

УДК 539.4

Расчет прочностных характеристик самомонтирующегося крана

Беличенко Данил Александрович belichenkoda@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе представлено исследование процесса подъема реактора гидрокрекинга с помощью самомонтируемой подъемно-транспортной системы ENERPAC B-SET. Проведен кинематический анализ для упрощенной модели системы: подобран закон изменения усилия в домкрате, рабочем приводе, обеспечивающий достаточно плавный подъем. Определено теоретическое минимальное время подъема. Проведен расчет динамической модели процесса подъема для несущей конструкции — при работе возникает затухающее колебание в горизонтальной плоскости, не ведущее к потере устойчивости. В дальнейшем можно использовать методiku создания динамической модели подъемной системы при автоматизации перемещения грузов при помощи кранов.

Ключевые слова: программа ANSYS Mechanical APDL, самомонтируемый кран, кантование, кинематический анализ, динамическая модель, ENERPAC B-SET

Введение. При реконструкции и строительстве предприятий нефтехимической отрасли требуется устанавливать ректификационные колонны и реакторы гидрокрекинга — колонные аппараты. Данное оборудование производится только на специализированных предприятиях в связи с высокими требованиями к качеству, поэтому транспортируется и устанавливается только в собранном виде. Габаритные размеры колонных аппаратов могут достигать 100 метров в высоту, 12 м в диаметре, при этом масса доходит до 2000 т [1]. Перевозят такое оборудование в горизонтальном положении, перевод в вертикальное положение и установку на фундамент осуществляют с помощью подъемно-транспортных систем, таких, как B-SET от компании ENERPAC.

В работе рассматривается процесс кантования колонного аппарата — процесс перевода из горизонтального положения в вертикальное. В качестве исходной модели взята установка реакторов гидрокрекинга на Ачинском НПЗ в 2014 году [2]. Масса колонного аппарата составляет 1600 т. Рассматривается один такт подъема — перемещение вершины груза на 480 мм. В подъемно-транспортной системе B-SET используются гидравлические домкраты, ввиду чего процесс подъема является дискретным: за цикл домкраты протягивают тросы, стопорный механизм перехватывает тросы, поршень совершает возвратное движение для следующей протяжки.

Одной из проблем кантования колонных аппаратов является деформация конструкции и возникновение колебаний, которые могут потенциально привести к потере устойчивости и обрушению конструкции. Целью работы является выявление колебаний в процессе подъема и оценка их влияния на систему.

Актуальность работы обусловлена потребностью в подъемно-транспортных системах для реконструкции и строительства предприятий нефтехимической отрасли. Системы, подобные ENERPAC B-SET применялись в 2019 году на предприятии АтырауНефтеМаш, в 2023 при строительстве Амурского ГПХ.

Описание системы. Подъемно-транспортная система ENERPAC B-SET представляет собой самомонтируемый козловой кран. Максимальная высота конструкции составляет 120 метров, в рамках данной работы рассматривается конфигурация высотой 112 м. В качестве опор служат 4 конструкции из сборных профилей, схожие по архитектуре с опорами башенных кранов. На вершине располагается пролетный мост — единое строение, по которому передвигается тележка с гидравлическими домкратами. Гидравлические домкраты служат рабочим приводом в системе ENERPAC B-SET. Общий вид системы во время работ по монтажу реакторов гидрокрекинга в Ачинске в 2014 году представлен на рис. 1.



Рис. 1. Подъемно-транспортная система ENERPAC B-SET во время монтажа реакторов гидрокрекинга в Ачинске 2014

Колонные аппараты, такие как реакторы гидрокрекинга и ректификационные колонны, производят только на специализированных предприятиях в связи с высокими требованиями к качеству: герметичности, прочности. По этой причине нет возможности собирать данное оборудование на месте строительства или реконструкции предприятий, в связи с чем возникает необходимость в организации транспортировки и монтажа такого негабаритного груза.

