

Сравнительный анализ стандартизованного и конечно-элементного подходов к прочностному расчёту на примере сборочного стола

Нетрусов А.Н.

Университет машиностроения

8 (495) 223-05-23(1467) a.netrusov@mail.ru

Аннотация. На примере прочностного статического расчёта сборочного стола выполнен сравнительный анализ точности и трудоёмкости стандартизованного подхода, регламентированного ОСТ 92-8767-76, и конечно элементного расчёта в среде FEMAP с применением линейного решателя NASTRAN. Дана оценка временных затрат и относительной погрешности определения местоположения и величины наибольших напряжений в конструкции. Показано, что конечно-элементный расчёт должен быть включён в отраслевые стандарты.

Ключевые слова: ферменные конструкции, статическое нагружение, линейное напряжённо-деформированное состояние, метод сил, метод конечных элементов.

Введение

В настоящее время в распоряжении расчётчика имеется широкий спектр прикладных программных комплексов, основанных, как правило, на конечно элементном подходе к моделированию деформирующихся конструкций [1 – 3, 5, 6]. Однако, невзирая на это, прочностной расчёт ферменных конструкций до сих пор регламентирован ОСТ 92-8767-76 [4] издания 1976 года. Его методологической основой является известный метод сил [7]. Этот стандарт носит рекомендательный характер, но при этом является единственным документом, имеющим юридическую силу при выполнении технического задания на прочностной расчёт ферменных конструкций. При этом документы, которые регламентировали бы расчёты с применением метода конечных элементов, отсутствуют.

В связи с этим цель настоящей работы состоит в выяснении степени согласованности результатов прочностного статического расчёта многосвязных ферменных конструкций, регламентированного ОСТ 92-8767-76, с результатами аналогичного расчёта методом конечных элементов в среде FEMAP с применением линейного решателя NASTRAN.

Расчёт по ОСТ 92-8767-76

Для достижения цели данного исследования рассматривается сборочный стол, представляющий собой многосвязную ферменную конструкцию из соединённых сваркой стержневых элементов и находящийся под действием весовой сосредоточенной нагрузки от собираемого объекта (рисунок 1). В соответствии с методом сил для статического расчёта сборочного стола на первом этапе выбираются его наиболее нагруженные элементы. Как правило, ими считаются те элементы, к которым приложена внешняя нагрузка. В данном случае это будут стержни № 1 и № 2 (рисунок 1), к которым приложены сосредоточенные усилия от веса собираемого объекта.

Стержень № 1 имеет размеры $l_1 = 130$ см, $l = 160$ см и нагружен поперечной силой $P = 281$ кГс. При этом он считается свободно опёртым на левом конце и жёстко заделанным на правом. Его расчётная схема вместе с поперечным сечением, имеющем размеры $H = 6$ см, $h = 5,4$ см, $B = 4$ см, $b = 3,4$ см, показана на рисунке 2. На этом же рисунке показан второй стержень, который имеет длину $l^* = 52$ см, то же поперечное сечение и нагружен силой $P^* = 563$ кГс. В соответствии с ОСТ 92-8767-76 его можно считать свободно опёртым обоими концами.

Первый стержень является один раз статически неопределимой конструкцией. Поэтому, для её «раскрытия», приходится отбрасывать левую опору и вводить вместо неё неизвестную вертикальную силу X . После выполнения стандартной процедуры метода сил для

определения силы X эпюра изгибающих моментов, действующих в первом стержне, будет иметь вид, показанный на рисунке 3. Второй стержень является статически определимым и его эпюра изгибающих моментов строится непосредственно (показана на рисунке 3).

