

УДК (UDC) 629.7.454.2

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА  
ПОДЪЕМА КРАНА

## THEORETICAL JUSTIFICATION AND MODELING OF CRANE LIFTING DEVICE

Сладкова Л.А., Горелова М.В., Ногин Р.О.  
Sladkova L.A., Gorelova M.V., Nogin R.O.Российский университет транспорта (Москва, Россия)  
Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье предлагается разработка программы работы системы безопасности, контролирующей влияние ненормируемых внешних факторов, для безаварийной технической установки подъема опрокинутого крана в условиях экстремальной ситуации (работе в удалении от стационарных баз). Показано, что для предотвращения опрокидывания поднимающегося крана на нем целесообразно установить ограничитель грузоподъемности и приборы, контролирующие безопасность работы крана, которые в процессе работы должны находиться во взаимодействии. Разработанная методика моделирования устройства подъема крана позволила разработать программный продукт на языке программирования Pascal. Реализация системы безопасности разрабатываемой установки, визуализация, а также общая программа для программируемого логического контроллера была произведена при помощи программного комплекса CodeSys 3. Предлагаемая методика моделирования устройства подъема крана подтверждена визуализации общей программы для программируемого логического контроллера с использованием различных языков программирования.

**Ключевые слова:** устройство подъема крана, стреловой самоходный кран, моделирование, визуализация, программное обеспечение.

**Дата принятия к публикации:** 04.09.2020  
**Дата публикации:** 25.09.2020

**Сведения об авторах:**

**Сладкова Любовь Александровна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», e-mail: rich.cat2012@yandex.ru.

**Горелова Мария Витальевна** – магистр кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», e-mail: marusalen@mail.ru.

**Ногин Роман Олегович** – заместитель по учебной и научной работе начальника Военной Академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, генерал-майор.

**Abstract.** The article proposes the development of a security system program that controls the influence of non-regulatory external factors for the accident-free technical installation of the overturned crane in an extreme situation (working away from stationary bases). It is shown that it is advisable to install a crane to prevent the rollover of the lifting crane: the loader and the devices that control the safety of the crane, which in the process of operation should be in cooperation. The developed technique of modeling the crane lift device allowed to develop a software product in the programming language Pascal. The security system of the installation being developed, visualization, and a common program for the programmable logical controller were carried out with the help of the CodeSys 3 software complex. The proposed simulation technique for a crane lift device is confirmed by the visualization of a common program for a programmable logical controller using different programming languages.

**Keywords:** crane lift device, mobile crane, simulation, visualization, software.

**Date of acceptance for publication:** 04.09.2020  
**Date of publication:** 25.09.2020

**Authors' information:**

**Lubov A. Sladkova** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department “Ground transportation and technological means” at Russian University of Transport, e-mail: rich.cat2012@yandex.ru.

**Maria V. Gorelova** – Master of the Department “Ground transportation and technological means” at Russian University of Transport, e-mail: marusalen@mail.ru.

**Roman O. Nogin** – Deputy Chief on Educational and Scientific Work at the Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great, Major-General

## 1. Введение

Согласно статистическим данным Ростехнадзора России производственный травматизм и аварийность на грузоподъемных сооружениях занимают третье место (после травматизма в угольной и горнорудной промышленности) [1], причем около половины всех аварий стреловых самоходных кранов связано с их опрокидыванием [2 - 4]. Это влечет серьезные экономические последствия: необходимы дополнительные затраты для доставки техники, которая осуществит подъем упавшего крана, и как следствие, дополнительные затраты на топливо, смазочные материалы, человеческие ресурсы. Целесообразность работ по подъему упавшего крана оценивается по степени повреждения упавшей техники: возможности ее восстановления с целью дальнейшей эксплуатации, либо кран подлежит списанию и дальнейшей утилизации. Нередко работы по подъему упавшего крана заканчиваются падением техники, осуществляющего указанную операцию. Как правило, работы по подъему упавших кранов опираются на опыт и мастерство крановщиков. Теоретические исследования в этом направлении в литературе отсутствуют.

