

УДК 621.86

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ КРАНОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ**

Лагерев И.А.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

В статье представлены результаты сравнительного анализа гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин и гидравлических манипуляторов промышленных роботов. Сравнительный анализ проведен на основе рассмотрения широкого круга типов и типоразмеров указанных технических устройств как отечественного, так и иностранного производства: 1580 конструкций кранов манипуляторов и свыше 450 конструкций промышленных роботов. Он выполнялся по следующим направлениям: функциональному назначению и основным техническим характеристикам; конструктивному исполнению; режимам нагружения; типовым отказам в процессе эксплуатации; подходам к проектированию, методам расчета и математического моделирования. Сделаны выводы о степени сходства и степени различия гидравлических крано-манипуляторных установок транспортно-технологических машин и гидравлических манипуляторов промышленных роботов с позиций их проектирования и моделирования протекающих в них при эксплуатации динамических и прочностных процессов.

**Ключевые слова:** *кран-манипулятор, транспортно-технологическая машина, промышленный робот, манипулятор, сравнительный анализ, метод расчета, режим нагружения, технические характеристики*

Транспортно-технологические мобильные машины, оснащенные гидравлическими крано-манипуляторными установками, и промышленные роботы на основе гидравлических манипуляторов являются в настоящее время одними из наиболее востребованных и широко распространенных технических устройств, используемых в базовых сферах российской экономики для выполнения основных и вспомогательных технологических операций, включая подъемно-транспортные, перегрузочно-разгрузочные и складские работы [1-4]. В производстве гидравлических крано-манипуляторных установок занято значительное число предприятий как в Российской Федерации, так и за рубежом – в Корее, Японии, Германии, США и ряде других стран [2, 5]. В 2012 г. объем производства российских манипуляторов достиг свыше 5,2 тыс. единиц, а объем импорта превысил 8,8 тыс. единиц, причем доля новых крано-манипуляторных установок среди импортированных немного превысила 50% [6]. Таким образом, на протяжении 2000-х и 2010-х годов гидравлические краны-манипуляторы являются востребованным видом грузоподъемного оборудования в Российской Федерации. Согласно [7], в 2013 г. мировой объем продаж промышленных роботов составил свыше 178 тыс. единиц, причем крупнейшими покупателями стали предприятия Китая (свыше 36,5 тыс. роботов), Японии (свыше 25 тыс. роботов), США (23,7 тыс. роботов), Кореи (21,3 тыс. роботов), Германии (18,3 тыс. роботов).

Области преимущественного гражданского использования мобильных гидравлических кранов-манипуляторов включают [6, 8]: промышленное производство, энергетику, металлургию, строительство, газо- и нефтедобычу, геологоразведку, магистральный транспорт нефти и газа, автомобильные, железнодорожные и морские перевозки, лесную промышленность, сельское хозяйство, пищевую промышленность, промышленность строительных материалов, сферу обслуживания и др. Благодаря своей универсальности большинство транспортно-технологических машин, оснащенных гидравлическими крано-манипуляторными установками, являются машинами двойного назначения [8]: они могут быть использованы в качестве транспортно-заряжающих машин артиллерийских и ракетных комплексов, инженерных машин для прокладки колонных путей и дорог, строительства аэродромов, мостов и переправ, оборудования артиллерийских, ракетных, минных и огневых позиций, укрытий живой силы и техники, командных пунктов и пунктов связи и др. Еще одно актуальное направление их использования – преодоление последствий чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера (расчистка территории, разборка завалов, строительство быстровозводимых зданий и сооружений, дамб, плотин и др.) [8].

Области преимущественного гражданского использования промышленных роботов на основе гидравлических манипуляторов включают [4, 7, 9, 10]: машиностроение, приборостроение, транспорт, энергетику, металлообработку, металлургию, строительство, электротехническую, электронную, пищевую и лесную промышленность, промышленность строительных материалов, сферу обслуживания. По данным [11], в 2013 г. наибольшее число новых промышленных роботов было установлено на предприятиях автомобилестроения (69,4 тыс. роботов), электротехнической и электронной промышленности (36,2 тыс. роботов), металлообработки и машиностроения (16,5 тыс. роботов). Также роботы нашли свое достаточно широкое применение в сферах обороны, безопасности, ликвидации последствий природных и техносферных аварий и катастроф, в космических и морских исследованиях, разработке и добыче полезных ископаемых [4].

Сравнение областей преимущественного использования кранов-манипуляторов и роботов показывает как совпадение достаточного числа этих областей для обоих видов оборудования (особенно, оборудования, ориентированного на выполнение погрузочно-разгрузочных, перегрузочных и складских вспомогательных технологических операций), так и наличие специфики эксплуатационного назначения у кранов-манипуляторов и роботов.

Необходимость выполнения аналогичных по своему назначению технологических операций является объективной предпосылкой к созданию кранов-манипуляторов и промышленных роботов сходного конструктивного исполнения, а, следовательно, и к разработке и использованию одинаковых подходов и методов их расчета и проектирования. Однако при проектировании и моделировании данных технических устройств было бы методологически неправильным подходом как отождествлять манипуляторы промышленных роботов и грузоподъемных кранов (как это делается, например, в [10, 12]), так и рассматривать их как принципиально разные машины.

Поэтому с целью объективного уяснения степени сходства и степени различия гидравлических крано-манипуляторных установок транспортно-технологических машин и гидравлических манипуляторов промышленных роботов с позиций их проектирования и моделирования протекающих в них при эксплуатации динамических и прочностных процессов был проведен сравнительный анализ современных конструкций данных технических устройств. Указанный сравнительный анализ выполнялся по следующим направлениям:

- функциональному назначению и основным техническим характеристикам;
- конструктивному исполнению;
- режимам нагружения;
- типовым отказам в процессе эксплуатации;
- подходам к проектированию, методам расчета и математического моделирования.