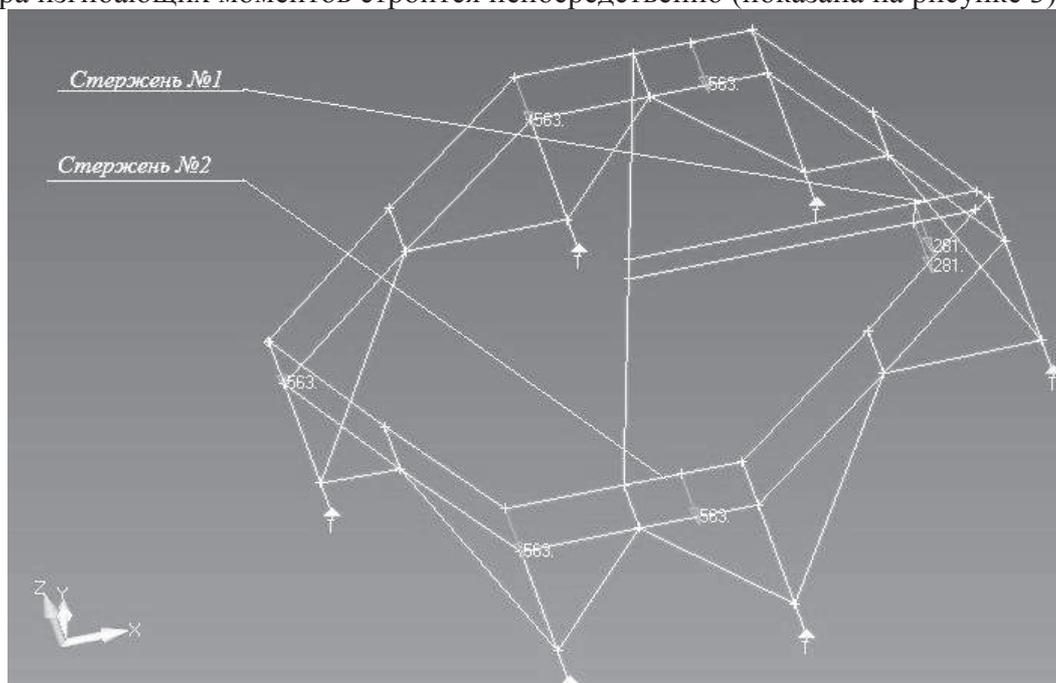


Рисунок 1

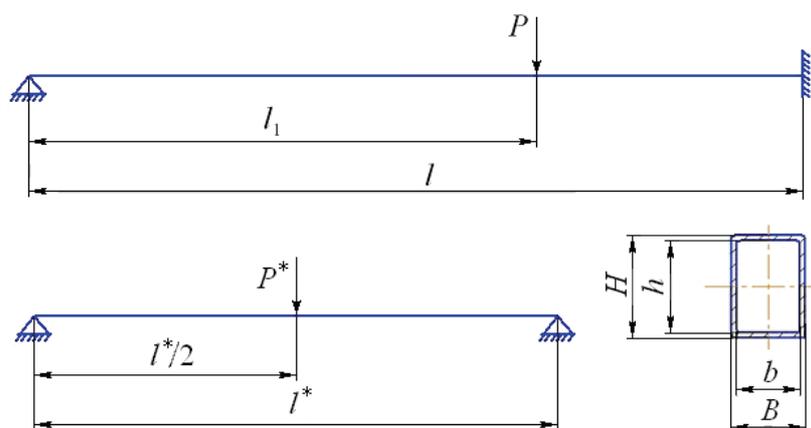


Рисунок 2

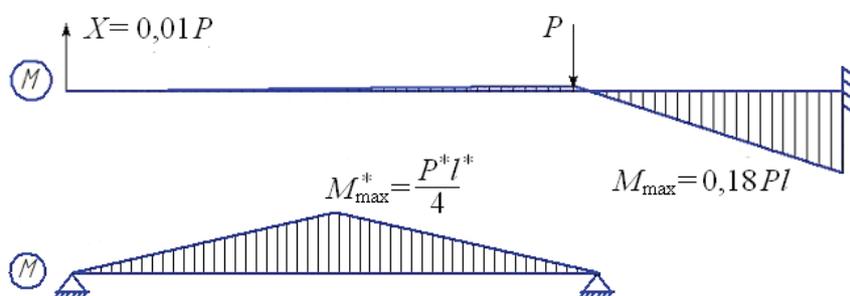


Рисунок 3

В числовом выражении наибольшие изгибающие моменты в рассматриваемых стержнях вместе с моментом сопротивления их поперечных сечений будут:

$$M_{\max} = 0,18Pl = 8092 \text{ кгс} \cdot \text{см}, M_{\max}^* = P^*l^*/4 = 7306 \text{ кгс} \cdot \text{см}, W = (BH^3 - bh^3)/(6H) = 9,1 \text{ см}^3.$$

В связи с этим наибольшие напряжения, которые наблюдаются в заделке первого стержня и в центре второго, будут равны:

$$\sigma_{\max} = M_{\max} / W = 889 \text{ кгс/см}^2, \quad \sigma_{\max}^* = M_{\max}^* / W = 802 \text{ кгс/см}^2.$$

Далее, при определении действительного коэффициента запаса прочности конструкции, сравнение с пределом текучести материала производится по максимальным напряжениям $\sigma_{\max\max} = 889 \text{ кгс/см}^2$.

Конечно-элементный расчёт

На первом этапе данного расчёта в среде FEMAP'а формируется трёхмерная модель рассматриваемой ферменной конструкции (рисунок 1). Затем в диалоговом режиме задаются свойства каждого стержня конструкции и способы их соединения и закрепления, после чего вся конструкция дискретизируется посредством разбиения каждого её стержня на однотипные конечные элементы. Это показано на рисунке 4, где числами обозначены узлы конечных элементов.