Разработка системы безопасности, контролирующей влияние ненормируемых внешних факторов, для безаварийной технической установки подъема опрокинутого крана является актуальной задачей, особенно в условиях экстремальной ситуации (работе в отдаленных условиях).

## 2. Устройство подъема крана

Анализ современных технических решений [4], проведенных по материалам патентных исследований, показал, что существующие методы подъема кранов при потере их устойчивости имеют определенные недостатки связанные:

- с невозможностью регулирования усилий в процессе подъема крана.
- с перекосом груза со смещенным центром тяжести при его подъеме или опускании.

Для разработки подъемного устройства необходимо исходить из условия исключения возможности его аварий, связанных с воздействием сильных порывов ветра [5], весом поднимаемого крана, его положением. При создании устройства были использованы принципы:

- преобразования движения (при опускании-подъеме длинномерных используется специальный рычаг, приводящий их в движение в момент необходимости) [6];
- использования центробежной силы (предотвращение смещения центра тяжести поднимаемого и поднимающего устройства из-за внедрения новых элементов в конструкцию [7]);
- использования гидростатического эффекта в силовых механизмах для реализации больших усилий при малых размерах устройств.

Для предотвращения опрокидывания поднимающего крана на нем целесообразно установить:

- ограничитель грузоподъемности (при перегрузке крана, ограничитель выдает запрет на использование крана при превышенной массе груза);
- приборы, контролирующие безопасность работы башенного крана (датчик, извещающий о наличии препятствий, возникающих рядом с краном; анемометр, контролирующий силу ветра; датчики обрыва каната и контроля угла наклона крана во время эксплуатации). В случае срабатывания одного из датчиков система блокирует работу крана.

Принятые типы датчиков позволят пошагово контролировать подъем крана за счет автоматизированного регулирования вышеуказанных параметров (рис. 1).

На рис. 2 представлена схема установки, осуществляющая подъем крана из состояния опрокидывания.

Установка располагается на расстоянии  $a$  от упавшего объекта. Подъем опрокинутого автокрана осуществляется силой  $F$ , которая при самом благоприятном варианте подъема должна быть направлена перпендикулярно стреле опрокинутого автокрана. Таким образом, создается минимальное плечо для осу-



Рис.1. Взаимодействие датчиков безопасности при подъеме крана

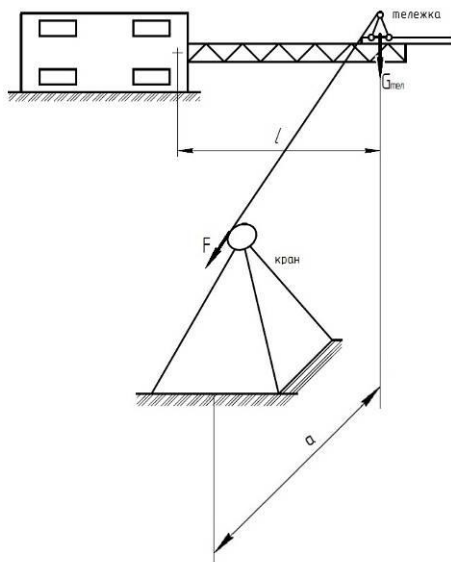


Рис.2. Схема установки

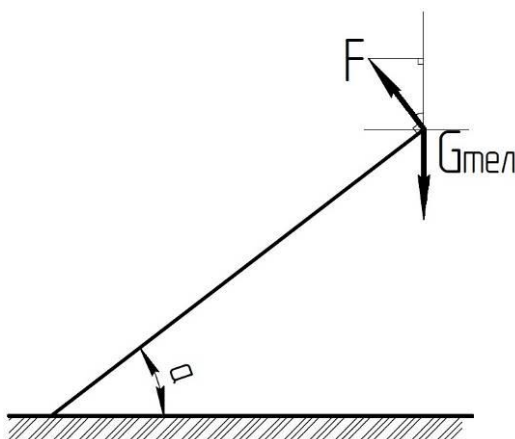


Рис.3. Силы, действующие на стрелу поднимаемого объекта

ществления подъема тела. В процессе подъема крана изменяется угол наклона стрелы поднимаемой техники относительно гори-

зонта (угол  $\alpha$ ), а следовательно, исходя из выше указанного условия, изменяется угол действия силы  $F$  относительно вертикальной оси (рис. 3). При этом необходимо, чтобы сила была направлена перпендикулярно стреле крана [8].

