

РАСЧЕТ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НЕГАБАРИТНЫХ ГРУЗОВ

Д.А. Беличенко

belichenkoda@student.bmstu.ru

SPIN-код: 3525-3310

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Подъемно-транспортные системы применяются для кантования и монтажа колонных аппаратов на производствах нефтяной и химической отраслей. Исследование данных конструкций на прочность позволяет находить критические точки и формировать рекомендации по эксплуатации. В данной работе проведен статический расчет на прочность конечно-элементных балочной модели и модели крепления (именно крепление является критическим местом). Использован новый подход к исследованию и анализу: метод подконструкций, который заключается в проведении расчетов в несколько этапов, на разных моделях. Сначала была рассчитана балочная модель — по результатам расчета все элементы обладают достаточной прочностью. Были выявлены два критических места: основание опор и крепление балок. Для крепления балок была подготовлена отдельная модель — подконструкция, которая была рассчитана статически с наложенными граничными условиями для балочной модели. Согласно результатам расчета, подконструкция также обладает достаточной прочностью. Метод подконструкций требует меньших вычислительных мощностей и позволяет точнее оценить нагрузки на отдельные узлы. Расчеты методом подконструкций дают возможность перейти к динамическому расчету и после оценить возможность автоматизации системы.

Ключевые слова: статический расчет, метод подконструкций, метод конечных элементов, подъемно-транспортная система, ANSYS, монтаж колонных аппаратов, критическое место конструкции

Объект исследования. Объектом изучения является подъемно-транспортная система B-SET от компании Enerpac [1], представляющая собой портално-ферменную конструкцию. Система является самомонтирующейся, т. е. в ее основании расположены установки с гидросистемами, позволяющие добавить новые опоры и поднять мост наверх с уже собранными фермами. Опоры конструкции схожи с опорами башенного крана, только у рассматриваемой системы ферма собирается из отдельных элементов, а не из готовых блоков. На вершине подъемно-транспортной системы B-SET расположен мост, на котором размещается тележка с тросами и подъемным оборудованием, а также балки, соединяющие мост и опоры.

Подъемно-транспортная система B-SET применялась для выполнения реальных работ. В 2014 г. на Ачинском нефтеперерабатывающем заводе эта

система применялась для подъема и установки шести реакторов гидрокрекинга [2] (рис. 1). Масса реакторов варьировалась от 600 до 1800 т. Работы проводились в ограниченном пространстве на строительной площадке. В настоящее время подобные подъемно-транспортные системы используются для монтажа реакторов на предприятиях нефтехимической отрасли.



Рис. 1. Подъем реактора гидрокрекинга подъемно-транспортной системой В-SET

Актуальность. В современных программах для прочностных расчетов широко применяется метод конечных элементов [3]: твердотельные модели (solid models), например корпуса редукторов, можно разбить на элементы, получить своего рода зернистую структуру, и благодаря этому достаточно эффективно выполнить расчет на прочность, жесткость и другие параметры. Однако при проведении расчетов для подъемно-транспортной системы возникает проблема: в процессе разбиения модели всей системы на конечные элементы сетка (аналог зерен) может получиться мелкой и самих конечных элементов будет слишком много, поскольку конструкция состоит из различных профилей и балок, т. е. тонкостенных деталей. Описанное разбиение не подходит для расчетов, так как потребует значительных вычислительных мощностей и при этом понадобятся ресурсы на вычисление в малозначимых для исследования узлах.

В работе рассматривается подход для более эффективного анализа — метод подконструкций [4]: это поэтапное исследование конструкции, позволя-

ющее проводить расчеты на домашнем компьютере. Благодаря данному методу были получены достаточно точные результаты. Сначала была построена балочная модель конструкции, элементами которой являются балки Beam188 (опоры, мосты, фермы). На основе результатов линейного статического расчета были выявлены критические места. Далее для критического места, крепления балок, была создана подконструкция — твердотельная модель, на узлы которой наложены перемещения из балочной модели.

Постановка задачи. В данной работе ставится задача определения прочности конструкции подъемно-транспортной системы B-SET путем расчета конечно-элементной модели, созданной на основе балочного элемента пакета ANSYS, и дополнительного расчета критических мест методом подконструкций.

Использование поэтапного расчета, расчетов всей конструкции и критических мест, позволит повысить точность и снизить затраты на вычислительные ресурсы.

Целью данной работы является исследование конструкции подъемно-транспортной системы B-SET на прочность, проведение динамического расчета и анализ полученных результатов, формирование рекомендаций по эксплуатации системы и оценка возможности автоматизации процесса подъема груза.

