

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ РАБОТ

В. Т. Власов, к.т.н., доцент; И. Н. Музыка, старший преподаватель; М. И. Рыжков, младший научный сотрудник; В. А. Карабань, младший научный сотрудник  
ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

*Аннотация:* В статье представлено решение задачи оптимизации погрузочно-разгрузочных операций при складских, строительных и других направлениях применения грузоподъемных механизмов путем разработки компьютерной программы, позволяющей автоматизировать технологическую подготовку работ. Программное решение реализует алгоритм численного анализа рабочего процесса механизма подъема на примере мостового крана, в котором задаются массовые, геометрические, упругие, кинематические параметры. Созданная компьютерная программа позволяет изучать совместное влияние изменяющихся факторов, определять закономерности и фазы напряженного состояния каната при подъеме груза с визуализацией результата в виде анимации или графической зависимости. Применение разработанной программы сокращает время для принятия технических решений в конкретных условиях выполнения грузоподъемных работ и будет способствовать их безопасности при обеспечении высоких технико-экономических показателей.

*Ключевые слова:* грузоподъемные операции, механизм подъема, алгоритм численного анализа, компьютерная программа, анимационная и графическая демонстрация.

## DEVELOPMENT OF A COMPUTER PROGRAM FOR OPTIMIZING CONSTRUCTION LOADING OPERATIONS

Vlasov V. T., Muzyka I. N., Ryzhkov M. I., Karaban V. A.  
Priazovsky State Technical University, Russian Federation, Mariupol

*Abstract.* The article presents a solution to the problem of optimizing loading and unloading operations in warehouse, construction and other areas of application of lifting mechanisms. It will achieve by developing a computer program that allows automating the technological preparation of work. The software solution implements an algorithm for numerical analysis of the working process of the lifting mechanism using the example of an overhead crane, in which mass, geometric, elastic, and kinematic parameters are specified. The created computer program allows studying the combined influence of changing factors, determining patterns and phases of the stress state of the rope when lifting a load with visualization of the result in the form of animation or graphical dependence. The use of the developed program reduces the time for making technical decisions in specific conditions of lifting operations. It will contribute to their safety while ensuring high technical and economic indicators.

*Key words:* lifting operations, lifting mechanism, numerical analysis algorithm, computer program, animation and graphic demonstration.



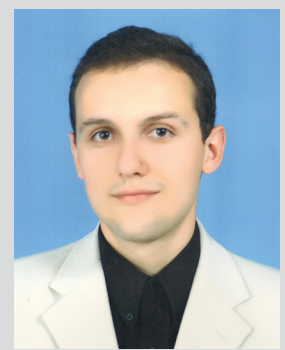
**Власов**  
**Валерий Тимофеевич**



**Музыка**  
**Инна Николаевна**



**Рыжков**  
**Максим Игоревич**



**Карабань**  
**Вячеслав Александрович**

## ВВЕДЕНИЕ

Грузоподъемные краны являются неотъемлемой частью технологического комплекса (например, в производственных цехах и строительных площадках) или транспортно-перегрузочного потока (на контейнерных терминалах, складах продукции) и оказывают существенное влияние на производительность и эффективность функционирования транспортных средств и технологического оборудования в целом [2]. При этом наиболее широкое применение имеют краны с гибким подвесом груза на канатах. Краны с жестким подвесом груза, ограниченные, в основном, некоторыми типами металлургических кранов, а также козловыми кранами для работы на железнодорожных станциях и в портах, кранами-штабелерами [3, 6, 8]. Они обладают рядом недостатков – значительно большим весом и стоимостью, высокой динамической нагруженностью. Кроме того, жесткий подвес груза применить зачастую не представляется возможным.