### 3. Методика моделирования устройства и программа подъема крана

Со стороны тележки, которая расположена на расстоянии  $l$  от центра масс упавшего автокрана, вертикально вниз действует сила тяжести  $G_{мел}$ .

Условие устойчивой работы системы, представленной на рис. 3, является равновесным, т.е. используя принцип Даламбера, получим:

$$F \cos \alpha - G - G_{мел} = 0, \quad (1)$$

где  $G$  – сила тяжести поднимаемого объекта.

Расстояние  $a$  между поднимаемым объектом и осью вращения можно определять расчетным путем. Наиболее точное значение указанного параметра, а также значения угла наклона, веса груза можно получить методом тензометрирования, используя для этой цели различные датчики [9]:

- оптические (DS500) или ультразвуковые (UM30) датчики расстояния;
- датчики наклона;
- датчики веса (3143).

Выбранные типы датчиков позволяют пошагово контролировать подъем крана за счет автоматизированного регулирования вышеуказанных параметров. Датчики рекомендуется размещать на рабочей тележке. Из сказанного следует, что для рассматриваемого устройства подъема крана можно составить математическую модель [10].

### 4. Методики моделирования устройства и программа подъема крана

Момент вращения для реализации усилия подъема определим из условия равновесия системы в произвольный момент времени  $t$  [11]:

$$M_{вр} = F \cos \alpha (a - x) + F \sin \alpha (a - x) - mg(a - x) - G_{мел} (a - x), \quad (2)$$

где  $x$  – расстояние, на которое следует переместить тележку с целью сохранения центра тяжести неизменным.

Так как момент на лебедке  $M_{леб}$  является постоянной величиной, то:

$$M_{вр} = M_{леб}. \quad (3)$$

Используя выражения (2) и (3), определяем величину смещения тележки  $x$ :

$$x = a - \frac{M_{леб} - M_{вр}}{F \cos \alpha + F \sin \alpha - mg - G_{мел}}. \quad (4)$$

Таким образом, исходными параметрами системы являются:

- момент на лебедке  $M_{леб}$ ;
- расстояние до оси вращения  $a$ ;
- масса тележки  $m_{мел}$ .

Операция подъема крана является циклической процедурой, которую необходимо реализовать при программировании как цикл. Исходя из этого, был выбран цикл с предусловием While, т.е. цикл, который выполняется пока истинно некоторое условие, указанное перед его началом. В качестве начального условия было выбрано значение кнопки остановки Stop, которая является логической переменной. Например, при значении Stop=0 (значение false) цикл прекращает выполняться.

Во время выполнения цикла с датчиков считываются значения силы подъема  $F$  и угла наклона  $\alpha$ . Эти значения попадают на дискретные входы программируемого логического контроллера.

Расчет параметра  $x$ , а, следовательно, и перемещения тележки осуществляется при условии выполнения условия  $M_{вр} < M_{леб}$ , т.е. момент, образованный взаимодействием всех действующих сил не должен превышать момент на лебедке.

## 5. Программа подъема крана

Пример реализации расчетной части программы был реализован на языке программирования Pascal. Все величины, считываемые с датчиков, в программе реализованы через ручной ввод. Алгоритм расчета приведен ниже.

*Program* подъема крана.

*Uses* Crt;

*Var* (ввод величин, которые являются переменными в процессе расчета: расстояние  $a$ , перемещение  $x$ , сила  $F$ , угол  $\alpha$  и др.

*Const* (Ввод величин, являющихся неизменными в процессе подъема крана).

*Ввод начальных условий.*

*Расчет величин:* расстояния  $a$ , перемещения  $x$ , силы  $F$ , угла  $\alpha$ , момента вращения и др.