Применительно к гидравлическим крано-манипуляторным установкам транспортно-технологических машин были проанализированы конструкции 1580 кранов-манипуляторов (включая 110 – отечественного производства) общего назначения, грейферных манипуляторов, ковшовых манипуляторов, манипуляторов для эвакуации машин, манипуляторов лесных машин, манипуляторов транспортно-заряжающих и инженерных машин, предназначенных для установки на автотранспортные средства, колесные и гусеничные тракторы, железнодорожные машины, стационарные конструкции [13]. В качестве источника информации использовались официальные сайты в сети Интернет следующих производителей: Binderberger [14], Epsilon [15], Palfinger [16] и Penz [17] (Австрия), ОАО «Мозырский машиностроительный завод» [18] (Беларусь), Penny Hydraulics [19] (Великобритания), Atlas [20], MKG [21] (Германия), HMF [22] (Дания), Amco Veba [23], Cormach [24], Effèr [25], Fassi [26], Ferrari [27] и PM [28] (Италия), Bigmax [29] (Канада), Donghe и XCMG [30] (Китай), Auto Crane [31], IMT [32], Jomac [33], Maxilift Cranes [34], Fisher Crane Co [35], Petersen Industries [36], Prentice [37], Serco Loaders [38], Stellar Industries [39] и Terex [40] (США), Kesla (Foresteri) [41] (Финляндия), Cranab [42], HIAВ [43] и V-KRAN [44] (Швеция), Kanglim [45], Dongyang Mechatronics [46], Soosan [47] и Tadano [48] (Южная Корея), Unic [49], Kato [50], Maeda [51] и ShinMaywa [52] (Япония), а также отечественных предприятий ЗАО «БАКМ» [53], ЗАО «Ве-

ликолуцкий машиностроительный завод» [54], АО «Дизель-Ремонт» [55], ЗАО «Златоустовский машиностроительный завод» [56], ЗАО «ИНМАН» [57], ЗАО «Стройдормаш» [58], ООО «Майкопский машиностроительный завод» [59], ООО «Соломбальский машиностроительный завод» [60], ОАО «Клинцовский автокрановый завод» [61], ОАО «Галичский автокрановый завод» [62], ОАО «Ивановский автокрановый завод» [63].

Применительно к манипуляторам промышленных роботов были проанализированы технические характеристики в общей сложности более 450 моделей отечественных и зарубежных роботов, выпускавшихся начиная с последней четверти прошлого века [9] и выпускаемых в настоящее время. Среди ведущих зарубежных фирм-производителей роботов были рассмотрены такие, как KUKA Robotics [64, 65], Epson Robots [66], Denso Robotics [67] (Германия), Universal Robots [68] (Дания), AEB Robotics [67], Comau [68] (Италия), Adept Technology [69], KC Robotics [70] (США), ABB Robotics [71] (Швеция, Швейцария), Asea (Швеция), Fanuc [72], Kawasaki [73], Mitsubishi [74], Nachi [75], OTC Daihen [76], Panasonic [77], YASKAWA Motoman [78] (Япония). Для анализа были взяты только такие модели промышленных роботов, которые можно рассматривать как альтернативные по конструкции, функциональному назначению и условиям работы гидравлическим крано-манипуляторным установкам – стационарные технологические (производственные), вспомогательные (подъемно-транспортные) и универсальные роботы напольного или встроенного исполнения.

*1. Сравнительный анализ функционального назначения и основных технических характеристик кранов-манипуляторов и манипуляторов промышленных роботов.*

На рис. 1 приведены функции  $P(G_n)$  распределения числа типоразмеров манипуляторов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, по номинальной грузоподъемности  $G_n$ . Необходимо отметить, что верхняя часть кривых 2 и 3, соответствующая области тяжелых и сверхтяжелых манипуляторов по классификации [10, 79], формируется промышленными роботами преимущественно подвешенного (портального) исполнения, т.е. конструктивно существенно отличающимися от кранов-манипуляторов. Видно, что медианное значение номинальной грузоподъемности  $G_n$  числа типоразмеров кранов-манипуляторов составляет ~40 кН, гидравлических манипуляторов промышленных роботов - ~0,3 кН, т.е. на 2 порядка меньше. При этом манипуляторы роботов с гидравлическим приводом являются более грузоподъемными, чем с другими типами приводов (пневматическим, электрическим и комбинированным). Менее 10% типоразмеров гидравлических кранов-манипуляторов имеют номинальную грузоподъемность свыше 110 кН, менее 5% - свыше 200 кН. Для гидравлических манипуляторов роботов эти значения составляют соответственно 1 и 4 кН.

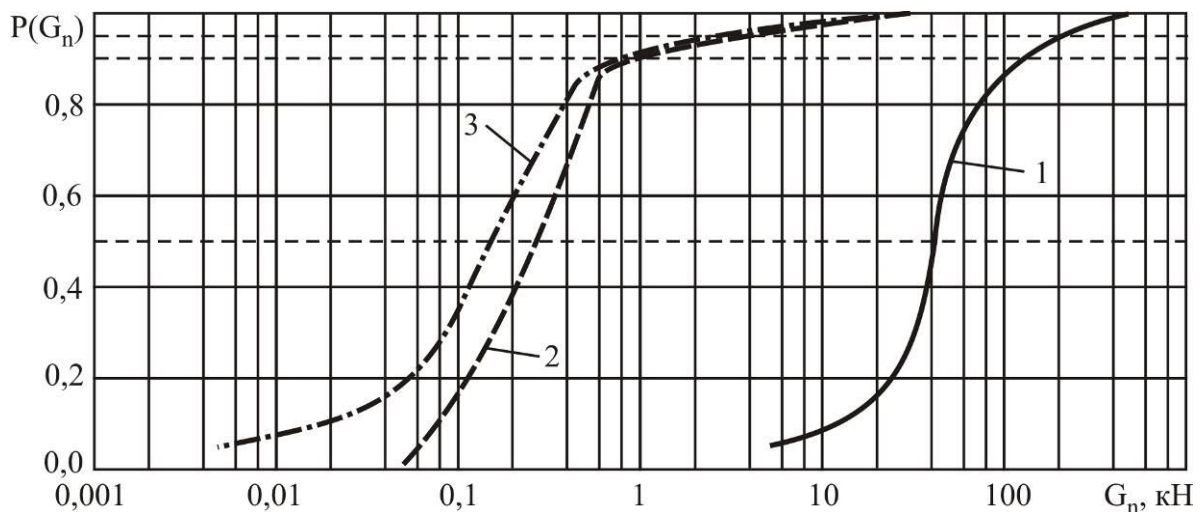


Рис. 1. Распределение числа типоразмеров манипуляторов по номинальной грузоподъемности: 1 – гидравлические краны-манипуляторы; 2 – гидравлические манипуляторы промышленных роботов; 3 – манипуляторы всех типов привода промышленных роботов

