжений в плоскости элемента. Подробно эти зависимости приведены в [3].

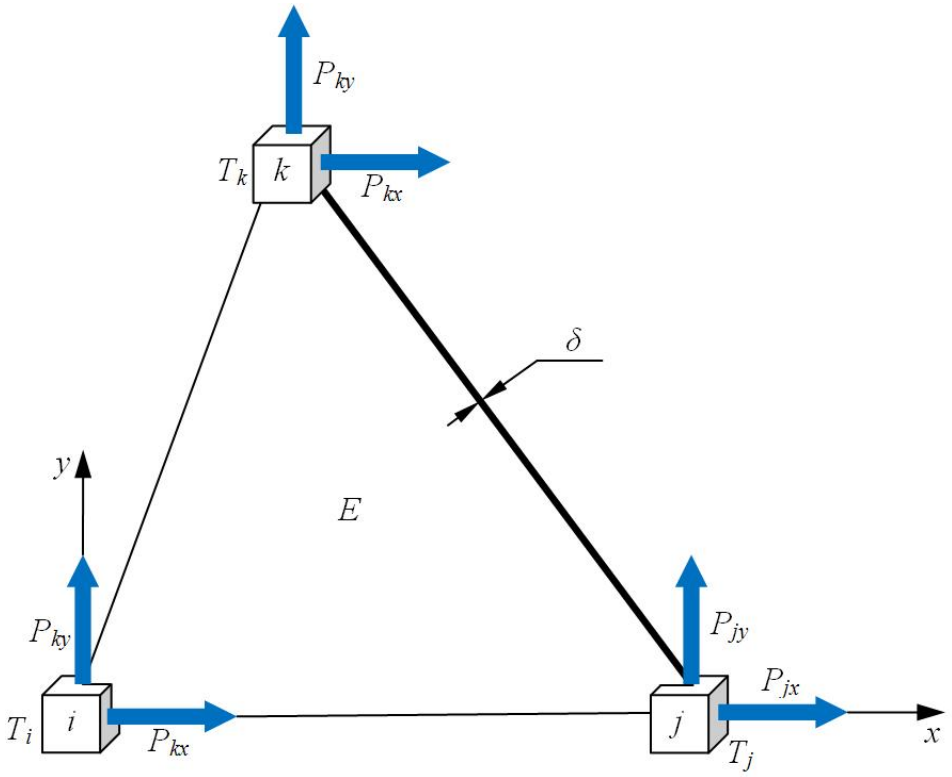


Рис. 2. К термомеханическому расчету треугольного конечного элемента
T_i, T_j, T_k – температуры i-го, j-го и k-го узлов треугольного КЭ соответственно; P_{ix}, P_{iy}, P_{jx}, P_{jy}, P_{kx}, P_{ky} –эквивалентные силы, обеспечивающие деформацию треугольного КЭ, равную температурной; E – модуль упругости материала пластины; δ – толщина пластины.

Четырехугольные и, в том числе, прямоугольные КЭ, имеющееся в расчётной модели, могут быть условно разделены на четыре треугольные КЭ каждая по двум диагоналям (рис. 3). Полученные треугольные КЭ имеют толщину, равную половине толщины соответствующего четырехугольного КЭ. Далее расчет ведется для полученных треугольных КЭ по зависимостям, приведенным выше.

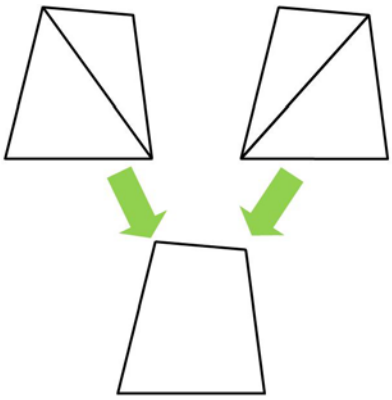


Рис. 3. К расчету температурных деформаций четырехугольных пластин.

Такой подход позволяет анализировать напряжения и деформации в ферменных конструкциях наземного оборудования, вызванные крупномасштабными изменениями геометрии конструкции под действием неравномерного термического расширения ее элементов.