*Введение команды цикла.*

*Вывод на печать или визуализацию.*

*end.*

## 6. Программа логического контроллера

Реализация системы безопасности разрабатываемой установки, визуализация, а также общая программа для программируемого логического контроллера была произведена при помощи программного комплекса CodeSys. Создание программы осуществлялась на двух языках реализации:

- непрерывные функциональные схемы (CFC);

- язык программирования (ST).

Реализация основной программы была произведена на языке CFC (рис. 4).

Чтобы программа не содержала множество переменных и не была сложна для восприятия, были введены функциональные блоки, то есть подпрограммы, которые вынесены отдельно. Функциональными блоками являются (рис. 4):

- FB1. Подпрограмма, в которой реализована безопасность устройства;

- FB2. Подпрограмма, в которой происходит расчет параметров перемещения;

- FB3. Подпрограмма, которая отвечает за перемещение тележки.

Запуск программы осуществляется от кнопки Push, а также при срабатывании функционального блока FB1. Таким образом, при попадании логической единицы на входы блока AND происходит запуск блока motor, который является входным сигналом для блоков FB2 и FB3.



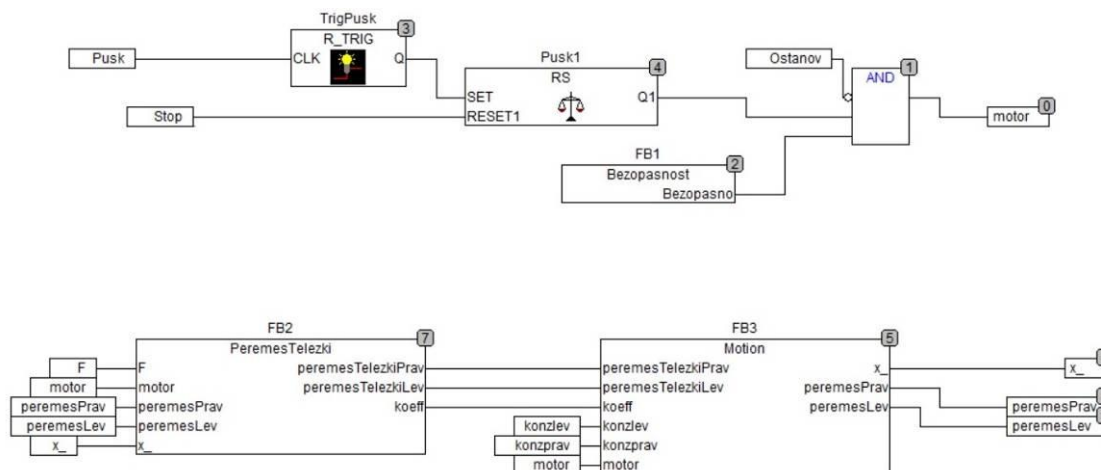


Рис.4. Основная программа для программируемого логического контроллера

## 7. Методика моделирования устройства и программа подъема крана

Функциональный блок FB1 также реализован на языке SFC (рис. 5). В качестве приборов безопасности предлагается использовать следующие датчики:

- контролирующий угол наклона разрабатываемого устройства к горизонту (предельными значениями в согласно правил безопасности приняты  $-5^\circ$  и  $5^\circ$ ) Peregruz2;
- контролирующий отсутствие перегруза Peregruz1;
- обрыва троса ObrivTrosa;
- контролирующий отсутствие препятствий в области производимых работ Chelovek;
- контролирующий силу ветра (предельным значением в соответствии с правилами безопасности принято 14м/с) Veter.

Блоки Peregruz1, ObrivTrosa, Chelovek являются нормально замкнутыми, то есть рабочим состоянием таких датчиков является замкнутое (на вход поступает логическая 1). При поступлении на входы блока AND логических 1 со всех блоков срабатывает выход Bezopasno, который, в свою очередь, передает логическую 1 на входы блоков основной программы программируемого логического контроллера.

Функциональный блок FB2 реализован на языке ST, представляющий собой текстовый редактор высокого уровня.