На рис. 2 приведены функции  $P(G_m)$  распределения числа типоразмеров манипуляторов по величине собственного веса  $G_m$ . Его медианное значение для кранов-манипуляторов составляет  $\sim 18$  кН, для гидравлических манипуляторов промышленных роботов -  $\sim 7$  кН, т.е. в 2,5 раза меньше. Менее 10% типоразмеров гидравлических кранов-манипуляторов имеют собственный вес свыше 50 кН, менее 5% - свыше 80 кН. Для гидравлических манипуляторов роботов эти значения составляют соответственно 20 и 28 кН, т.е. также в 2,5 раза меньше. Для манипуляторов роботов характерен больший диапазон разброса их собственного веса - от  $\sim 0,2$  до  $\sim 40$  кН, т.е. величины  $G_m$  для разных типоразмеров роботов могут отличаться до 200 раз, тогда как у кранов-манипуляторов - от  $\sim 2$  до  $\sim 200$  кН, т.е. до 100 раз. Сравнивая данные на рис. 1 и 2 видно, что при приблизительно сопоставимом собственном весе манипуляторы промышленных роботов имеют значительно меньшую номинальную грузоподъемность  $G_n$ , чем гидравлические крано-манипуляторные установки транспортно-технологических машин, - до 2 порядков.

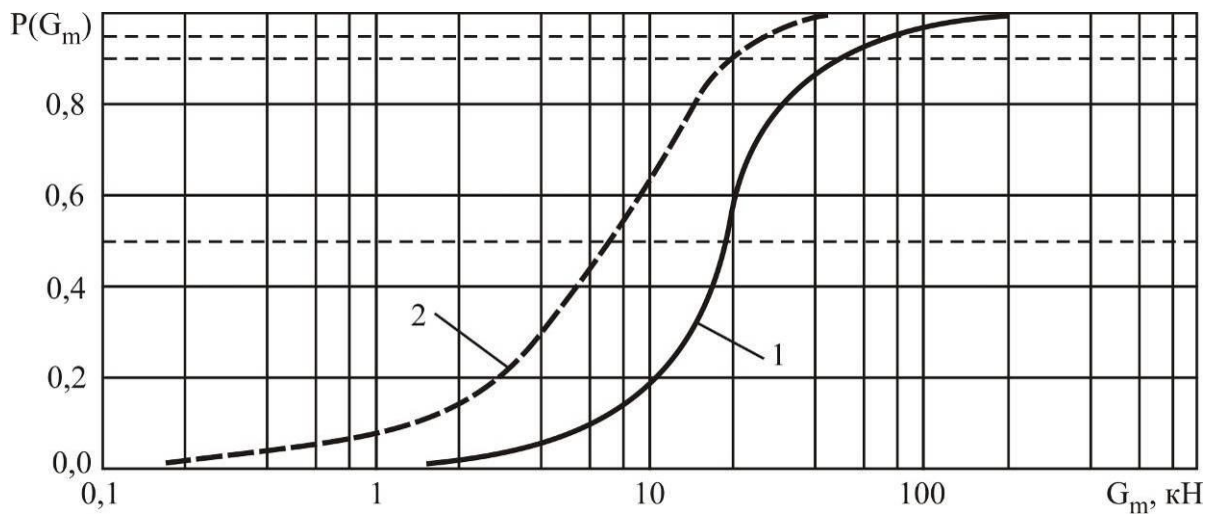


Рис. 2. Распределение числа типоразмеров манипуляторов по собственному весу:  
1 – гидравлические краны-манипуляторы; 2 – манипуляторы промышленных роботов

Важной характеристикой манипуляторов как кранов, так и роботов является величина максимального грузового момента  $M_w$ . Этот показатель комплексно характеризует взаимозависимость между весом перемещаемого груза  $G$ , величина которого меняется в пределах до номинальной грузоподъемности  $G_n$ , и предельным радиальным размером зоны безопасного манипулирования этим грузом  $r_G$ . Он служит основой для построения диаграмм грузовых характеристик манипуляторов (графиков вида  $G \sim r_G$ ):

$$r_G = M_w / G,$$

а также диаграмм высотных характеристик манипуляторов (графиков вида  $h_G \sim r$  для нескольких значений веса груза  $G$ ):

$$h_G = \sqrt{L_{\max}^2 - r^2},$$

где  $L_{\max}$  - максимальный вылет манипулятора, допускаемый его кинематической схемой и длинами отдельных звеньев;  $r$  - вылет манипулятора в пределах от минимального конструктивного значения до максимального значения  $r_G$ , соответствующего грузу заданного веса  $G$ .