Во время кантования колонного аппарата, его перевода из горизонтального положения в вертикальное, вершина груза поднимается на тросах, в то время как основание перемещается на так называемом портале. Портал обеспечивает позиционирование вершины колонного аппарата строго под гидравлическими домкратами для сохранения устойчивости. В общем, процесс подъема является дискретным — он состоит из 120 циклов, каждый из которых содержит такт подъема на 480 мм и такт возврат поршня.

Кинематический анализ. Для определения колебаний, которые могут возникнуть в конструкции в процессе подъема, требуется сначала провести кинематический анализ — подобрать закон изменения усилия в домкратах, обеспечивающий достаточную плавность хода. Подъемно-транспортная система вместе с колонным аппаратом представлена в упрощенном виде — в схеме, показанной на рис. 2. В целом кинематический анализ проводится для исследования свойств не только для стационарных подвижных конструкций, но и для мобильных [3]. Колонный аппарат представлен как шатун с массой $m = 1,6 \cdot 10^6$ кг (центр масс в точке S_1), совершающий свободное движение. Два ползуна представляют собой портал (ползун А), совершающий движение по горизонтали, и закрепление вершины колонного аппарата на тросах (ползун В), свободно движущееся по вертикали. В схеме кинематического анализа так же показано усилие домкрата ($F_{уд}$), ускорение свободного падения ($\vec{g}$), направление вращения колонного аппарата ($\omega_{(1)}$).

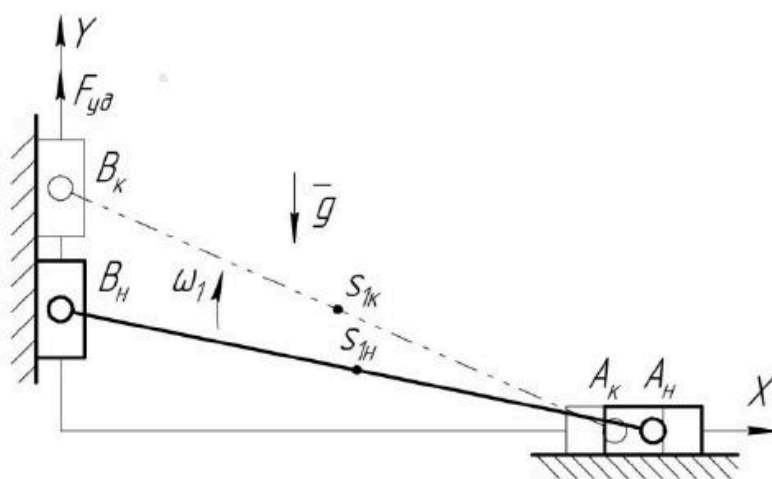


Рис. 2. Кинематический анализ: схема

При проведении кинематического анализа был подобран такой закон изменения усилия в домкрате, который обеспечивает безударный останов системы — обеспечивает плавность подъема. Для подобранного закона изменения усилия в домкрате было рассчитано теоретическое минимальное время подъема одного такта — оно составило $t = 9,12$ с. Был составлен график перемещения вершины колонного аппарата для теоретически минимального времени подъема, он представлен на рис. 3.

Описание конечно-элементной модели. Следующим шагом исследования процесса подъема колонного аппарата с помощью подъемно-транспортной системы является создание конечно-элементной модели конструкции и проведение динамического расчета. В качестве модели материала для всех элементов конструкции применялась сталь 40: модуль Юнга, или модуль упругости, $E = 200 \text{ ГПа}$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; плотность $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$. Так как система ENERPAC B-SET состоит из ферм, балок и различных профилей, ее удобно воспроизвести с помощью специальных балочных элементов Beam188 в программе ANSYS Mechanical APDL [4]. Для более точного повторения геометрии в конечно-элементной модели применялись сечения различной формы — прямоугольные сплошные, трубы, квадратные профили. Полученная модель подъемно-транспортной системы ENERPAC B-SET в программе ANSYS Mechanical APDL представлена на рис. 4.