Однако в реальных конструкциях имеются места, где предположение о равномерном прогреве элементов по сечению нельзя считать справедливым. К ним относятся толстостенные элементы, представленные в конструкции, как правило, плитами, места изменения толщины стенок и места примыканий под углом элементов замкнутого сечения, в часности трубчатых конструкций. В этих местах необходимо проводить также расчетный анализ напряжений и деформаций, вызванных местным температурным нагружением, с помощью более детализированных оболочечных или твердотельных расчетных моделей, что также удобно выполнять методом конечных элементов.

В частности, в местах сочленения труб возникает ситуация, при которой затенённая трубами часть места стыка остаётся непрогретой, как показано на рисунке 4. Это приводит к возникновению местных напряжений в этом конструктивном узле. Для оценки величины возникающих напряжений создаётся расчётная модель, которая представляет собой конечноэлементное представление труб, выполненное из плоских элементов – треугольных пластин. Применяется неравномерная сетка, у которой в областях, непосредственно граничащих с местами сочленения труб используется значительно более мелкий шаг, чем на остальной модели. Это связано с концентрацией напряжений возле стыка и позволяет улучшить точность вычислений, не увеличивая чрезмерно время расчета. Оценка необходимого шага сетки проводится с помощью полученного аналитически распределения по длине продольного изгибающего момента в защемленной на конце трубе, которая подвергается нагреву. При этом критерием для определения размера конечных элементов в сетке является условие, что в районе стыка изгибающий момент должен изменяться не более чем на 10 % по длине конечного элемента, что требуется для ограничения погрешности дискретизации при расчете.