На рис. 3 приведены функции  $P(M_w)$  распределения числа типоразмеров манипуляторов кранов и роботов по величине максимального грузового момента  $M_w$ . Его медианное значение для кранов-манипуляторов составляет  $\sim 120$  кН·м, гидравлических манипуляторов

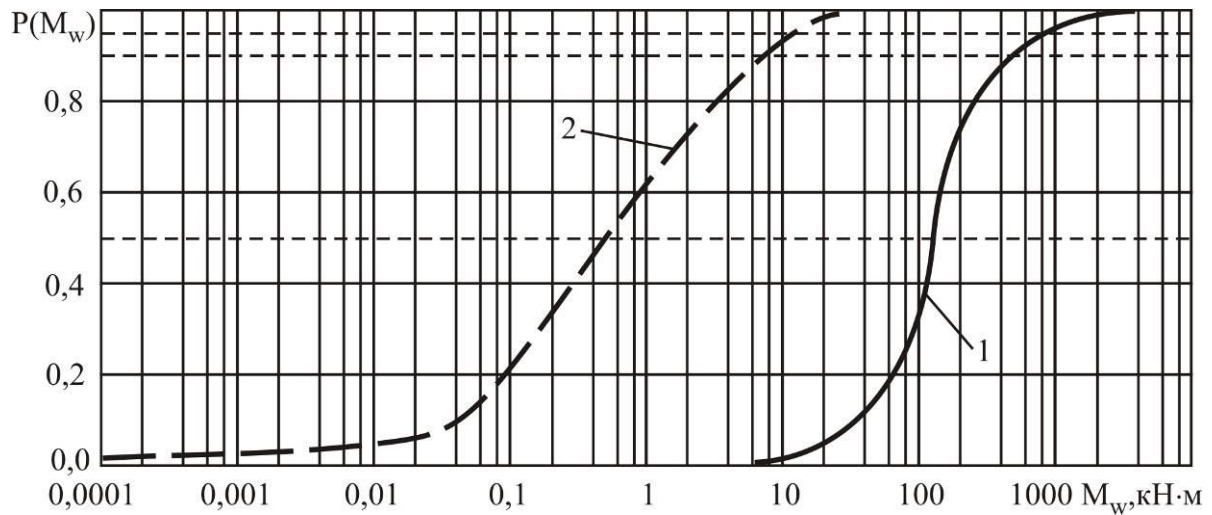


Рис. 3. Распределение числа типоразмеров манипуляторов по величине грузового момента:  
1 – краны-манипуляторы; 2 – промышленные роботы

промышленных роботов -  $\sim 0,5$  кН·м, т.е. более, чем на 2 порядка меньше. Менее 10% типоразмеров гидравлических кранов-манипуляторов имеют максимальный грузовой момент свыше 500 кН·м, менее 5% - свыше 800 кН·м. Для гидравлических манипуляторов роботов эти значения составляют соответственно 7 и 11 кН·м, т.е. примерно на 2 порядка меньше. Для манипуляторов роботов характерна существенно большая ширина диапазона изменения максимального грузового момента - от  $\sim 0,0001$  до  $\sim 25$  кН·м, т.е. величины  $M_w$  для разных типоразмеров роботов могут отличаться до  $2,5 \cdot 10^5$  раз, тогда как у кранов-манипуляторов – от  $\sim 6$  до  $\sim 4000$  кН·м, т.е. лишь до 700 раз. Примерно каждая вторая крано-манипуляторная установка имеет грузовой момент в достаточно узком диапазоне от 80 до 200 кН·м.

Для целей сравнительного анализа представляет интерес такая техническая характеристика манипуляторов, как объем рабочей зоны  $V_w$ , в пределах которого возможно безопасное манипулирование перемещаемым грузом. На рис. 4 приведены функции  $P(V_w)$  распределения числа типоразмеров манипуляторов кранов и роботов в зависимости от объема их рабочей зоны. Медианное значение  $V_w$  для кранов-манипуляторов составляет  $\sim 2000$  м<sup>3</sup>, гидравлических манипуляторов промышленных роботов -  $\sim 1,2$  м<sup>3</sup>, т.е. на 3 порядка меньше. Менее 10% типоразмеров гидравлических кранов-манипуляторов имеют объем рабочей зоны свыше 12000 м<sup>3</sup>, менее 5% - свыше 18000 м<sup>3</sup>. Для гидравлических манипуляторов роботов

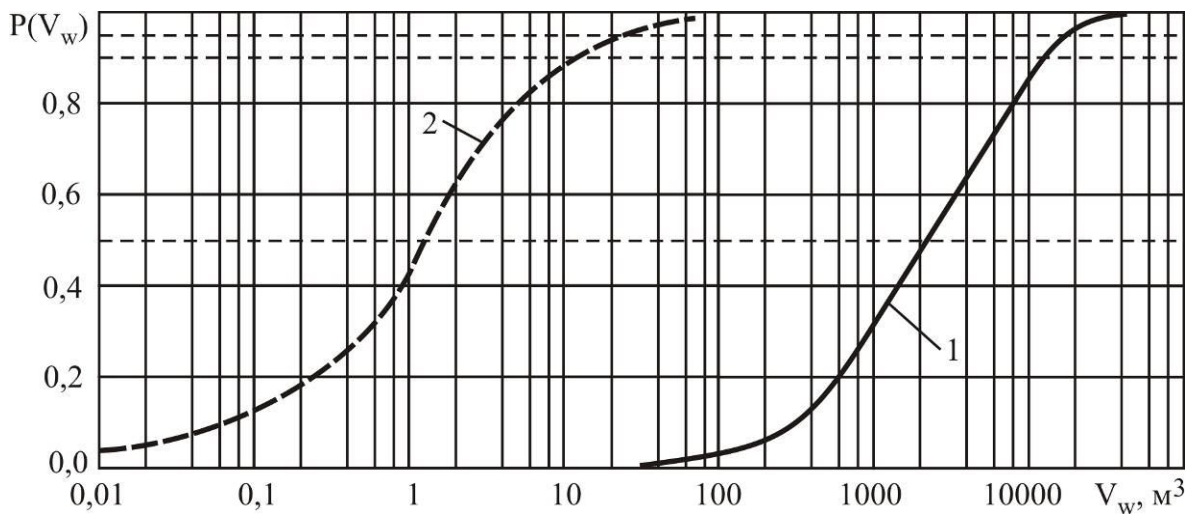


Рис. 4. Распределение числа типоразмеров манипуляторов по объему рабочей зоны:  
1 – краны-манипуляторы; 2 – промышленные роботы

эти значения составляют соответственно 12 и 21 м<sup>3</sup>, т.е. также на 3 порядка меньше. Для манипуляторов кранов и роботов характерна примерно одинаковая ширина диапазона изменения объема рабочей зоны. Для разных типоразмеров роботов величины  $V_w$  лежат в диапазоне от менее чем 0,01 до ~70 м<sup>3</sup>, т.е. могут отличаться до 7000 раз, а у кранов-манипуляторов – в диапазоне от ~3 до ~40000 м<sup>3</sup>, т.е. могут отличаться до 10000 раз.