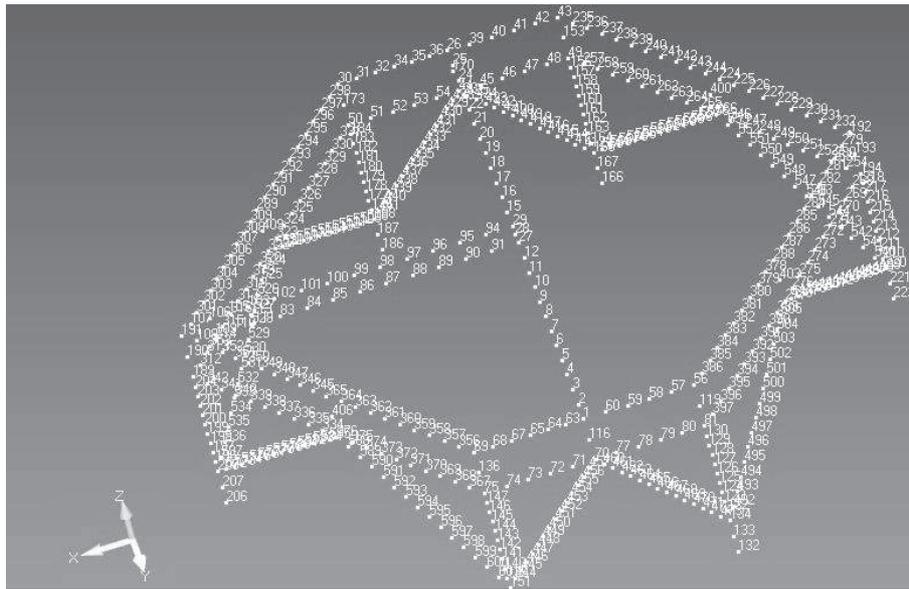


Рисунок 4

В качестве конечного элемента данного расчёта используется двухузловой элемент SBeam с 6-ю степенями свободы в каждом узле: три перемещения и три поворота поперечного сечения. Всего конструкция была разбита на 601 элемент и имела 3588 степеней свободы. Применяемый конечный элемент является элементом общего назначения, в основу которого положена комбинированная модель стержня Бернулли–Эйлера–Тимошенко. Он описывает растяжение-сжатие, кручение, изгиб в двух перпендикулярных плоскостях и сдвиг в двух перпендикулярных плоскостях. Главные оси инерции поперечных сечений элемента могут не совпадать с осями элемента, его нейтральная ось может иметь эксцентриситет относительно узловых точек, она не обязана проходить через центр сдвига поперечного сечения. Кроме этого, в математической модели элемента SBeam учитывается эффект деформации сечения при кручении, влияние его трапецевидности на сдвиговую жесткость стержня и возможность задания граничных условий для случая раскрепления стержня по силам или моментам на любом конце элемента.

После формирования конечно-элементной модели рассматриваемой конструкции был выполнен её расчёт с применением линейного решателя NASTRAN'а. Результаты этого расчёта представлены на рисунке 5 в виде самой трёхмерной модели и эпюр наибольших эквивалентных напряжений в её элементах, которые рассчитывались по пятой, энергетической теории прочности Губера–Мизеса–Генки:

$$\sigma_{\text{эkv}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}.$$

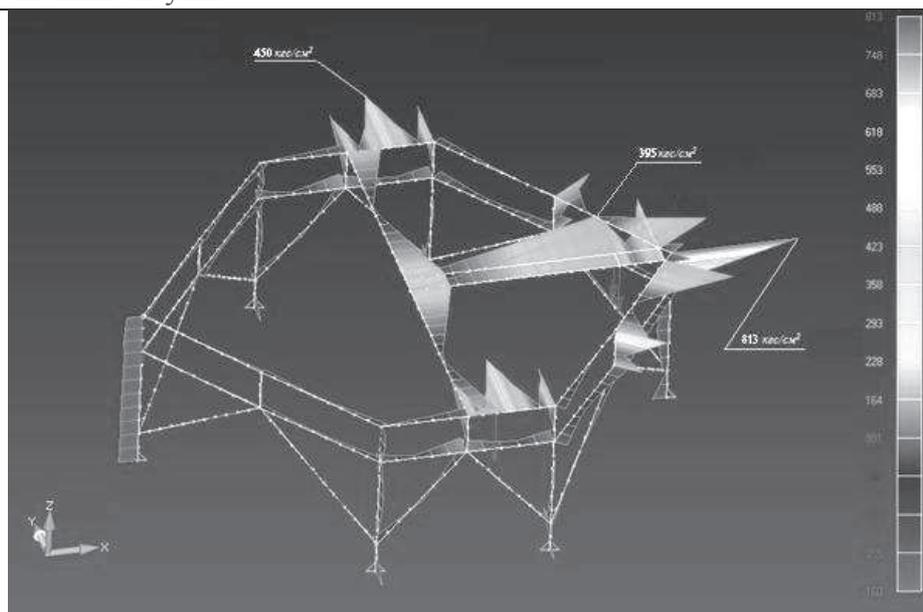


Рисунок 5

Как показали расчёты в тех сечениях, которые в стандартизованном расчёте были выбраны как самые опасные, напряжения оказываются равными $\sigma_{\max \text{МКЭ}} = 395 \text{ кгс/см}^2$ $\sigma_{\max \text{МКЭ}}^* = 450 \text{ кгс/см}^2$. Однако наибольшими напряжениями являются напряжения, равные $\sigma_{\max \text{max МКЭ}} = 813 \text{ кгс/см}^2$, и наблюдаются они на вертикальной стойке у рассмотренного ранее стержня №1.

Сравнение результатов вычислений

В соответствии с ОСТ 92-8767-76 метод сил применяется фрагментарно к наиболее нагруженным элементам конструкции. Это порождает элемент субъективизма в выполняемых расчётах. В частности, он проявляется при задании граничных условий на концах рассматриваемых элементов. Такой подход не даёт полной картины напряжённо-деформированного состояния конструкции. В этом отношении метод конечных элементов, дающий полную картину поведения конструкции (рисунок 5), имеет несомненное преимущество перед регламентированным стандартом подходом.

По этой же причине степень достоверности описания локальных явлений в напряжённо-деформированном состоянии конструкции у метода конечных элементов безусловно выше, чем у регламентированного подхода. Например, относительная погрешность вычисления наибольших напряжений σ_{\max} в стержне № 1 методом сил по сравнению с методом конечных элементов составляет 55%, для напряжений σ_{\max}^* в стержне № 2 она равна 43%. Однако, здесь не надо забывать, что регламентированный подход к расчёту ферменных конструкций сформировался на основе огромного как расчётного, так и экспериментального фактического материала. Поэтому его достоверность при расчёте такого интегрального параметра конструкции, как коэффициент запаса прочности, не вызывает сомнения. В данной работе разница в наибольших по конструкции напряжениях, полученных методом сил и методом конечных элементов, не превышает 9%. При этом регламентированное применение метода сил даёт завышенное значение этих напряжений и, соответственно, заниженное значение коэффициента запаса прочности, что уменьшает вероятность совершения расчётчиком ошибки.

Сравнение трудоёмкости рассмотренных подходов в виде затрат рабочего времени расчётчика показывает несомненное превосходство стандартизованного подхода. Для конечно-элементного расчёта требуется на порядок больше времени. Это обусловлено тем, что основная часть затрачиваемого времени при конечно-элементном подходе приходится на форми-

рование трёхмерной модели конструкции, которое является довольно длительным процессом. Однако нельзя не отметить тот факт, что при применении конечно-элементных комплексов и грамотной верификации получаемых результатов вероятность совершения ошибки в расчётах напряжённо-деформированного состояния конструкции несоизмеримо меньше, чем при стандартизованном подходе.

Выводы

Вопрос о предпочтительности стандартизованного и конечно-элементного подхода к расчёту напряжённо-деформированного состояния ферменных конструкций не имеет однозначного ответа. Эти подходы скорее дополняют друг друга, чем исключают. Вследствие высокой степени статической неопределимости ферменной конструкции в стандартизованном подходе невозможно использовать метод сил в полной мере. На практике ограничиваются рассмотрением лишь наиболее нагруженной части конструкции, допуская значительный произвол в постановке граничных условий для неё и теряя полноту картины её напряжённо-деформированного состояния. Положительной стороной данного упрощения является получение «качественной» оценки напряжённого состояния конструкции за сравнительно небольшое время. В свою очередь метод конечных элементов даёт возможность анализировать напряжённо-деформированное состояние всей конструкции с большей степенью детализации. Но для его реализации требуются существенно большие затраты рабочего времени. По всей видимости, оптимальным решением здесь будет их совместное использование. Причём это использование должно быть юридически обосновано. Для этого существующие коммерческие конечно-элементные программные комплексы должны быть сертифицированы, а их применение должно быть регламентировано и внесено в отраслевые стандарты.

Литература

1. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1977. 544 с.
3. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М.: Высш. Школа, 1985. 392 с.
4. ОСТ 92-8767-76. «Элементы стержневые металлоконструкций агрегатов специального назначения. Расчет и конструирование». М., 1976. 512 с.
5. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов. Справочник. Под ред. В.И.Мяченкова. М.: Машиностроение, 1989. 520 с.
6. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде MSC.visualNastran for Windows. М.: НТ Пресс, 2004. 552 с.
7. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. М.: Наука, 1970. 544 с.