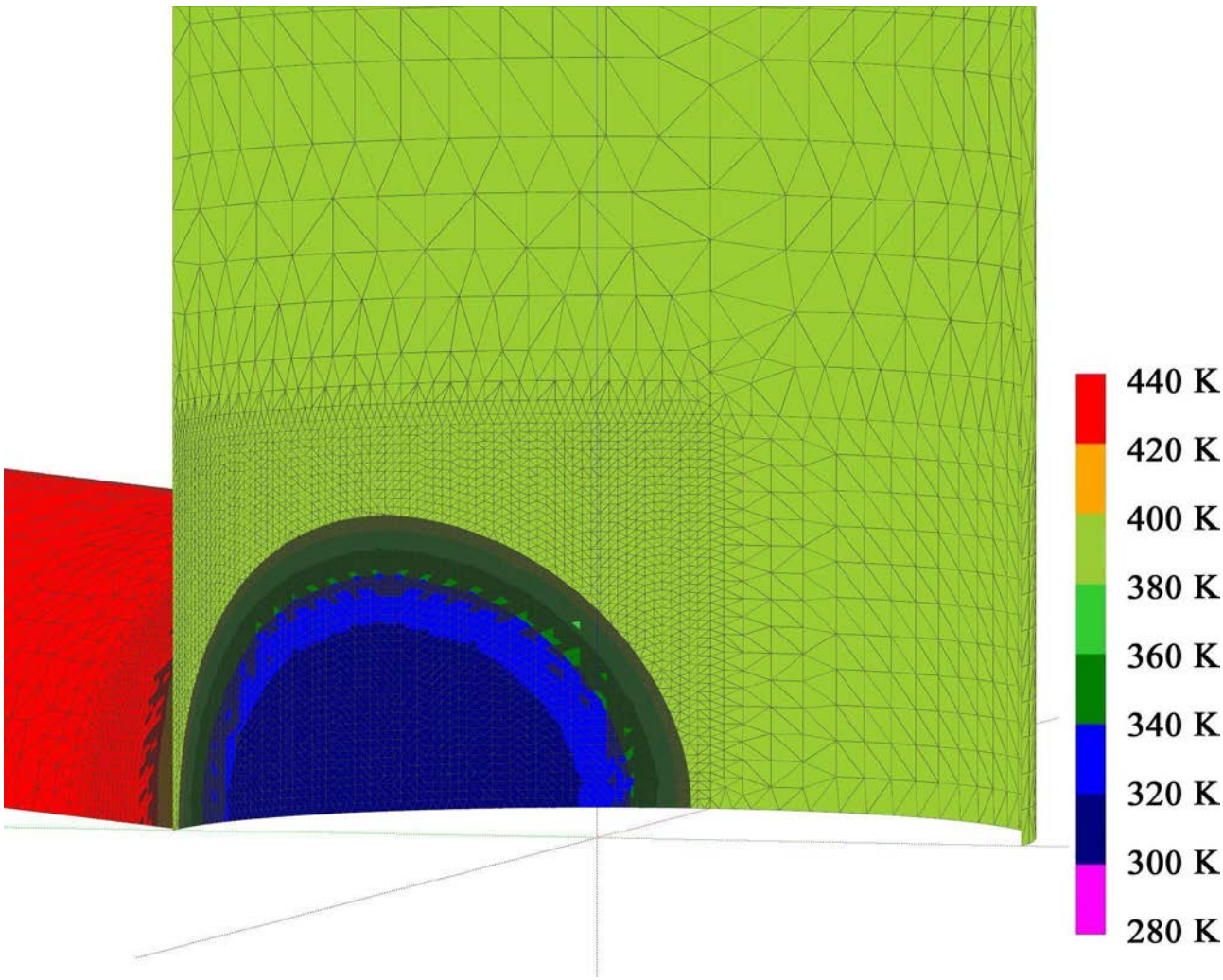


Рис.4. Поле температур в элементах ферменной конструкции в месте стыка труб

В случае примыкания двух одинаково прогретых труб к третьей, задача является симметричной по двум плоскостям и для уменьшения ее размерности возможно рассматривать только четверть конструктивного узла. При этом модель накладываются связи, обеспечивающие симметричность и внешнюю статическую определимость, как показано на рисунке 5. На рисунке 6 показана форма деформации модели.