Применение кранов с гибким подвесом, особенно при их автоматизации, позволяет качественно повысить эффективность производственных и складских работ, однако гибкие подвесы имеют ряд своих ограничений, связанных прежде всего с нагрузочной способностью или рядом сторонних факторов, возникающих в процессе эксплуатации [1, 4]. Поэтому в рамках создания современных технологических комплексов требуется проектирование конкурентоспособных машин в кратчайшие сроки, где нередко встречаются ситуации, когда проектировщик ограничен во времени, а также отсутствует возможность изготовления и испытания опытного образца в реальных условиях эксплуатации. Конструктор должен быть уверен, что произведенные им расчеты учитывают процессы, протекающие при погрузочно-разгрузочных работах.

Важным этапом является разработка математических моделей, проверка их соответствия реальным условиям работы крана и реализация в виде компьютерных программ для получения требуемых показателей в минимально короткие сроки.

## ЦЕЛЬ

Целью настоящей работы являлось создание компьютерной программы, позволяющей определять значения механических напряжений в грузо-

подъемном канате, в зависимости от типа механизма подъема, выбранного типа каната и координат точек приложения нагрузок на опорную поверхность и мостовую балку крана для автоматизации технологической подготовки, и повышения эффективности грузоподъемных операций.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследований был выбран мостовой однобалочный кран, работающий на складе строительных материалов. Мост крана выполнен в виде двутавровой балки, опирающейся на две концевые балки, подвешенные к ходовым кареткам, которые перемещаются по подкрановым направляющим. Крюковая тележка имеет один механизм подъема.

Для создания компьютерной программы была разработана схема грузоподъемной системы и алгоритм расчета с использованием особой формы дифференциальных уравнений, позволяющих установить связь между активными силами и реакциями связей без определения деформаций [5, 7]. Программный алгоритм моделирования грузоподъемного процесса реализован с учетом массовых, геометрических, упругих, кинематических параметров и приведен в виде блок-схемы (рис. 1).

Разработка программы осуществлялась на языке программирования JavaScript с использованием платформы JavaFX 8, шаблон проектирования MVC (Модель – Представление – Контроллер) [9, 10]. Численный анализ задачи в программе реализован следующим образом: в специализированное поле ввода данных задаются величины массы каната ( $m_k$ ) и его длины ( $L$ ), а также площадь поперечного сечения каната ( $S$ ), модуль упругости материала, из которого изготовлен канат ( $E_k$ ), допускаемые напряжения ( $[\sigma]$ ) и коэффициент запаса прочности ( $K$ ).

Параметры мостовой балки и опорной поверхности, на которой расположен груз, определяются следующими данными: длиной балки и платформы ( $l_0, l_2$ ); осевыми моментами инерции сечений соответствующих балок ( $I_0, I_2$ ), модулем упругости ( $E_0, E_2$ ), координатами точек приложения нагрузок ( $b_0 = \beta_0 l_0, b_2 = \beta_2 l_2$ , где  $0 < \beta_0 \leq 0,5, 0 < \beta_2 \leq 0,5$ ). В программе заложено условие, которое учитывает величину скорости подъема груза ( $V_0$ ) в момент отрыва от опорной поверхности и величину ускорения верхнего конца каната ( $\alpha$ ).