Конструкция подъемно-транспортной системы. В основании подъемно-транспортной системы B-SET расположены модули для возведения новых ферм. Профиль с сечением в форме восьмиугольника присоединяется к уже установленной такой же детали, в «хвост», затем при помощи гидравлической системы поднимается вверх. На верхней площадке закрепляются диагональные перегородки, предотвращающие потерю устойчивости [5].

Основная несущая нагрузка распределяется между четырьмя башнями, каждой из которых соединены четыре линии восьмиугольных профилей. В целом это балочная конструкция, схожая с конструкцией башенного крана.

Пролетное строение подъемно-транспортной системы выполнено из балок, представляющих собой профиль с прямоугольным сечением. Четыре опоры соединены с основным пролетом, так называемым «мостом», при помощи балок, расположенных друг на друге. Непосредственно мост выполнен из двух параллельно идущих балок, так же выполненных из профиля с прямоугольным сечением. На «мосту» расположена тележка с гидравлическими домкратами, протягивающими тросы при подъеме колонны. Профили, из которых собрано пролетное строение, выполнены из стальных листов с толщиной от 30 до 40 мм.

Управление системой осуществляется удаленно из обособленного пункта с пультом. Оператор получает данные с мониторов и камер, дополнительные

сведения по рации передают специалисты, непосредственно следящие за ходом монтажных работ.

Конечно-элементные модели в ANSYS. Параметры материала. В качестве параметров материала были использованы параметры для стали 40 [6]: Модуль Юнга (модуль упругости первого рода) $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 7800$ кг/м³.

Балочная модель. Балочная модель создана с помощью двухузлового балочного элемента Beam188, который имеет шесть степеней свободы в каждом узле: три перемещения и три поворота вокруг осей. В балочном элементе Beam188 пакета ANSYS учтена балочная теория Тимошенко [7], которая включает эффект деформации сдвига, т. е. при сдвиге сечение стержня уже не перпендикулярно оси стержня.

Для подъемно-транспортной системы прочность и жесткость конструкции обеспечены расположением балок и подобранными по толщине профилями.

При создании опор-колонн использовались типовые сечения, предлагаемые ANSYS [8]. Для построения вертикальных элементов, принимающих основную нагрузку, был выбран квадратный профиль с толщиной стенки 30 мм и стороной 240 мм. Для соединения вертикальных элементов применяются профиль круглого сечения с толщиной стенки 10 мм и внешним диаметром 80 мм.

Пролетное строение имеет более сложную конструкцию. Для соединения так называемых мостов с опорами использовались балки с сечением прямоугольного профиля. Толщина стенок от 100 до 140 мм. Мост имеет ширину 1 м, высота самых высоких элементов 2,2 м. Продольные профили, поддерживающие мост, имеют ширину 1 м, максимальная высота элементов составляет 1,4 м. Балки, которые соединяют продольные профили и опоры конструкции, имеют ширину 0,4 м и высоту 1 м.

Для соединения между собой балок пролетного строения в модели ANSYS так же применялись балки со сплошным прямоугольным сечением. Они имитируют элементы креплений. Сторона креплений малых балок составляет 0,2 м, для креплений продольных профилей и моста использованы балки квадратного сечения со стороной 0,4 м.

Линейные размеры модели. Опоры состоят из однотипных блоков. Каждый блок имеет высоту 4 м, ширину и длину 5 м. В каждой колонне 28 блоков, высота только опор составляет 112 м. С учетом пролетного строения высота конструкции равна 116,6 м. Общая длина конструкции составляет 15 м, ширина 30 м. Длина пролета «моста» составляет 25 м. Пролетное строение балочной модели представлено на рис. 2.

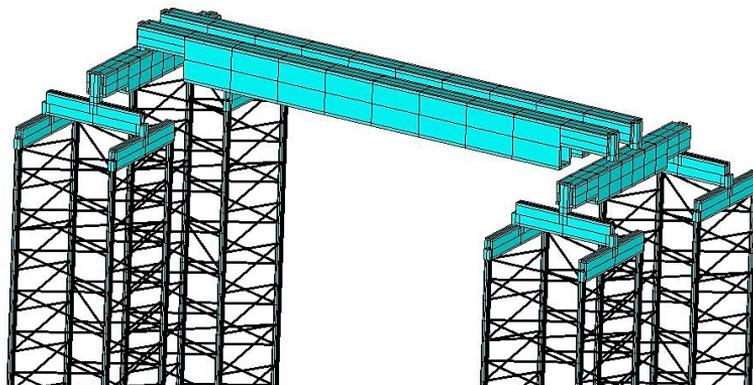


Рис. 2. Пролетное строение балочной модели в программе ANSYS

Нагрузки и ограничения. Линейный статический расчет конструкции проводится для случая, когда кантование колонны было завершено, но она не была установлена на фундамент. В этот момент вся масса ректификационной колонны, 1600 т, приходится на конструкцию. Нагрузка задана при помощи распределенной нагрузки 785 кН/м. Она распределена равномерно на оба пролета моста, что при совокупной длине нагруженных элементов в 20 м эквивалентно силе 15,7 МН.