На рис. 5 приведены функции  $P(L)$  распределения числа типоразмеров манипуляторов кранов и роботов в зависимости от величины хода звеньев  $L$ . Этот показатель характеризует линейный размер рабочей зоны манипуляторов. Применительно к промышленным роботам рассматриваются величины хода модуля выдвижения руки и модуля подъема, применительно к кранам-манипуляторам - максимальный вылет грузоподъемного органа (уникальные крано-манипуляторные установки, имеющие существенно высокие значения максимального вылета стрелы, в объем статистической выборки не были включены). Медианное значение  $L$  для кранов составляет ~10 м, гидравлических манипуляторов промышленных роботов - ~0,6 м (выдвижение руки) и ~0,4 м (подъем), т.е. в 15...25 раз меньше. Менее 10% типоразмеров гидравлических кранов-манипуляторов имеют максимальный вылет свыше 18 м, менее 5% - свыше 20 м. Для гидравлических манипуляторов роботов эти значения составляют соответственно 1,1 и 1,2 м (выдвижение руки) и 0,8 и 1,0 м (подъем), т.е. также на 1 порядок меньше. Ширина диапазона изменения хода рабочих звеньев как для манипуляторов кранов, так и манипуляторов роботов практически одинакова. Для разных типоразмеров роботов величины  $L$  лежат в диапазоне от менее, чем 0,02 до ~1,5 м, т.е. могут отличаться до 70 раз, а у кранов-манипуляторов – в диапазоне от ~2 до ~30 м, т.е. могут отличаться в 15 раз. Примерно каждая вторая крано-манипуляторная установка имеет максимальный вылет в диапазоне 8...12 м.

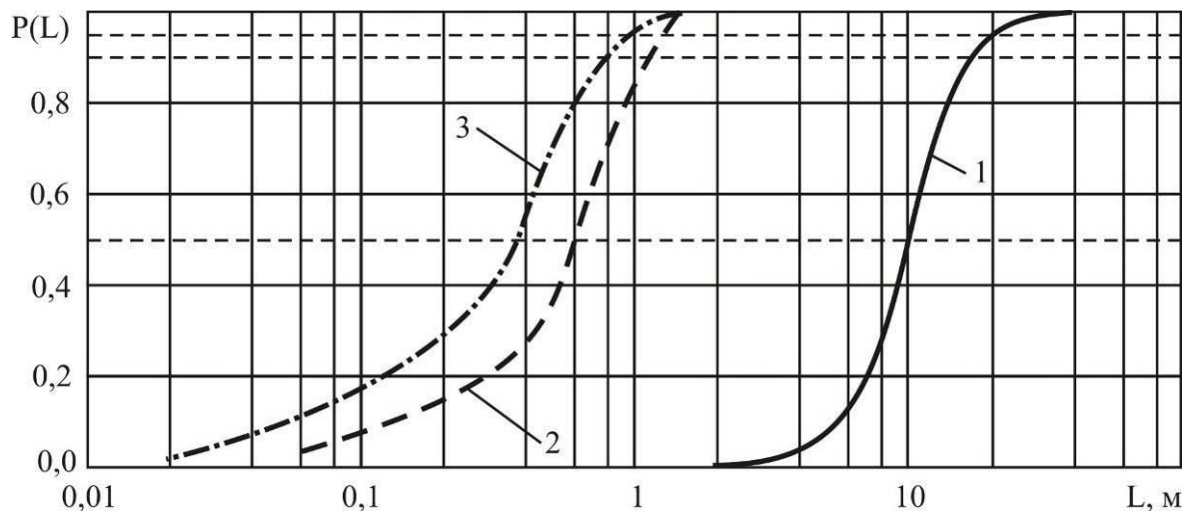


Рис. 5. Распределение числа типоразмеров манипуляторов по величине хода звеньев: 1 – максимальный вылет крана-манипулятора; 2 – ход выдвижения руки манипуляторов промышленных роботов; 3 – ход модуля подъема манипуляторов промышленных роботов

Важной технической характеристикой манипуляторов промышленных роботов является погрешность позиционирования объекта манипулирования в конечной точке траектории, а также точность отработки заданной траектории в процессе перемещения объекта манипулирования. Погрешность позиционирования для роботов лежит, в основном, в интервале до  $\pm 5$  мм, причем приблизительно каждый второй робот имеет погрешность позиционирования менее  $\pm 0,5$  мм, а погрешность свыше  $\pm 5$  мм имеют лишь менее 2% роботов. Абсолютная погрешность отработки траектории для промышленных роботов составляет  $\pm 0,02... \pm 4$  мм, причем более чем у 2/3 всех роботов она не превышает  $\pm 1$  мм [10]. Такие высокие требования по точности диктуются необходимостью обеспечения нужных параметров качества выполнения тех технологических процессов, которые обслуживают современные



промышленные роботы. Они могут быть реализованы лишь с помощью входящих в структуру промышленных роботов автоматизированных систем программного управления, определяющих и контролирующих функционирование автоматизированного привода механизмов движения звеньев манипуляторов, а также с помощью повышенных характеристик жесткости элементов механической системы – звеньев кинематической цепи, шарнирных соединений и передаточных механизмов. Для крано-манипуляторных установок общего назначения, составляющих основную долю эксплуатирующегося грузоподъемного оборудования, погрешности позиционирования и отработки траектории как таковые не представляют практического интереса и потому не фиксируются в эксплуатационных документах. Это обусловлено спецификой процесса манипулирования перемещаемым грузом с помощью крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин, который предусматривает как ручное управление механизмами движения звеньев манипулятора, так и ручную ориентацию и установку груза в конечной точке траектории. Исключение могут составлять только специализированные крано-манипуляторные установки мобильных машин специального назначения.