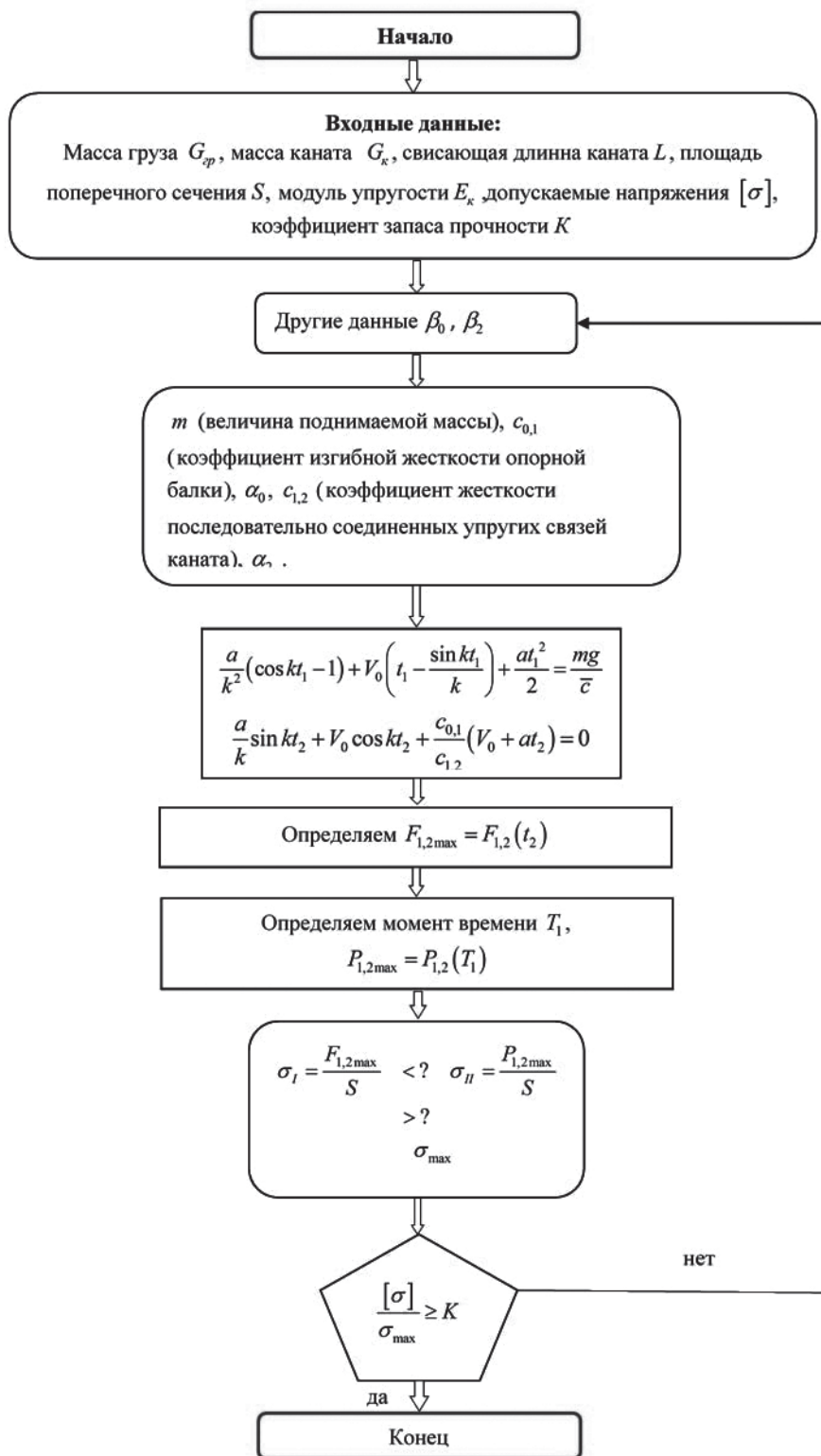


Рис. 1. Блок-схема алгоритма моделирования грузоподъемной системы

Программой определяются значения динамических напряжений от массы поднимаемого груза, учитывая заданные значения координат точек приложения нагрузок на мостовую балку и опорную поверхность ( $A_0$  и  $A_2$ ), а также значения коэффициентов изгибных жесткостей ( $c_{0,1}, c_{1,2}$ ).

Максимальные значения сил ( $F_{1,2}, P_{1,2}$ ), возникающих в канате, определяются подстановкой величин моментов времени ( $t_2$  и  $t_1$ ). Затем

программой рассчитываются значения величин нормальных напряжений ( $\sigma_I$  и  $\sigma_{II}$ ), где производится выбор большего из них ( $\sigma_{max}$ ). Проанализировав полученные данные, программа генерирует результат в виде анимационного представления, по результатам которого делается вывод о соответствии заданному запасу прочности ( $[\sigma] \geq K$ ) грузоподъемного каната. В  $\sigma_{max}$  случае неудовлетворительного результата оператором изменяются входные данные и расчет производится заново до получения положительного результата.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Согласно принятой расчетной схеме в программе реализована модель механической системы мостового крана с «идеальным» бесступенчатым приводом механизма подъема без учета сопутствующих динамических факторов, которые встречаются в процессе эксплуатации мостовых кранов в реальных условиях.