В связи с тем, что большое время цикла CodeSys воспринимается как заикливание, структура программы была перестроена:

введен цикл с постусловием, где условием является угол поднимаемого объекта (для рассматриваемого случая угол равен  $90^\circ$ ), были введены промежуточные переменные, а также была введена задержка во времени цикла (переменная tm) с целью уменьшения скорости расчетов и наглядности при визуализации.



Рис.5. Функциональный блок безопасности FB1

Функциональный блок FB3 реализован на языке ST. В блоке было реализовано перемещение тележки на рассчитанную величину coeff. При подъеме центр смещение центра тяжести происходит в направлении корпуса машины, однако при написании программы был учтен случай, когда объект был опущен. В таком случае перемещение тележки будет осуществлено в противоположную сторону. Следует отметить, что в соответствии с программой перемещение тележки будет происходить только в том случае, если тележкой не достигнуто крайнее положение и сработали все приборы безопасности.

Панель управления работой установки представлена на рис. 6 и 7.

Каждая кнопка связана с блоком из созданной программы для программируемого логического контроллера. Символ %s означает, что значение параметра считывается с датчика и является числом, в остальных случаях значениями параметров являются логическим 0 или логической 1.



Рис.6. Панель управления

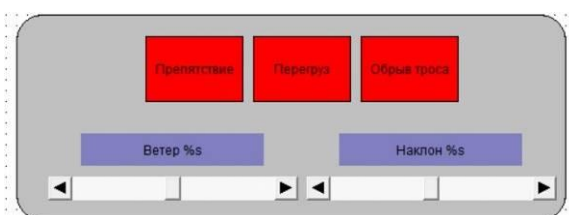


Рис.7. Панель приборов безопасности

При запуске визуализации программы значения силы ветра и угла наклона устройства задаются при помощи полосы прокрутки. Нажатие кнопок для наглядности было реализовано изменением цвета (рис. 8).



Рис.8. Панель запуска визуализации программы в зависимости от значения силы ветра и угла наклона устройства

Визуализация перемещения тележки в соответствии с написанной программой представлена на рис. 9.

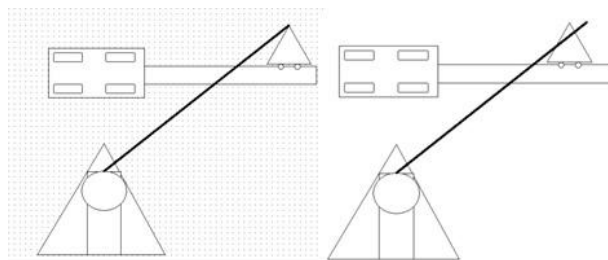


Рис.9. Визуализация перемещения тележки

Решение актуальной научно-технической задачи, заключающейся в повышении уровня безопасности при подъеме опрокинутого стрелового самоходного крана, разработке технической системы подъема опрокинутого крана, позволяет применить результаты проведенных исследований моделирования системы для обеспечения системы безопасности стреловых кранов устройства при ненормируемых внешних воздействиях.

## 8. Заключение

1. Применение алгоритмических методов в результате расчленения или декомпозиции задачи на отдельные части, а также эвристических методов позволило разработать безаварийную техническую систему подъема опрокинутого крана, действие которого проверено экспериментально численными методами.

2. Для создания модели использовались датчики расстояния (оптические и ультразвуковые), позволяющие контролировать:

- угол наклона разрабатываемого устройства к горизонту (предельными значениями в соответствии с правилами безопасности);
- отсутствие перегруза;
- обрыва троса;
- отсутствие препятствий в области производимых работ;
- силу ветра (предельным значением принятыми в соответствии с правилами безопасности).

3. Предлагаемая методика моделирования устройства подъема крана подтверждена программным обеспечением реализации системы безопасности разрабатываемой установки, визуализации общей программы для программируемого логического контроллера с использованием различных языков программирования.

