

УДК 539.4

Определение прочностных характеристик подъемно-транспортной системы при статической и динамической нагрузках

Беличенко Данил Александрович

Гаврюшин Сергей Сергеевич (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Исследованы прочностные характеристики подъемно-транспортной системы ENERPAC B-SET, используемой для монтажа колонных аппаратов массой до 1600 т и высотой 50 м. Был проведен статический расчет всей конструкции, благодаря которому были выявлены два критических места: основание колонн и крепление балок. Крепление балок было исследовано с помощью метода подконструкций. Статические расчеты показали, что конструкция обладает достаточной прочностью с коэффициентом запаса 2,27. Был проведен кинематический анализ подъема колонного аппарата, подобран закон изменения движущей силы в домкратах. Динамический расчет показал, что при использовании выбранного закона в конструкции не возникают колебания, которые могут привести к потере устойчивости.

Ключевые слова: статический расчет, динамический расчет, метод подконструкций, подъемно-транспортная система, ANSYS

Введение. На предприятиях нефтяной и химической промышленности одним из этапов производства является разделение сырой жидкости (смеси) на фракции. Данную операцию проводят с помощью реакторов гидрокрекинга — аппаратов колонного типа. Данные аппараты изготавливаются только на специализированных предприятиях, ввиду чего перевозятся и монтируются в собранном виде. Каждый монтаж — это уникальный проект, требующий в том числе и прочностные расчеты. В данной работе исследуется процесс кантования колонного аппарата с помощью подъемно-транспортной системы ENERPAC B-SET (далее B-SET). Целью является получение прочностных характеристик конструкции при динамической нагрузке, связанной с подъемом колонны и работой силовой установки — гидравлического домкрата. Актуальность данной работы обусловлена потребностью в строительстве новых нефтехимических предприятий и модернизации уже существующих.

Постановка задачи. В качестве силового агрегата в подъемно-транспортной системе ENERPAC B-SET используются гидравлические домкраты HLS85007 [1]. В связи с использованием гидравлического домкрата процесс подъема дискретный: в каждом цикле присутствует такт подъема груза, следующим тактом поршень домкрата совершает обратное движение. Таким образом, совершая перехваты, система за n циклов совершает кантование колонного аппарата. Для перемещения основания колонного аппарата и сохранения устойчивости применяется портал [2]. Общий вид системы представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид подъемно-транспортной системы B-SET

Кинематический анализ. Для исследования прочностных свойств системы при динамической нагрузке рассматривается один такт подъема колонны. Была составлена расчетная схема, представленная на рис. 2. Портал представлен ползуном с шарниром A . Поднимаемый колонный аппарат представлен шатуном с центром масс в точке S_1 . Закрепление вершины колонного аппарата на тросах представлено ползуном с шарниром B . На рис. 2 система условно показана в двух положениях — начальном, с индексом «Н», и конечном, с индексом K .

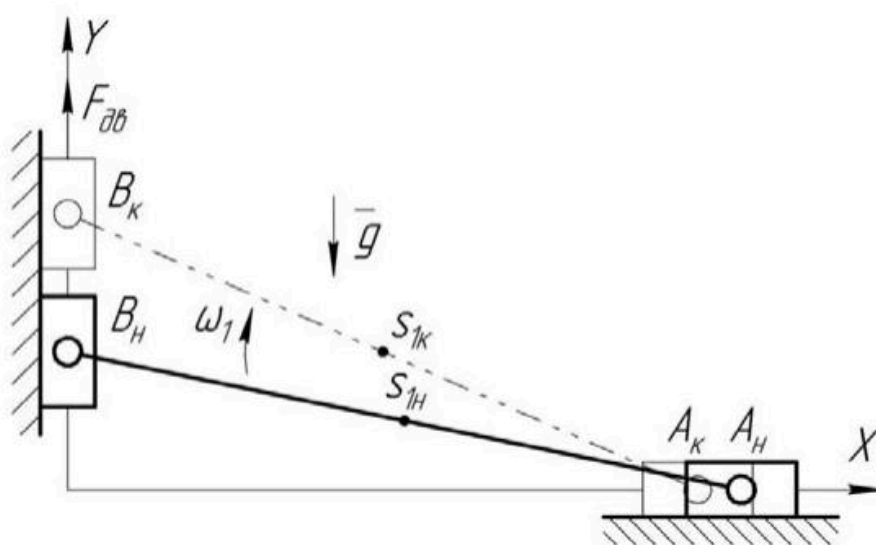


Рис. 2. Схема для кинематического расчета

Координата точки A по оси x зависит от координаты точки B на оси y и определяется формулой