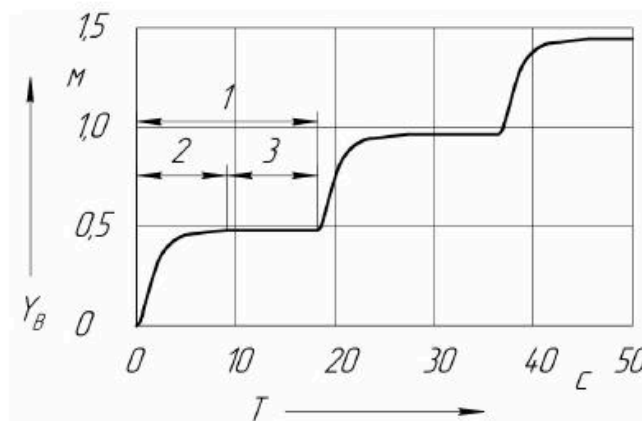


Рис. 3. Зависимость перемещения вершины колонного аппарата от времени: 1 — один цикл подъема; 2 — такт подъема; 3 — такт возврата поршня



Рис. 4. Пролетное строение крана — конечно-элементная модель

Помимо описания геометрии, для создания модели динамического расчета требуется задать граничные условия — назначить закрепления, приложить нагрузки. Для данной модели узлы (nodes) в основании были ограничены

в поступательных и вращательных перемещениях по всем степеням свободы. В качестве нагрузки было приложено изменяющееся во времени усилие в домкратах, назначенное распределенной силой $F_{(yд)}$, которая показана на рис. 5. Так же в модели учтена сила, возникающая ввиду отклонения вершины колонного аппарата в горизонтальном направлении относительно домкрата, она обозначена $F_{(z)}$ на рис. 5.

Анализ результатов. После проведения расчета в программе ANSYS Mechanical APDL были получены графики перемещения узлов в зависимости от времени, они представлены на рис. 6. Согласно полученным кривым, узел с максимальным вертикальным перемещением двигался плавно, без рывков — отсутствуют точки перегиба и экстремумы. Узел с максимальным перемещением по горизонтали имеет колебательное движение затухающего характера. Данное колебание, не является критическим — конструкция отклонилась до максимума, а затем сместилась обратно, что демонстрирует ее устойчивость [5, с. 366].

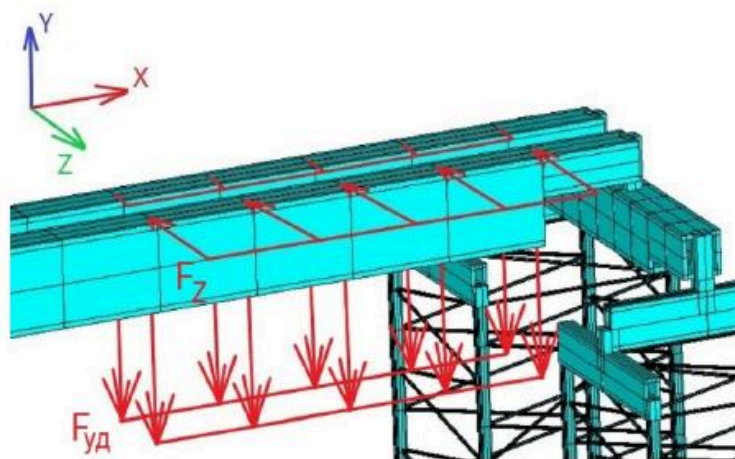


Рис. 5. $F_{(yд)}$ — усилие домкрата; $F_{(z)}$ — нагрузка, возникающая ввиду отклонения вершины колонного аппарата