Исходя из условий расчетного алгоритма, в программе создано три класса модели для описания свойств груза (Freight.java), каната (Rope.java), а также для описания свойств грузоподъемной балки и опорной плоскости общего класса (Balk.java).

Для создания традиционного интерфейса программы использовался файл разметки gore-strength-view.fxml (рис. 2). Данный файл содержит поля для ввода исходных параметров, а также поля ввода значений справочных данных, которые сохраняются в виде зависимостей, необходимых для реализации работы алгоритма.

Координаты расположения груза в пространстве относительно пролета мостовой балки и опорной поверхности регулируются подвижными маркерами, расположенными во «входных данных» диалогового окна.

Для представления результата использовался файл разметки gore-strength-view.fxml., а редактирование представления выполнялось в Scene Builder. В нижней части диалогового окна программы создана активная клавиша «Рассчитать», с помощью которой осуществляется запуск расчета. Данное представление связано через параметр

Прочность каната подъемного устройства

| Входные данные  |   | Справочные данные                                 |   |
|---|---|---|---|
| Масса груза, кг   | <input type="text" value="1000"/>                 | Площадь сечения каната, м <sup>2</sup>            | <input type="text" value="0.000143"/>     |
| Масса каната, кг  | <input type="text" value="21"/>                   | Скорость груза в момент отрыва, м/с               | <input type="text" value="0.1"/>          |
| Свисающая длина каната, м   | <input type="text" value="3"/>                    | Ускорение верхнего конца каната, м/с <sup>2</sup> | <input type="text" value="0.1"/>          |
| Длина верхней балки, м  | <input type="text" value="6"/>                    | Модуль упругости каната, Н                        | <input type="text" value="200000000000"/> |
| Отношение расстояния тележки к общей длине пролета                    | <input type="range" value="0.1 0.2 0.3 0.4 0.5"/> | Осевой момент инерции сечений верхней балки       | <input type="text" value="0.00000337"/>   |
| Длина нижней балки, м   | <input type="text" value="5"/>                    | Модуль упругости верхней балки, Н                 | <input type="text" value="200000000000"/> |
| Отношение расстояния координаты оси подвеса груза к общей длине опоры | <input type="range" value="0.1 0.2 0.3 0.4 0.5"/> | Осевой момент инерции сечений нижней балки        | <input type="text" value="0.009375"/>     |
| Коэффициент запаса прочности  | <input type="text" value="2"/>                    | Модуль упругости нижней балки, Н                  | <input type="text" value="200000000000"/> |
| Допускаемые напряжения, Н   | <input type="text" value="100000000"/>            |   |   |

Рис. 2. Интерфейс диалогового окна программы

fx:controller с контроллером RopeStrengthController.java, который содержит логику расчетов прочности троса.

По нажатию на клавишу «Рассчитать» происходит вызов контроллера (а именно метода контроллера, завязаного на данную клавишу), который последовательно осуществляет:

1. Проверку заполнения всех необходимых полей ввода, а также верность формата введенных данных.
2. Создает объект класса Freight, объект класса Rope, и два объекта класса Balk (один является грузоподъемной балкой, второй – опорной плоскостью). Поля классов заполняются данными из полей ввода и полей справочной информации с помощью соответствующих конструкторов классов. Доступ к полям ввода и справочной информации осуществляется с помощью аннотации FXML. Со стороны файла разметки каждому полю ввода присвоен соответствующий fx:id.
3. Производит необходимые расчеты по нахождению максимальных напряжений.
4. Дополнительно сохраняет информацию о значении максимального напряжения и текущем положении тележки или оси груза для дальнейшего построения графиков зависимостей на основе этой информации.
5. Вызывает контроллер для анимации использования конкретного каната при используемых условиях Animationcontroller.java (при этом создается дочернее окно childStage, для демонстрации анимации в новом окне, а также передаются в контроллер значения расчетного напряжения, допускаемого напряжения, значение коэффициента запаса прочности).