$$x_A = \sqrt{l_{AB}^2 - y_B^2},$$

где x_A — координата точки A по оси x [м]; y_B — координата точки B по оси y [м]; $l_{AB} = 48$ — длина шатуна [м] (высота колонного аппарата).

Масса колонного аппарата составляет $m = 1,6 \cdot 10^6$ кг. Ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². Усилие на домкрате $F_{дв}$ приложено к ползуну B . При проведении кинематического анализа был подобран закон изменения усилия на домкрате, график представлен на рис. 3. Величина усилия домкрата в начале и конце подъема, а также в точке перегиба, соответствующие значения перемещения и времени приведены в таблице.

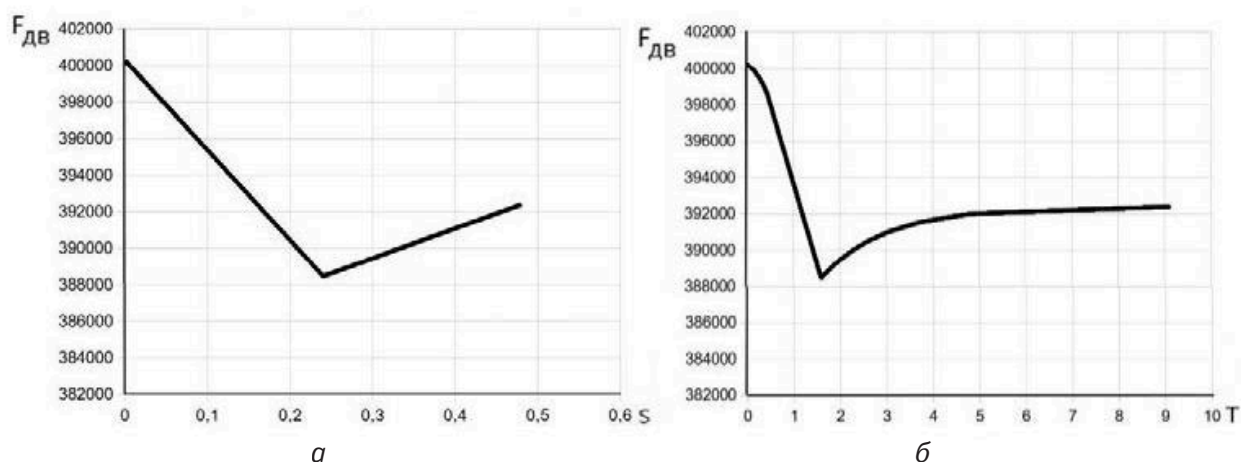


Рис. 3. Закон изменения усилия домкрата:

a — в зависимости от перемещения; b — в зависимости от времени

Характерные точки закона изменения движущей силы

Параметр	Начальное положение	Точка перегиба	Конечное положение
Усилие домкрата $F_{дв}$, Н	400 000	388 500	392 400
Перемещение S , м	0	0,24	0,48
Время t , с	0	1,6	9,12

По результатам кинематического анализа время подъема груза составило $t = 9,12$ с.

Динамический расчет. Для определения прочностных характеристик конструкции системы В-SET во время подъема была создана конечно-элементная модель, сформированная из балочных элементов Beam188 [3]. В качестве динамической нагрузки к пролетному строению приложена распределенная сила, соответствующая усилию домкрата. Помимо динамиче-

ской нагрузки, учтена сила $F_z = 68490$ Н, которая возникает при смещении вершины крана относительно домкратов на $U_z = 420$ мм.

Заключение. По результатам динамического расчета были получены графики перемещения в узлах конечно-элементной модели конструкции, представленные на рис. 4.