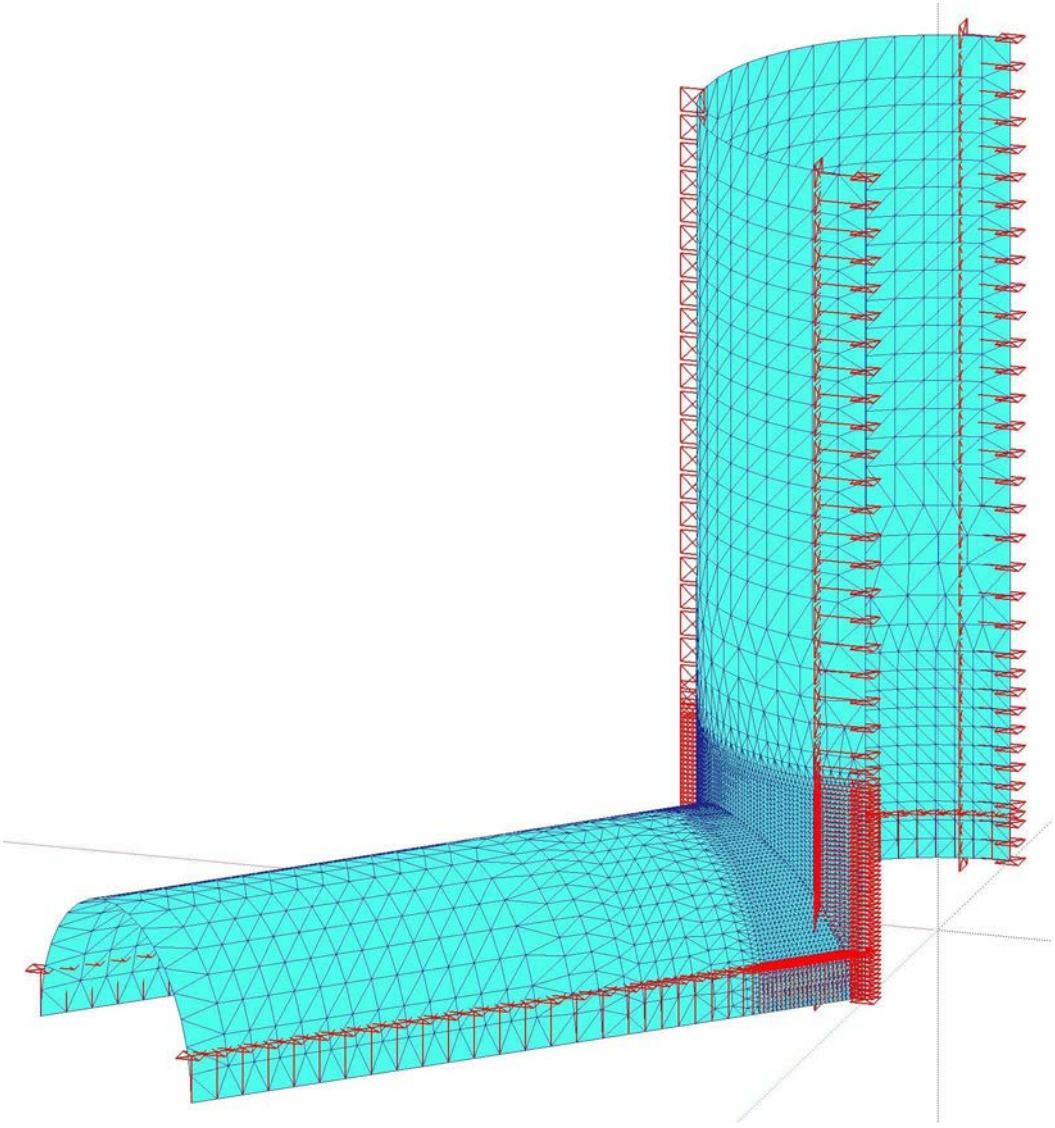


Рис.5. Расчетная модель стыка труб с наложенными связями для симметричного узла стыка двух поясов с ветвью ферменной конструкции