Контроллер анимации содержит логику для трех вариантов (рис. 3) в зависимости от входных параметров. Анимация транслируется в течение 3 секунд. Величина задержки перед началом анимации не превышает одной секунды.

Для отображения базовых элементов анимации использовался файл разметки rope-strength-

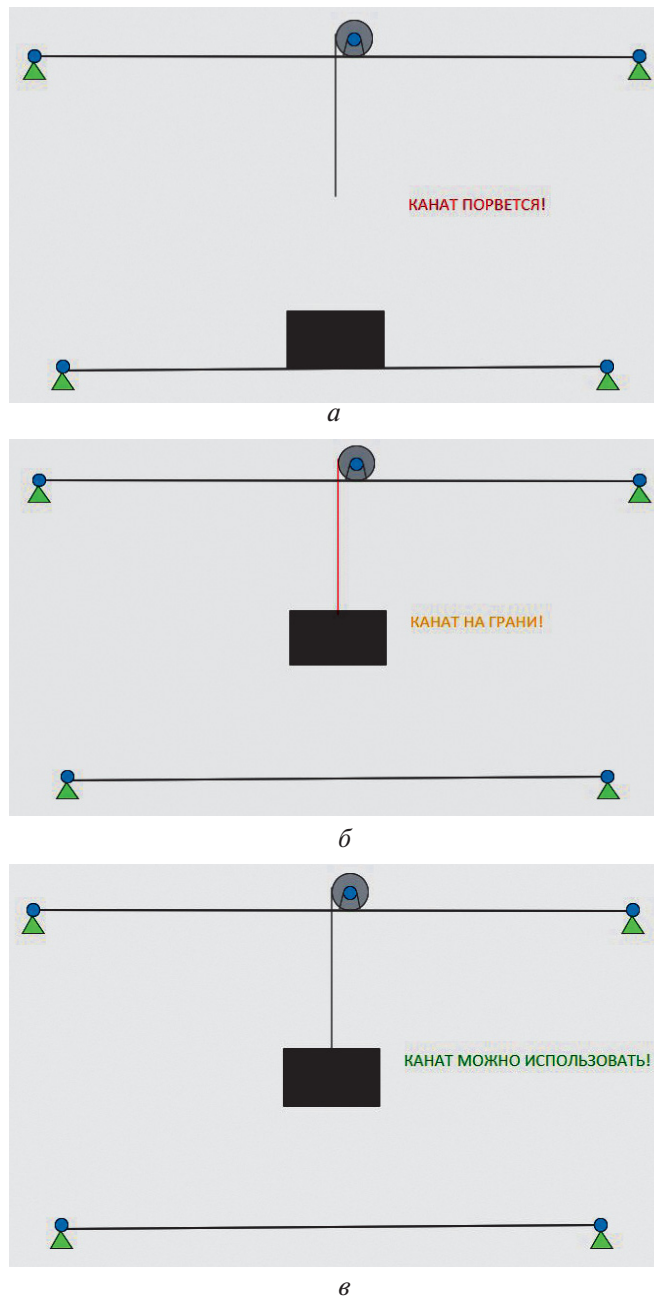


Рис. 3. Анимационная демонстрация допустимой нагрузки на грузовой канат:

- а – демонстрация обрыва каната,  
 б – демонстрация предельно-допустимого напряжения для каната,  
 в – демонстрация нормальной эксплуатации каната.

animation.fxml, связанный через параметр fx:controller с Animationcontroller.java.