В основании подъемно-транспортной системы узлы ограничены в перемещении по шести степеням свободы: запрещены линейные перемещения вдоль каждой оси и повороты относительно каждой оси. Всего 16 узлов с ограниченным перемещением.

Помимо структурных параметров материала, в модели учитывается сила тяжести: задано ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Совокупно объем стали в конструкции составляет $132,9 \text{ м}^3$, что при плотности $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ дает массу 1036,7 т.

Расчет и анализ результатов. Для балочной модели был проведен статический расчет с предустановленным параметром структурный (structural) [9]. Анализ напряженного состояния показал, что максимальное эквивалентное напряжение по четвертой (энергетической) теории прочности Губера — Мизеса — Генки составило 123 МПа: данная точка находится в сечении пролета моста.

Всего в конструкции выявлено два критических места [10]: в основании опор и в креплении балок.

Основания опор на элементы, крепящиеся к фундаменту, принимают на себя всю массу конструкции и груза, ввиду чего на них действуют значительные сжимающие силы. Значение нормального напряжения в сечениях балок в основании достигает 70 МПа (рис. 3).

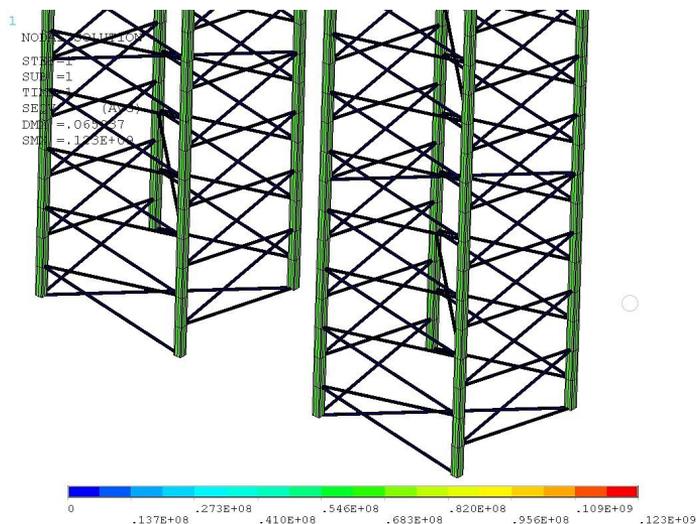


Рис. 3. Напряжения в основании опор

В пролетном строении критическим местом является крепление балок, поскольку на него действуют и сжимающие, и изгибающие силы. Для данного узла создается подконструкция для более детального исследования напряженного состояния. Критическое место, соответствующее месту крепления балок, показано на рис. 4.

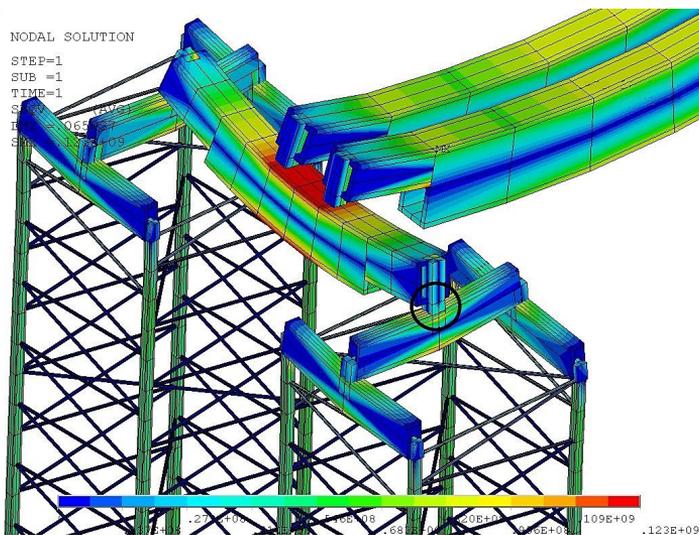


Рис. 4. Напряжения в пролетном строении балочной модели; критическое место обведено кружком

Подконструкция — модель крепления. Для более детального изучения поведения крепления при нагружении и получения более точных результатов была создана специальная подконструкция (рис. 5).