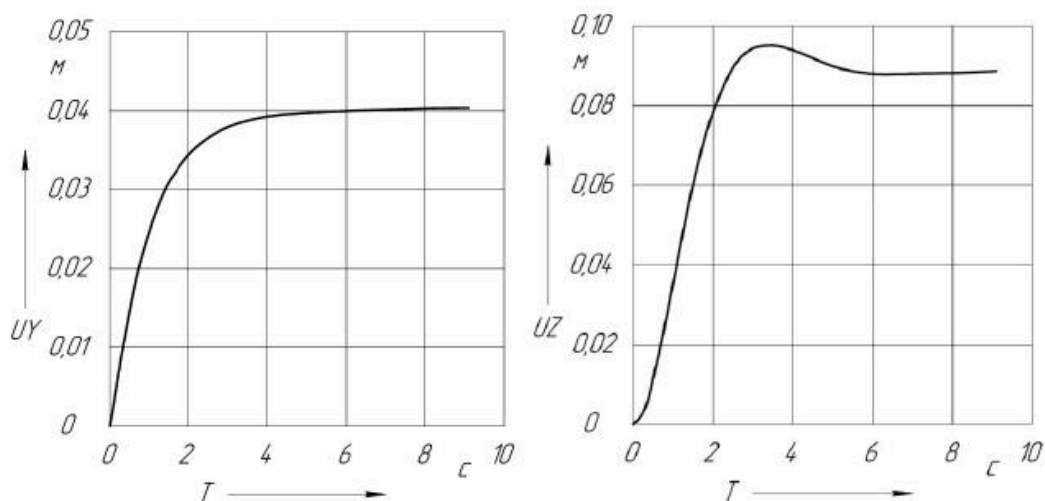


Рис. 6. Графики изменения координаты узлов с наибольшими перемещениями: слева — узла с наибольшим перемещением по вертикали; справа — узла с наибольшим перемещением по горизонтали

Закключение. Был проведен кинематический анализ процесса подъема колонного аппарата, подобран закон изменения усилия в домкрате, создана конечно-элементная модель системы и произведен расчет при динамической нагрузке. По результатам выявлено затухающее колебание в горизонтальной плоскости, которое не является критическим для устойчивости конструкции. Модель обладает рядом упрощений и не описывает полностью процесс подъема. В дальнейшем можно создать модель, учитывающую ветровую нагрузку, так же целесообразно рассмотреть другие законы изменения усилия в домкрате.

Литература

- [1] На Амурском ГХК приступили к монтажу ключевого технологического оборудования. URL: <https://yandex.ru/video/preview/4306273910047612043> (дата обращения 05.11.2025).
- [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, № 3. URL: <https://engjournal.bmstu.ru/articles/1223/1223.pdf> (дата обращения 05.11.2025).
- [3] Морозов Е.П., Комаров Д.А., Сащенко Д.В. Проектирование и первичный расчет многоцелевого мобильного робототехнического комплекса КДМЕ-23. *Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований. LXXII междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.* Новосибирск, ООО Сибирская академическая книга, 2024, с. 29–63. EDN: ZFDPHI
- [4] *ANSYS Mechanical APDL Verification Manual*. ANSYS. Inc., Canonsburg, 2025, 3372 p.
- [5] Валишвили Н.В., Гаврюшин С.С. *Сопротивление материалов и конструкций*. Москва, Юрайт, 2023, 429 с.

Calculation of the strength characteristics of a self-mounting crane

Belichenko Danil Alexandrovich

belichenkoda@student.bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The work is devoted to the study of the strength characteristics of the ENERPAC B-SET lifting and transport system. The article discusses the dynamic calculation of the structure in the process of tilting the column apparatus. The results revealed a damping oscillation that does not lead to a loss of stability. This research will help to further automate the lifting process and create a more cost-effective lifting system.

Keywords: *ANSYS Mechanical APDL program, self-mounted crane, tilting, kinematic analysis, dynamic model, ENERPAC B-SET*