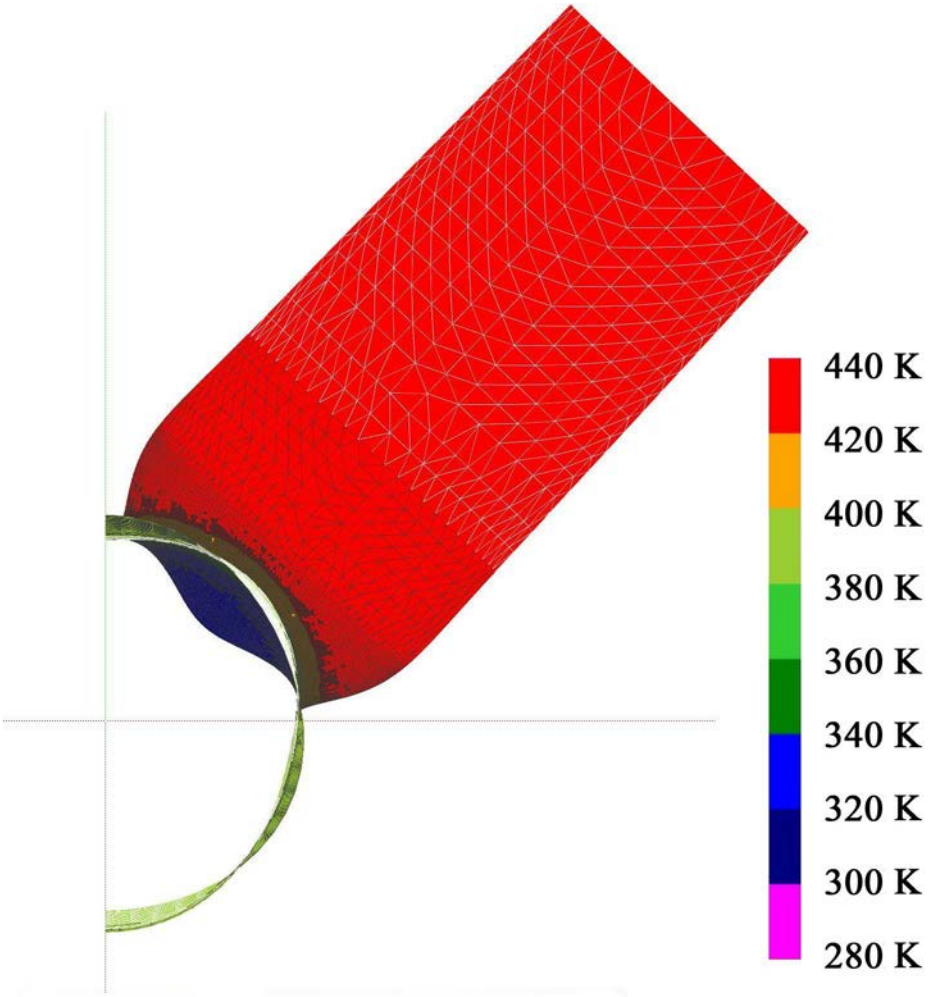


Рис. 6. Форма деформации стыка труб при быстром нагреве высокотемпературной струей

Таким образом, в соответствии с приведенными выше положениями, можно сделать вывод о возможности создания на основе метода конечных элементов методик для расчетного анализа прочности элементов ферменных конструкций наземного оборудования при интенсивном воздействии высокотемпературной струи. Приведенный анализ процессов теплообмена, система допущений и основные расчетные зависимости позволяют осуществлять расчет как общей, так и местной прочности ферменных конструкций. При этом применение метода конечных элементов в соответствии с предложенными в статье подходами и допущениями, позволяет с использованием одной и той же конечноэлеметной модели выполнять и тепловой, и механический расчет конструкции при термомеханическом нагружении, а также комбинированный расчет с учетом, дополнительно к термомеханическому нагружению, собственного веса конструкции и газодинамического нагружения от струи ДУ РКН.

Литература.

1. Федеральная космическая программа России на 2006 - 2015 годы. Основные положения. (Полный вариант Основных положений ФКП для открытого опубликования на веб-сайте Роскосмоса) // FEDERALSPACE.ru сайт Федерального космического агентства (Роскосмоса), 2005. http://www.federalspace.ru/download/fkp_2015_for_site.doc (дата обращения: 01.11.2011).
2. Абакумов В.С, Игрицкий В.А., Ломакин В.В., Чугунков В.В., Языков А.В. Учёт теплового воздействия газовой струи при расчёте прочности ферменных конструкций стартовых комплексов. Труды XXX академических чтений по космонавтике / «Комиссия РАН»,-М.,2007, 500 с.
3. Мяченков В.И., Мальцев В.П., Майборода В.П. Расчёты машиностроительных конструкций методом конечных элементов. Под общей редакцией Мяченкова В.И. – М. Машиностроение, 1989г. – 520 с; илл.

electronic scientific and technical periodical
SCIENCE and EDUCATION
EL № FS 77 - 30569. №0421100025. ISSN 1994-0408

The calculating analysis of strength of elements of ground equipment truss structures loaded with intensive high temperature jet

77-30569/332009

02, February 2012

Igrickii V.A., Hlybov V.F., Yazykov A.V.

Bauman Moscow State Technical University
igritsky_v_a@mail.ru
sm8@sm8.bmstu.ru
andr_yaz@sm8.bmstu.ru

The article describes aspects of the design analysis of strength of ground equipment truss structure loaded with the high temperature jet of launch vehicle engines. The reasonable limitations and calculating model development concepts for the thermal strength calculations were analyzed. Basics of the overall strength analysis were given. The truss structure local thermal strength analysis was considered by the example of joint of piped elements.

Publications with keywords: thermal load, ground equipment truss structures, high temperature jet
Publications with words: thermal load, ground equipment truss structures, high temperature jet

Reference

1. The Federal Space Program of Russia for 2006 - 2015 years. The main provisions, http://www.federalspace.ru/download/fkp_2015_for_site.doc.
2. Abakumov V.S, Igritskii V.A., Lomakin V.V., Chugunkov V.V., Iazykov A.V., Accounting for the thermal effects of the gas jet in the calculation of the strength of truss structures of starting complexes, in: Proceedings of the XXX Academic Readings on Astronautics, Moscow, Komissiia RAN - The commission of the RAS, 2007, 500 p.
3. Miachenkov V.I., Mal'tsev V.P., Maiboroda V.P., Calculations of machine-building structures by the method of finite elements, in: V.I. Miachenkov (Ed.), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 520 p.