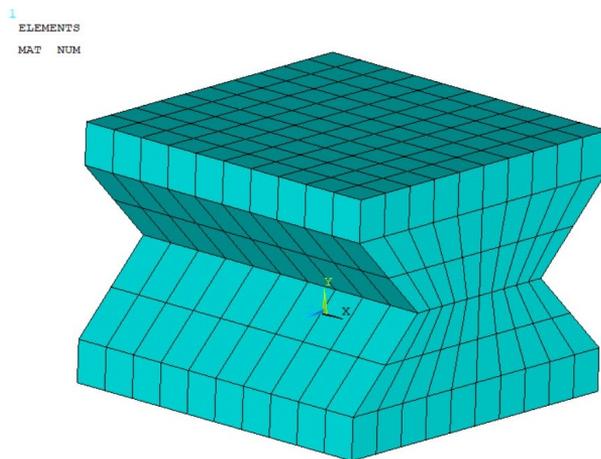


Рис. 5. Твердотельная модель крепления (подконструкция), построенная в программе ANSYS

Материал был описан параметрами для стали 40, использованными в балочной модели. Непосредственно модель представляет собой твердотельный элемент (solid model), повторяющий геометрию реального крепления. В качестве граничных условий (условий нагружения) использованы перемещения в узлах сечений креплений из балочной модели. Перемещения, приложенные в узлах, создают условия деформации и смещения крепления.

Анализ расчета подконструкции. Для подконструкции был проведен линейный статический расчет. Максимальное эквивалентное напряжение составило 88,1 МПа — точка находится в углу поверхности контакта с балкой (рис. 6). Первое главное напряжение равно 66,8 МПа — таково влияние сжимающей нагрузки. Максимальное напряжение сдвига составляет 33,4 МПа — данная точка находится на грани поверхности стыка с нижней плоскостью (рис. 7). С учетом деформации и внутренних напряжений можно сделать вывод, что крепление обладает достаточной прочностью.

Заключение. Создана балочная модель конструкции, для которой выполнен статический расчет. Анализ модели под нагрузкой позволил выявить два критических места: профили в основании опор и крепления балок. В профилях в основании возникают значительные сжимающие нагрузки, максимальное эквивалентное напряжение достигает 70 МПа. Крепление

балок испытывает как сжатие, так и изгиб, поэтому для этого элемента была создана специальная подконструкция. Расчет модели крепления позволил получить более точные результаты и провести анализ, позволивший убедиться, что деталь имеет достаточную прочность.

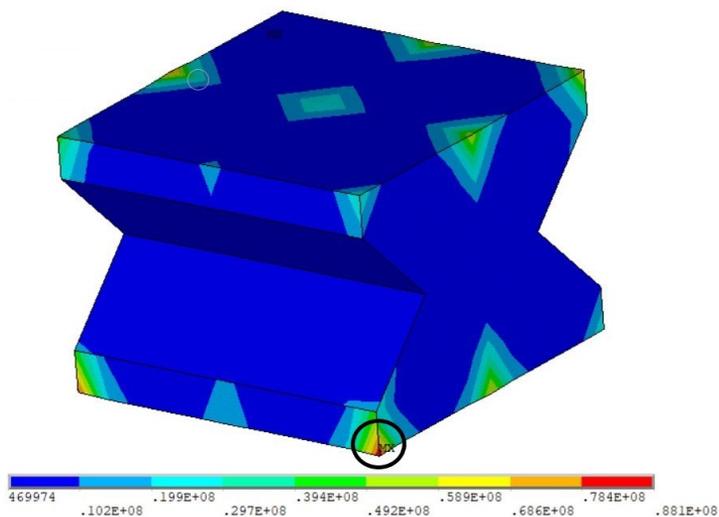


Рис. 6. Напряжения в подконструкции; максимальное эквивалентное напряжение обведено кружком

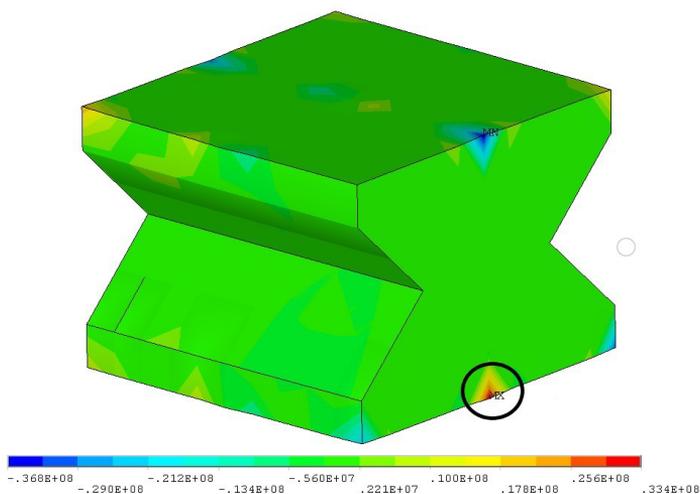


Рис. 7. Напряжения сдвига в подконструкции; максимальное напряжение сдвига обведено кружком

