

СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ ДЕТАЛИЗАЦИИ СЪЕМНОГО ГРУЗОЗАХВАТНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Синельщиков А.В.

Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, Астрахань

Ключевые слова: мостовой кран, съёмное грузозахватное приспособление, статический расчет, нелинейный расчет, детализация модели, конечные элементы, большие перемещения, объект использования атомной энергии.

Аннотация. В работе оценивается влияние уровня детализации конечно-элементной модели съёмного грузозахватного приспособления на точность статического расчета мостового крана. Исследование проведено на примере крана, транспортирующего контейнеры с отработавшим ядерным топливом. Сравниваются три модели съёмного грузозахватного приспособления: упрощенная (сосредоточенные массы), детализированная с жесткими связями и детализированная с шарнирами. Анализ показал, что для реалистичных моделей с гибкими и шарнирными элементами необходимо применять нелинейные методы расчета для получения достоверных результатов, что критически важно для обеспечения безопасности на объектах использования атомной энергии.

STATIC ANALYSIS OF LIFTING CRANES WITH DIFFERENT DETAILING LEVELS OF THE REMOVABLE SPREADER

Sinelshchikov A. V.

Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev, Astrakhan

Keywords: overhead crane, removable load-handling device, static analysis, nonlinear analysis, model detail level, finite elements, large displacements, nuclear facility.

Abstract. This paper assesses the influence of the finite element model detail level of a removable spreader (load-handling device) on the accuracy of an overhead crane's static analysis. The study uses the example of a crane transporting containers with spent nuclear fuel. Three spreader models are compared: a simplified model (lumped masses), a detailed model with rigid connections, and a detailed model with hinges. The analysis shows that for realistic models with flexible and hinged elements, nonlinear analysis methods must be applied to obtain reliable results, which is critical for ensuring safety at nuclear facilities.

Грузоподъемные краны являются неотъемлемой частью современной промышленности, от строительства до логистических центров. Наибольшее распространение получили мостовые краны благодаря их высокой производительности. Традиционные подходы к проектированию, регламентированные нормативными документами, сосредоточены на обеспечении прочности при штатных нагрузках [1]. Однако этого может быть недостаточно для кранов, работающих на опасных производственных объектах, таких как объекты использования атомной энергии (ОИАЭ).

Ключевая проблема заключается в нахождении оптимального баланса между затратами на разработку расчетно-динамической модели (РДМ), проведением расчетного анализа и точностью получаемых результатов [2]. Оптимальная модель должна достаточно точно отражать поведение крана, при

этом для детального анализа напряженно-деформированного состояния требуется, как правило, более точная модель [3].

Первым и важнейшим этапом проверки адекватности любой РДМ является статический расчет. Однако, как будет показано далее, в зависимости от детализации модели простой линейный статический расчет может не позволить корректно оценить качество РДМ. Целью данного исследования является оценка влияния уровня детализации конечно-элементной модели СГП типа траверсы на гибком подвесе на сходимость и точность результатов статического расчета мостового крана.

Объектом исследования выступает мостовой кран грузоподъемностью 130/32 тонны и пролетом 33,5 м, который применяется на ОИАЭ (рис. 1). В качестве съемного грузозахватного приспособления (СГП) рассматривается траверса на гибком подвесе массой 5,4 тонны, предназначенная для транспортировки контейнеров ТУК-13. Эти контейнеры используются для перемещения комплектов с отработавшими тепловыделяющими сборками массой 95,5 тонн. Таким образом, суммарная рабочая нагрузка (СГП + контейнер) составляет $Q_{\Sigma} = 100,9$ тонн.

Сравнительное исследование было проведено для трех вариантов РДМ мостового крана, которые отличаются степенью детализации СГП и способом приложения нагрузки.