Кроме рассмотренных паспортных технических характеристик кранов и промышленных роботов дополнительно представляет интерес сравнительный анализ ряда относительных характеристик, выражающих грузовые свойства манипуляторов.

Данные, приведенные на рис. 6, дают представление об относительных значениях грузовой характеристики манипуляторов – относительной грузоподъемности

$$\bar{K}_{Gn} = G_n / G_m .$$

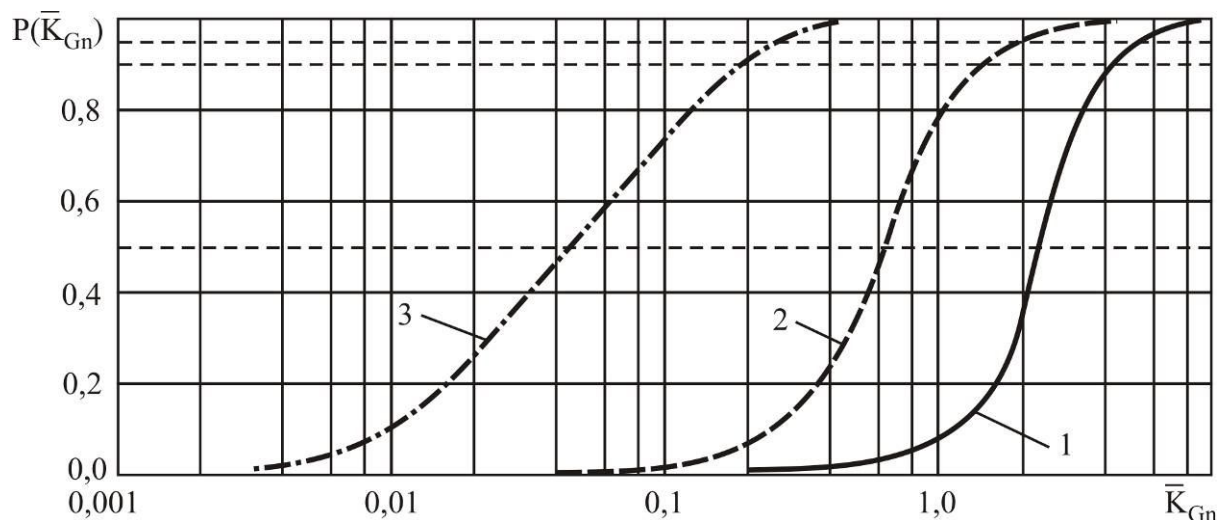


Рис. 6. Распределение числа типоразмеров манипуляторов по относительной грузоподъемности  $\bar{K}_{Gn}$ : 1 – краны-манипуляторы (для максимальной грузоподъемности); 2 – краны-манипуляторы (для минимальной грузоподъемности); 3 – промышленные роботы

На рис. 6 приведены функции  $P(\bar{K}_{Gn})$  распределения числа типоразмеров манипуляторов кранов и роботов по относительной грузоподъемности  $\bar{K}_{Gn}$ . При этом для крано-манипуляторных установок рассматриваются согласно техническим требованиям к данному виду машин две разновидности грузоподъемности – максимальная  $G_{n,max}$  и минимальная  $G_{n,min}$ . Медианное значение относительной грузоподъемности  $\bar{K}_{Gn,max} = G_{n,max} / G_m$  для кранов составляет  $\sim 2,4$ , а  $\bar{K}_{Gn,min} = G_{n,min} / G_m - \sim 0,65$ , тогда как для гидравлических манипуляторов промышленных роботов -  $\bar{K}_{Gn} \sim 0,045$ , т.е. соответственно примерно на 2 и 1 порядок меньше. Менее 10% типоразмеров гидравлических кранов-манипуляторов имеют относительную грузоподъемность  $\bar{K}_{Gn,max}$  ( $K_{Gn,min}$ ) свыше 4,2 (1,5), менее 5% - свыше 5,2 (2,0). Для

гидравлических манипуляторов роботов эти значения составляют соответственно 0,2 и 0,25, т.е. разница по сравнению с медианными значениями уменьшается, составляя менее 1 порядка. Только приблизительно у 2% кранов-манипуляторов значения  $\bar{K}_{Gn,max}$  соответствуют значениям  $\bar{K}_{Gn}$  манипуляторов промышленных роботов. Для манипуляторов роботов характерен более широкий интервал изменения  $\bar{K}_{Gn} - 0,003...0,4$  (в пределах 2 порядков), тогда как для  $\bar{K}_{Gn,max}$  он составляет 0,2...9, а для  $K_{Gn,min} - 0,04...4$ .

Для сравнительного анализа технических характеристик манипуляторов интерес представляет и такой параметр, как относительная собственная масса манипулятора, приведенная к номинальной грузоподъемности  $\bar{K}_{Gm} = G_m / G_n$ . Его можно рассматривать как меру эффективности использования конструкционных материалов (степени удельной материалоемкости металлоконструкции манипулятора), а также как показатель нагруженности и показатель жесткости (способности к сопротивлению деформированию) металлоконструкции манипуляторов под действием перемещаемого груза номинального веса. Относительные параметры  $\bar{K}_{Gm}$  и  $\bar{K}_{Gn}$  связаны очевидным соотношением  $\bar{K}_{Gm} = \bar{K}_{Gn}^{-1}$ .