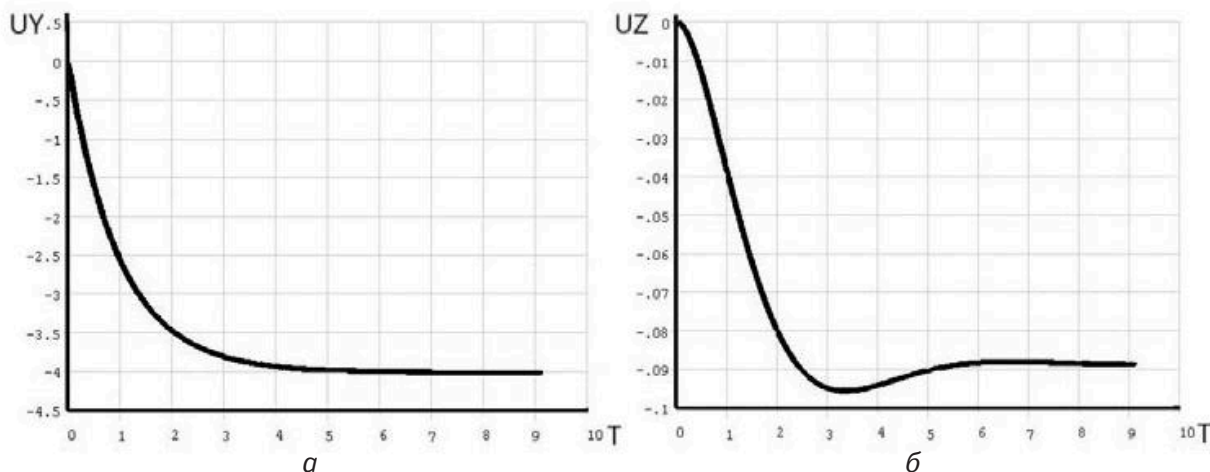


Рис. 4. Перемещения узлов конструкции, вызванные деформацией: *а* — максимальные вертикальные перемещения; *б* — максимальные горизонтальные перемещения

Из графиков перемещений видно, что деформация по вертикали, представленные на рис. 4, протекала плавно, кривая не имеет экстремумов и точек перегиба. Перемещения по горизонтали имеют характер затухающих колебаний, но по величине являются допустимыми, максимум $U_z = 0,095$ м. Максимальное эквивалентное напряжение по энергетической теории Губера — Мизеса [4] составило $\sigma = 89$ МПа. В конструкции используется сталь 40 [5], у которой модуль Юнга $E = 250$ МПа, коэффициент запаса $k = 2,8$ — следовательно, конструкция подъемно-транспортной системы обладает достаточной прочностью и жесткостью при выбранном законе изменения усилия домкрата. В перспективе возможно исследование процесса подъема для других законов изменения усилия домкрата и рассмотрение других силовых установок, таких как электроприводы.

Литература

- [1] HSL85007, 955 Ton, Hydraulic Strand Jack. URL: <https://www.enerpac.com/en-us/strand-jacks/strand-jacks/HSL85007> (accessed 29.04.2025).
- [2] Hydraulic Strand Jack Gantries. URL: <https://www.enerpac.com/en-us/heavy-lifting-technology/USStrandJackGantries> (accessed 16.05.2025).
- [3] Moaveni S. Finite element analysis. Theory and application with ANSYS. Ptentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999, 527 p.
- [4] Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов. Т. 2.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999, 592 с.
- [5] Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. *Материаловедение.* Москва, Машиностроение, 1986, 384 с.

Determination of strength characteristics of a lifting and transport system under static and dynamic loads

Belichenko Danil Alexandrovich

Gavryushin Sergey Sergeevich (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

The paper examines the strength characteristics of the B-SET lifting and transport system used for mounting column devices weighing up to 1600 tons and 50 m high. A kinematic analysis of the lifting of the column apparatus was carried out, and the law of change of the driving force in the jacks was selected. Dynamic calculation has shown that when using the chosen law, there are no fluctuations that can lead to loss of stability.

Keywords: static calculation, dynamic calculation, substructure method, lifting and transport system, ANSYS