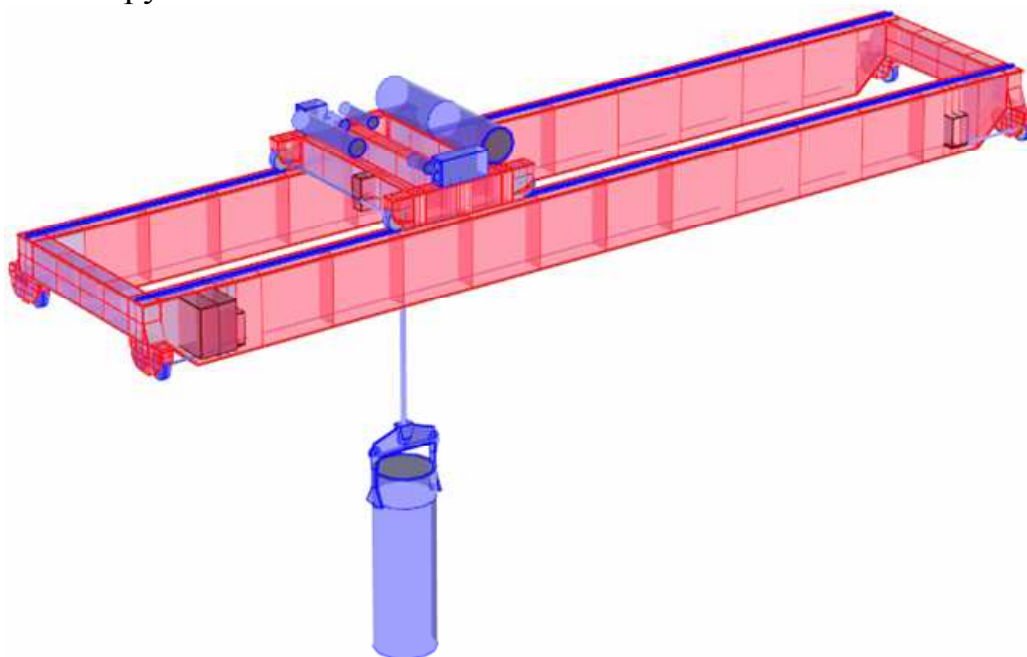


Рис. 1. РДМ мостового крана 130/32т-33,5м с траверсой контейнером ТК-13 массой $Q = 95,5$ т

Вариант I (Упрощенная модель). В данной модели рабочая нагрузка от СГП и контейнера моделируется сосредоточенными массами, приложенными к поперечным балкам тележки в четырех точках (рис. 2). СГП и рабочий груз как конечно-элементная подсистема в общую модель не включается. При расчете с полной нагрузкой сила в каждой из четырех точек составляет $|F| = 25,225$ тонн. Этот вариант является наиболее благоприятным для анализа методами строительной механики из-за жесткого соединения всех элементов.

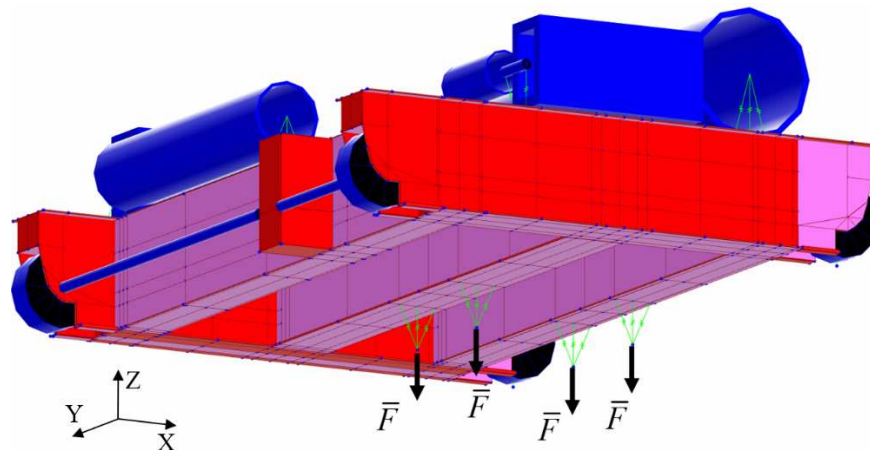


Рис. 2. Рабочая нагрузка задана сосредоточенными массами от СГП и контейнера ТУК-13, приведенными к поперечным балкам тележки в четырех точках

Вариант II (Детализированная модель с жесткими связями). В этой модели СГП и контейнер являются частью РДМ, отражая их конструктивные особенности и распределение масс. СГП соединен с грузовой тележкой посредством конечных элементов (КЭ) типа "нить", которые моделируют стальной канат. Включение груза на гибком подвесе позволяет точнее моделировать напряженно-деформированное состояние крана при исследовании режимов подъема. Все соединения внутри самой конструкции СГП в этом варианте считаются жесткими. Модель включает две условно разделенные части (кран и груз), соединенные гибкими элементами.

Вариант III (Детализированная модель с шарнирами). Этот вариант наиболее точно отражает реальную конструкцию. Он отличается от второго тем, что в РДМ введены шарнирные соединения в узлах крепления элементов СГП. Это моделирует рабочий груз как механизм, что вносит дополнительные нелинейности в систему.