На рис. 7 приведены функции  $P(\bar{K}_{Gm})$  распределения числа типоразмеров манипуляторов кранов и роботов по относительному собственному весу  $\bar{K}_{Gm}$ . Медианное значение относительного собственного веса крано-манипуляторной установки составляет ~0,4, тогда как манипуляторов промышленных роботов - ~20, т.е. примерно в 50 раз больше. Менее 10% типоразмеров гидравлических кранов-манипуляторов имеют относительный собственный вес крано-манипуляторной установки свыше 0,7, менее 5% - свыше 1,0. Для гидравлических манипуляторов роботов эти значения составляют соответственно 95 и 150, т.е. разница по сравнению с медианными значениями возрастает, составляя более 2 порядков. Только приблизительно у 2% кранов-манипуляторов значения  $\bar{K}_{Gm}$  соответствуют значениям  $\bar{K}_{Gm}$  манипуляторов промышленных роботов. Для манипуляторов роботов характерен более широкий интервал изменения их относительного собственного веса - 2...400 (в пределах 2 порядков), тогда как для крано-манипуляторных установок он составляет 0,1...6 (в пределах 1 порядка). Примерно каждая вторая крано-манипуляторная установка имеет относительный собственный вес, лежащий в достаточно узком диапазоне - 0,3...0,5.

Представленные на рис. 7 результаты свидетельствуют, что показатель  $\bar{K}_{Gm}$  для промышленных роботов существенно превышает данный показатель для крано-манипуляторных установок. Таким образом, в конструкции манипуляторов роботов на каждую единицу номи-

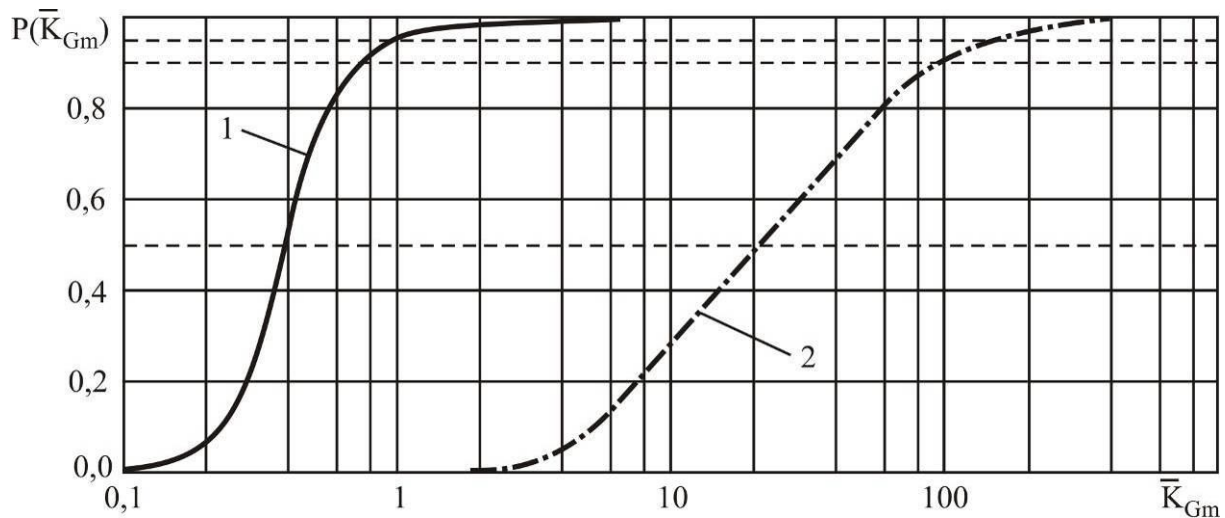


Рис. 7. Распределение числа типоразмеров манипуляторов по относительной собственной массе  $\bar{K}_{Gm}$ : 1 – краны-манипуляторы; 2 – промышленные роботы



нальной грузоподъемности затрачивается значительно больше конструкционных материалов (больше удельная материалоемкость), что обуславливает существенное утяжеление подвижных звеньев их металлоконструкции по сравнению со звеньями крано-манипуляторных установок.

В качестве относительных параметров, характеризующих грузо-моментные свойства манипуляторов, целесообразно использовать такие, как:

- относительный грузовой момент

$$\bar{K}_{Mw} = \frac{M_w}{M_r} \approx \frac{2M_w}{(G_m + G_{sh})B_a};$$

- относительный опрокидывающий момент

$$\bar{K}_{Mo} = \frac{M_o}{M_r} \approx \frac{2M_w(L_{\max} - 0,5B_a)}{(G_m + G_{sh})L_{\max}B_a},$$

где  $M_r, M_o$  - восстанавливающий и опрокидывающий моменты соответственно;  $G_{sh}$  - вес шасси, на котором установлен манипулятор (для промышленных роботов  $G_{sh} = 0$ );  $B_a$  - минимальное расстояние между параллельными ребрами опрокидывания (для крано-манипуляторных установок  $B_a$  - база установки аутригеров, для манипуляторов роботов  $B_a$  - минимальный размер опорного контура).

Относительные моменты  $\bar{K}_{Mw}$  и  $\bar{K}_{Mo}$  характеризуют меру общей устойчивости манипуляторов против их опрокидывания в процессе эксплуатации.

На рис. 8 приведены функции  $P(\bar{K}_{Mw})$  и  $P(\bar{K}_{Mo})$  распределения числа типоразмеров манипуляторов кранов и роботов по относительным грузовому  $\bar{K}_{Mw}$  и опрокидывающему  $\bar{K}_{Mo}$  моментам. Медианные значения относительных моментов  $\bar{K}_{Mw}$  и  $\bar{K}_{Mo}$  для крано-манипуляторных установок составляют  $\sim 1,2$  и  $\sim 0,8$  соответственно, для манипуляторов промышленных роботов -  $\sim 0,16$  и  $\sim 0,12$  или примерно в 7...8 раз меньше. Таким образом, манипуляторы мобильных транспортно-технологических машин имеют существенно меньший запас общей устойчивости против опрокидывания в процессе манипулирования транспортируемым грузом, чем манипуляторы промышленных роботов, и требуют разработки и применения специальных конструкторских и организационных мероприятий, направленных на повышение их общей устойчивости.