В программе реализована функция создания графиков зависимостей напряжения от координат точек приложения нагрузок на мостовую балку и опорную поверхность (рис. 4). Для этого были добавлены соответствующие ячейки в файл разметки rope-strength-view.fxml. При каждом нажатии на клавишу «Рассчитать» запускается работа расчетного алгоритма, а в соответствующем внутреннем реестре сохраняется информация о текущем значении напряжения в канате в зависимости от конкретных введенных данных. Для запуска процесса создания графиков

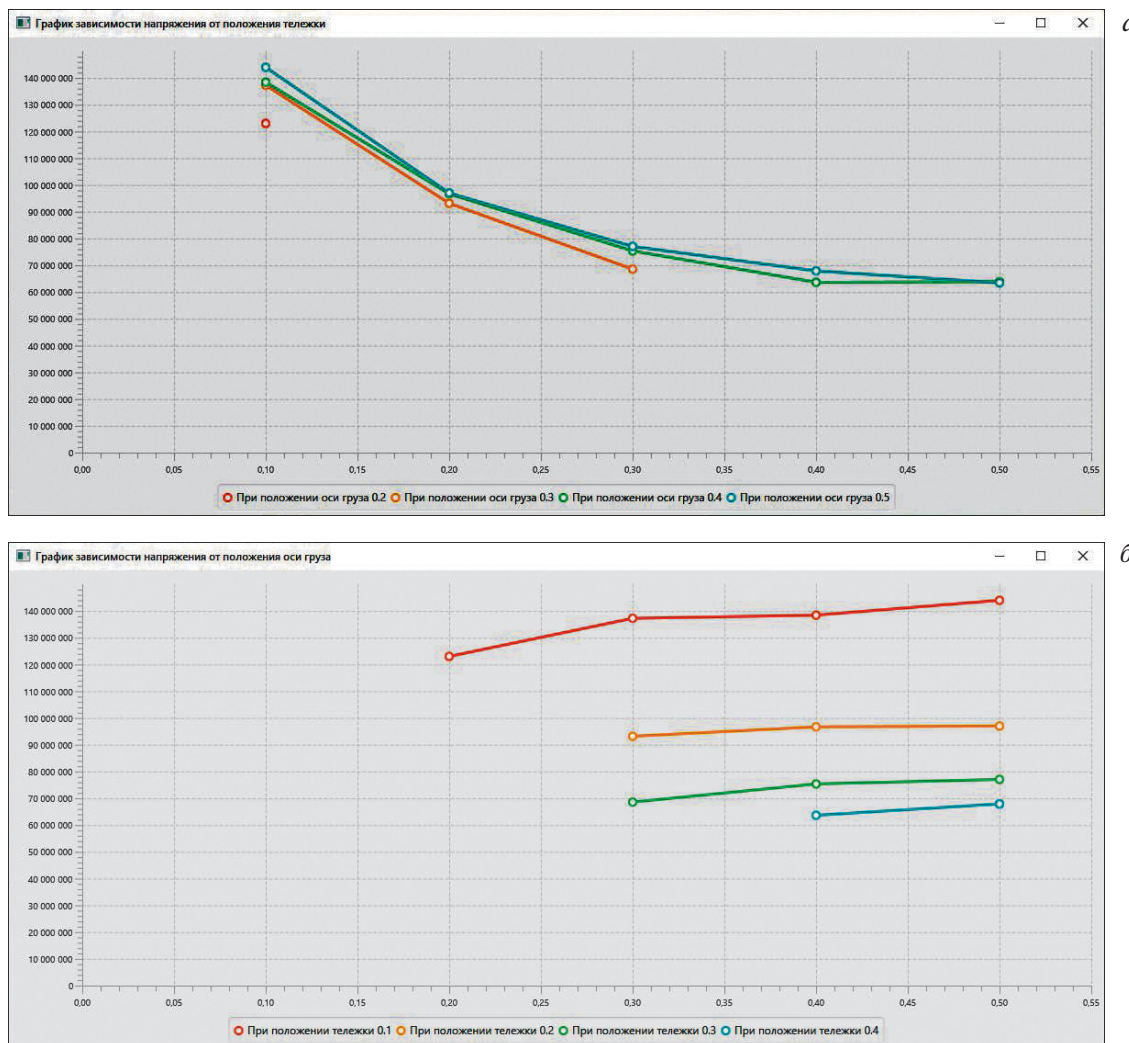


Рис. 4. Интерфейс диалогового окна программы для демонстрации графических зависимостей напряжения в грузовом канате:

а – от координаты расположения грузовой тележки мостового крана; б – от координат расположения груза на опорной поверхности.