Базовая РДМ мостового крана (без груза) состоит из 2094 узлов и 2398 КЭ (стержни, пластины, жесткие связи, объемные КЭ). Добавление детализированной модели СГП (варианты II и III) добавляет в систему 65 узлов и 49 КЭ.

Для каждого из трех вариантов РДМ были проведены расчеты тремя различными методами с целью последующего сравнительного анализа. С учетом особенностей второго и третьего вариантов, для их анализа применяются нелинейные численные методы: (А) – линейный статический расчет; (Б) – статический нелинейный деформационный расчет; (В) – статический нелинейный деформационный расчет с учетом больших перемещений [4].

Анализ Варианта I (Упрощенная модель). Для первого варианта, где нагрузка была задана сосредоточенными массами, все три метода расчета (линейный, нелинейный деформационный и нелинейный с учетом больших перемещений) продемонстрировали полное совпадение полученных значений. Это говорит о том, что для таких упрощенных моделей, где отсутствуют геометрические нелинейности (гибкие элементы, шарниры), применение более сложных нелинейных методов не является необходимым.

Анализ Варианта II (Детализированная модель с жесткими связями). Применение линейного статического расчета (А) для второго варианта оказалось

неэффективным. Наличие в модели гибких элементов (канатов) с низкой изгибной жесткостью привело к получению некорректных результатов с чрезмерной деформацией этих элементов.

В то же время, оба нелинейных метода (Б и В) дали схожие и адекватные результаты. Включение детализированной модели СГП привело к снижению расчетного прогиба главных балок крана (с 29,4 мм до 21,4 мм) по сравнению с вариантом I. Это объясняется тем, что значительная часть (около трети) общих вертикальных перемещений была обусловлена упругим растяжением канатного подвеса СГП, а не только прогибом балок.

Анализ Варианта III (Детализированная модель с шарнирами). Введение в модель шарнирных соединений еще более усложнило расчет. В этом случае адекватное решение было получено только с использованием нелинейного статического деформационного расчета (метод Б). Применение как линейного метода (А), так и нелинейного с учетом больших перемещений (В) не привело к получению удовлетворительных результатов. Моделирование шарниров позволило более реалистично описать поведение системы, частично компенсировав горизонтальное отклонение груза, которое наблюдалось в варианте II.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Линейный статический расчет применим только для предельно упрощенных моделей. Когда СГП моделируется сосредоточенными массами (вариант I), линейный расчет дает адекватные результаты, но при более детальном моделировании (варианты II и III) он непригоден.

2. Нелинейный статический расчет обязателен для моделей с гибкими элементами. Для моделей с канатным подвесом (вариант II), нелинейный деформационный расчет дает корректные результаты.

3. Модели с шарнирными соединениями требуют особого подхода. Введение шарниров (вариант III) требует применения нелинейного деформационного расчета, так как другие методы не дают адекватных результатов.

4. Детализация СГП напрямую влияет на общую деформацию крана. Моделирование СГП как полноценной части конструкции (варианты II и III) приводит к существенному изменению расчетных перемещений главных балок, что доказывает важность учета реальной конструкции СГП для получения точных результатов.

Таким образом, исследование демонстрирует критическую важность выбора правильного уровня детализации модели СГП и соответствующего ему метода расчета. Для реалистичных моделей необходим нелинейный деформационный расчет. Этот вывод имеет большое практическое значение для обеспечения требуемой точности и безопасности при проектировании и проведении поверочных расчетов мостовых кранов, особенно на объектах использования атомной энергии.

Дальнейшие исследования связаны с изучением изменения динамического портрета РДМ мостового крана на моделях с различной степенью детализации СГП.

Список литературы

1. Niu C.M., Zhang H. W., Ouyang H.A comprehensive dynamic model of electric overhead cranes and the lifting operations: text // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2012, vol. 226, no. 6, pp. 1484-1503. DOI: 10.1177/0954406211423586.
2. Синельщиков А.В., Панасенко Н.Н. Сравнительный анализ расчетно-динамических моделей портовых кранов на основе одно- и двумерных конечных элементов: текст // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2019. – № 2. – С. 127-144. – DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-127-144.
3. Fatehi M.H., Egtesad M., Amjadifard R. Modelling and Control of an Overhead Crane System with a Flexible Cable and Large Swing Angle: text // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 2014, vol. 33, no. 4, pp. 395-409. DOI: 10.1260/0263-0923.33.4.395.
4. Синельщиков А.В. Большие перемещения в задачах расчетного анализа грузоподъемных кранов: текст // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2007. – № 2(37). – С. 10-16.

Сведения об авторе:

Синельщиков Алексей Владимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Информационные технологии».