## Список литературы

1. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/index.php?sphrase\\_id=1656336](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/index.php?sphrase_id=1656336). Дата обращения: 01.10.2019.
2. Булыгин Ю.И., Пантузенко А.А., Лазуренко Р.Р. Анализ аварийности и травматизма при эксплуатации грузоподъемных машин и механизмов в России // Безопасность техногенных и природных систем. 2018. №3-4.
3. Автокран рухнул в Нижнем Новгороде из-за деформации грунта [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://regnum.ru/news/accidents/2507049.html>. Дата обращения: 18.05.2020.
4. В центре Воронежа начали поднимать упавший 400-тонный автокран [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/2927234>. Дата обращения: 18.05.2020.
5. Козлов М.В. Устойчивость мобильных грузоподъемных машин при ненормируемых внешних воздействиях: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Тула, 2006. 153 с.
6. Сладкова Л.А. Конструирование и расчет наземных транспортно-технологических машин. – М.: МИИТ, 2016. 345 с.
7. Заббаров А.Ш., Мудров А.Г. Механизм подъема для грузов со смещенным центром тяжести // Научный потенциал молодежи и технический прогресс: материалы I междунар. научно-практ. конф. Казань: КГАСУ, 2018. С. 12-13.
8. Kłosiński, J., Janusz, J. Numerical tests on the FLC system of a crane model's slewing movement // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2016, 91, 51-58. DOI: 10.20858/sjsutst.2016.91.5.
9. Датчики и преобразователи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sensorica.ru/cgi-bin/groups.pl/0w38271.html>. Дата обращения: 18.05.2020.
10. Щербиков В.С., Зырянова С.А., Коротков М.С. Система автоматизированного моделирования стрелового грузоподъемно-

## References

1. Ezhegodnye otchety o deyatelnosti Federalnoy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru [Annual reports on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision]. Available at: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/index.php?sphrase\\_id=1656336](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/index.php?sphrase_id=1656336) (In Russian)
2. Bulygin Yu.I., Pantuzenko A.A., Lazurenko R.R. Analysis of accidents and injuries during the operation of hoisting machines and mechanisms in Russia. *Bezopasnost tekhnogennykh i prirodnykh sistem*, 2018, No.3-4. (In Russian)
3. Autocrane collapsed in Nizhny Novgorod due to soil deformation. Available at: <https://regnum.ru/news/accidents/2507049.html> (In Russian)
4. In the center of Voronezh began to raise the fallen 400-ton truck crane. Available at: <https://regnum.ru/news/accidents/2507049.html> (In Russian)
5. Kozlov M.V. Ustoychivost mobilnykh gruzopodemnykh mashin pri nenormiruemykh vneshnikh vozdeystviyakh [Stability of mobile hoisting machines under abnormal external influences]. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Tula. 2006. 153p. (In Russian)
6. Sladkova L.A. *Konstruirovaniye i raschet nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Design and calculation of ground transport and technological machines]. Moscow, MIIT, 2016. 345 p. (In Russian)
7. Zabbarov A.SH., Mudrov A.G. Lift mechanism for loads with an offset center of gravity. *Proceedings of I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnyy potentsial molodezhi i tekhnicheskiy progress"*, Kazan, KGASU, 2018, pp. 12-13. (In Russian)
8. Kłosiński J., Janusz J. Numerical tests on the FLC system of a crane model's slewing movement. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2016, No.91, pp. 51-58. DOI: 10.20858/sjsutst.2016.91.5.
9. Sensors and Transducers. Available at: <http://www.sensorica.ru/cgi-bin/groups.pl/0w38271.html> (In Russian)

го крана. Омск: СибАДИ, 2009. 106 с.

11. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах. В 2-х т. Т.1. М.: Наука, 1972. 512 с.

†  
† 10. Shcherbakov V.S., Zyryanova S.A.,  
† Korytov M.S. *Sistema avtomatizirovannogo*  
† *modelirovaniya strelovogo gruzopodemnogo*  
† *krana* [System of automated modeling of a jib  
† crane]. Омск, SibADI, 2009. 106 p. (In Russian)

† 11. Bat M.I. *Teoreticheskaya mekhanika v*  
† *primerakh i zadachakh* [Theoretical mechanics  
† in examples and tasks. In 2 volumes. Vol. 1].  
† Moscow, Nauka, 1972. 512 p. (In Russian)  
†