Анализ конструкции и крепления подтверждает достаточную прочность подъемно-транспортной системы. В дальнейшем появляется возможность для создания динамической модели и исследования нагружения в процессе подъема колонны, что, в свою очередь, позволит сформировать рекомендации по эксплуатации системы и оценить возможность автоматизации расчета.

Литература

- [1] *B-Set. Self Erecting Strand Jack Gantry*. URL: http://www.enerpac.com/sites/default/files/leaflet_self_erecting_tower.pdf (accessed 15.02.2025).
- [2] Дроговоз П.А., Попович А.Л. Сравнительный анализ технологий для подъема и монтажа крупнотоннажного оборудования в проекте реконструкции Ачинского нефтеперерабатывающего завода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1223.html> (дата обращения 15.02.2025).
- [3] Moaveni S. *Finite element analysis. Theory and application with ANSYS*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999, 527 p.
- [4] Жидков А.В. *Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования*. Нижний Новгород, 2006, 115 с.
- [5] Miller M. *Enerpac BSET and Special Solutions*: (видеозапись). URL: <https://www.youtube.com/watch?v=M20GFsoqhwk&t=62s> (дата обращения 15.02.2025).
- [6] Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. и др. *Материаловедение*. Москва, Машиностроение, 1986, 384 с.
- [7] Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов. Сер. Механика в техническом университете. Т. 2*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999, 592 с.
- [8] Беличенко Д.А., Комаров Д.А., Морозов Е.П. Расчет на прочность портално-ферменной конструкции для перевозки крупногабаритных грузов. *Студенческая научная весна, посв. 110-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея. Всерос. студенческая конф.: сб. тез.* Москва, Издательский дом Научная библиотека, 2024, 676 с.
- [9] Madenci E., Guven I. *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*. Springer, Springer International Publ., 2015, 663 p.
- [10] Леденев В.В., Ярцев В.П. *Обследование и мониторинг строительных конструкций зданий и сооружений*. Тамбов, Изд-во ТГТУ, 2017, 252 с.

Поступила в редакцию 17.03.2025

Беличенко Данил Александрович — студент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Гаврюшин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация, E-mail: gss@bmstu.ru, SPIN-код: 3142-3809.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Беличенко Д.А. Расчет подъемно-транспортной системы для перемещения негабаритных грузов. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 04 (99). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/mech/mdsb/1054.html>

CALCULATION OF THE LIFT-TRANSPORTING SYSTEM FOR MOVING OVERSIZED CARGO

D.A. Belichenko

belichenkoda@student.bmstu.ru

SPIN-code: 3535-3310

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Lift-transporting systems are used for tilting and mounting column devices in the oil and chemical industries. The study of these structures for strength allows to find critical spot and form recommendations for operation. In this article, a static calculation is carried out for the strength of the finite element beam model of the entire structure and the fastening model, since the latter is a critical spot. A new approach of research and analysis is used: the method of substructures, which consists of carrying out calculations in several stages, at different stages models. First, a complete beam model of the structure was calculated — according to the specifications, all elements have sufficient strength. Two critical spots were identified: the base of the supports and the fastening of the beams. To fastening of the beams, a separate model was made, a substructure, which was calculated statically, with imposed boundary conditions from the beam model. According to the results, the substructure also has sufficient strength. The substructure method reduces the required computing power and makes it more accurate evaluate the loads on individual nodes. Calculations using the substructure method allow to switch to dynamic calculation and then evaluate the possibility of automating the system.

Keywords: static analysis, substructure method, finite element method, lift-transporting system, ANSYS, installation of column devices, critical spots

Received 17.03.2025

Belichenko D.A. — Student of Department of Computer systems of production automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Gavryushin S.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department Computer systems of production automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: gss@bmstu.ru, SPIN-code: 3142-3809.

Please cite this article in English as:

Belichenko D.A. Calculation of the lift-transporting system for moving oversized cargo. *Politekhniicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 04 (99). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/mech/mdsb/1054.html>