зависимости необходимо проработать определенное количество расчетных случаев и ввести как минимум несколько отличных друг от друга координат расположения тележки и расположения оси груза. По завершении работы программы по расчету всех необходимых расчетных случаев, необходимо нажать на клавишу в меню программы «Построить графики зависимости напряжения от положения тележки» или на клавишу «Построить графики зависимости напряжения от положения оси груза». В этот момент активируются соответствующие методы класса-контроллера `RopeStrengthController.java` для создания графиков типа `LineChart` и дочернего диалогового окна для отображения соответствующих графиков.

Запуск приложения осуществляется через класс `RopeStrengthApplication.java`, который является расширением класса `Application`.

Таим образом в классе `RopeStrengthApplication.java` создается базовое диалоговое окно, в которое загружается файл представление `rope-strength-view.fxml`.

Разработанная программа позволяет ее применять для решения конкретных технологических задач, создавать и использовать базу данных имеющейся в наличии грузоподъемной оснастки, автоматизировать ее выбор применительно к конкретным условиям осуществления грузоподъемных работ.

Возможности программы по построению графических зависимостей позволяют ее применять для исследовательских целей и задач оптимизации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Автоматизация расчетов с помощью разработанной компьютерной программы значительно сокращает время при выборе необходимых параметров грузоподъемных канатов для обеспечения безопасного выполнения грузоподъемных работ на строительных площадках, складах и других объектах, связанных с необходимостью подъема груза крановыми механизмами.

2. Визуализация результатов расчета и возможность построения графических зависимостей позволяет достоверно анализировать информацию о напряженном состоянии в грузоподъемном канате при изменении влияющих на него параметров.

## Список литературы

1. Луцко, Т. В. Исследование влияния напряженно-деформированного состояния телескопической стрелы тросового крана-манипулятора на

- точность позиционирования груза / Т. В. Луцко // *Строитель Донбасса* – 2022. – № 2 (19). – С. 20-25.
2. Перельмутер, М. М. Оптимальные законы движения механизмов с упругим звеном / М. М. Перельмутер // *Машиноведение*. 1968. – № 5. – С. 17-22.
  3. Соколов, Б. И. Оптимальный разгон висящего груза при ограниченной скорости и ускорении точки подвеса / Б. И. Соколов // *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*. 1977. – № 6. – С. 38-43.
  4. Богорад, А. А. Грузоподъемные краны строительных предприятий / А. А. Богорад, А. Т. Загузин // Москва. «Высшая школа». 1990. – 271 с.
  5. Кожевников, С. Н. Динамика машин с упругими звеньями / С. Н. Кожевников // – К. : Изд-во АН УССР, 1961. – 160 с.
  6. Спицына, Д. Н. Динамика кранов с жестким подвесом груза / Д. Н. Спицына, К. В. Поликарпов // Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 185 с.
  7. Круглов, С. П. Адаптивное управление перемещением груза мостовым краном с идентификационным алгоритмом / С. П. Круглов, С. В. Ковышин, И. Е. Ведерников // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2017 – № 4 – С. 114-122
  8. Александров, М. П. Справочник по кранам / Под. общ. ред. М. М. Гохберга // – М.: Машиностроение, Т. 2, 1988. – 559 с.
  9. Солодушкин, С. В. Разработка программных комплексов на языке JavaScript / С. В. Солодушкин, И. Ф. Юманова // Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 132 с.
  10. Попов, С. Е. JavaScript. Основы программирования: учебно-методическое пособие / С. Е. Попов // – Елец: Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2020. – 116 с.