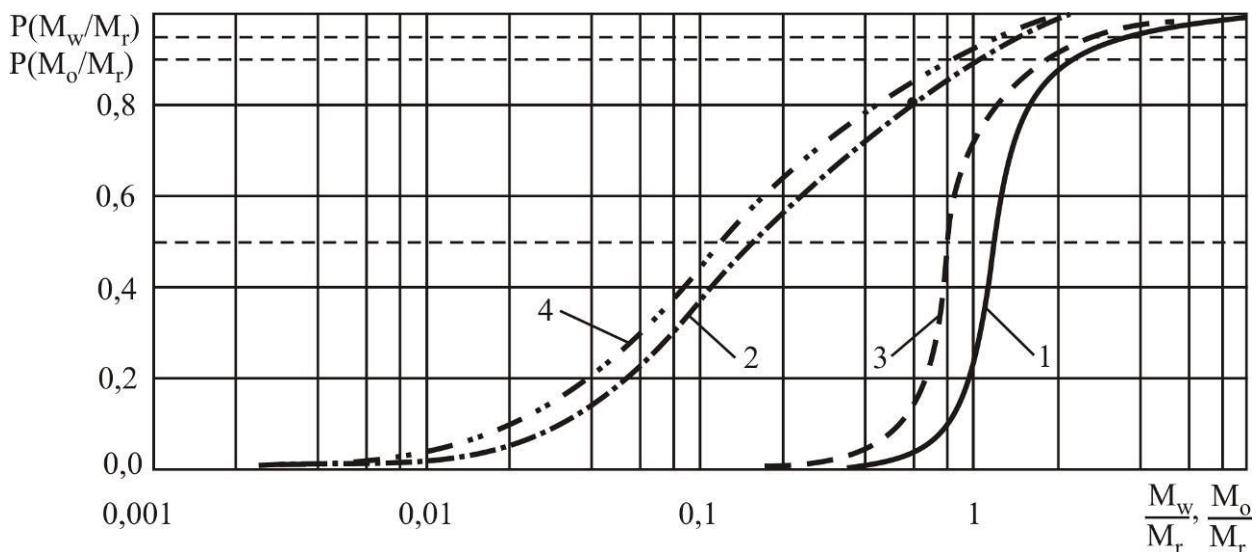


Рис. 8. Распределение числа типоразмеров манипуляторов по относительному грузовому и опрокидывающему моментам: 1 – относительный грузовой момент крано-манипулятора; 2 – относительный грузовой момент робота; 3 – относительный опрокидывающий момент крано-манипулятора; 4 – относительный опрокидывающий момент робота

## *2. Сравнительный анализ конструктивного исполнения манипуляторов.*

Сравнительный анализ кинематических схем кранов-манипуляторов и манипуляторов промышленных роботов показывает как их принципиальное соответствие, так и наличие существенных отличий, которые необходимо учитывать при проектировании и моделировании работы данных видов технологического оборудования.

Общей чертой манипуляторов как грузоподъемных кранов, так и промышленных роботов является то, что их кинематические схемы являются незамкнутыми и имеют структуру типа дерева, вследствие чего для их символьного описания удобно использовать единый алгоритм кодирования механических систем со структурой дерева методом графов [80]. На рис. 9 показаны наиболее часто встречаемые типы кинематических схем крано-манипуляторных установок, реализуемые в моделях кранов-манипуляторов зарубежных фирм-производителей [6]. Их можно рассматривать в качестве базовых кинематических схем, так как зачастую конструкции крано-манипуляторных установок позволяют наращивать базовую кинематическую схему за счет добавления одной или нескольких дополнительных секций [6]. Такой возможности лишены манипуляторы большинства конструктивных типов промышленных роботов, исключая роботов агрегатно-модульного типа [4, 81]. Но даже в этом случае кинематическая схема робота агрегатно-модульного типа формируется до его ввода в эксплуатацию, а в процессе дальнейшей эксплуатации не изменяется, т.е. является постоянной (фиксированной) во времени. Напротив, базовая кинематическая схема крано-манипуляторной установки мобильной транспортно-технологической машины в процессе эксплуатации может неоднократно видоизменяться с целью обеспечения при выполнении конкретных производственных работ необходимых грузо-высотных характеристик, т.е. в общем случае является дискретно переменной во времени.

Основные движения звеньев крано-манипуляторных установок, как это видно из приведенных на рис. 9 характерных структурных схем кранов-манипуляторов, соответствуют практически одному виду систем координат – полярной сферической. Однако указанная система координат свойственна лишь одному из каждых 9...10 манипуляторов промышленных роботов, так как их основная доля (до 60%) имеет цилиндрическую систему, а всего используется до 7 различных видов систем координат [3, 9, 10].

По сравнению с кранами-манипуляторами структурные кинематические схемы манипуляторов роботов характеризуются большим разнообразием взаимных относительных движений сопряженных звеньев металлоконструкции, так как в них используются кинематические пары нескольких классов - поступательные, вращательные и поступательно-вращательные пары V класса, цилиндрические и вращательные пары IV класса, вращательные (шаровые) пары III класса [3, 4, 9, 10, 82], хотя, естественно, преобладают более простые для технологической реализации низшие кинематические пары V класса, обеспечивающие одну степень свободы. В конструкциях крано-манипуляторных установок используются только низшие кинематические пары V класса – вращательные на основе цилиндрических шарниров, обеспечивающие вращательное движение относительно продольной оси звена или поворотное относительное движение смежных звеньев, и поступательные на основе призматических шарниров, обеспечивающие телескопирование ряда последовательно сопряженных звеньев кинематической цепи (рис. 9).

Сравнительный анализ конструктивного исполнения звеньев и шарниров узлов соединения звеньев кинематических цепей манипуляторов промышленных роботов и грузоподъемных кранов показывает их принципиальное различие. Об этом косвенно свидетельствуют выявленные выше существенно повышенные значения относительной грузоподъемности  $G_n / G_m$  для кранов-манипуляторов по сравнению с промышленными роботами (рис. 6), т.е. для обеспечения манипулирования грузом одинакового веса в случае кранов на изготовление крано-манипуляторной установки затрачивается значительно меньше конструкционных материалов. Указанное отличие заключается в том, что кинематические пары манипуляторов промышленных роботов, оснащенных пневматическим или гидравлическим приводом,

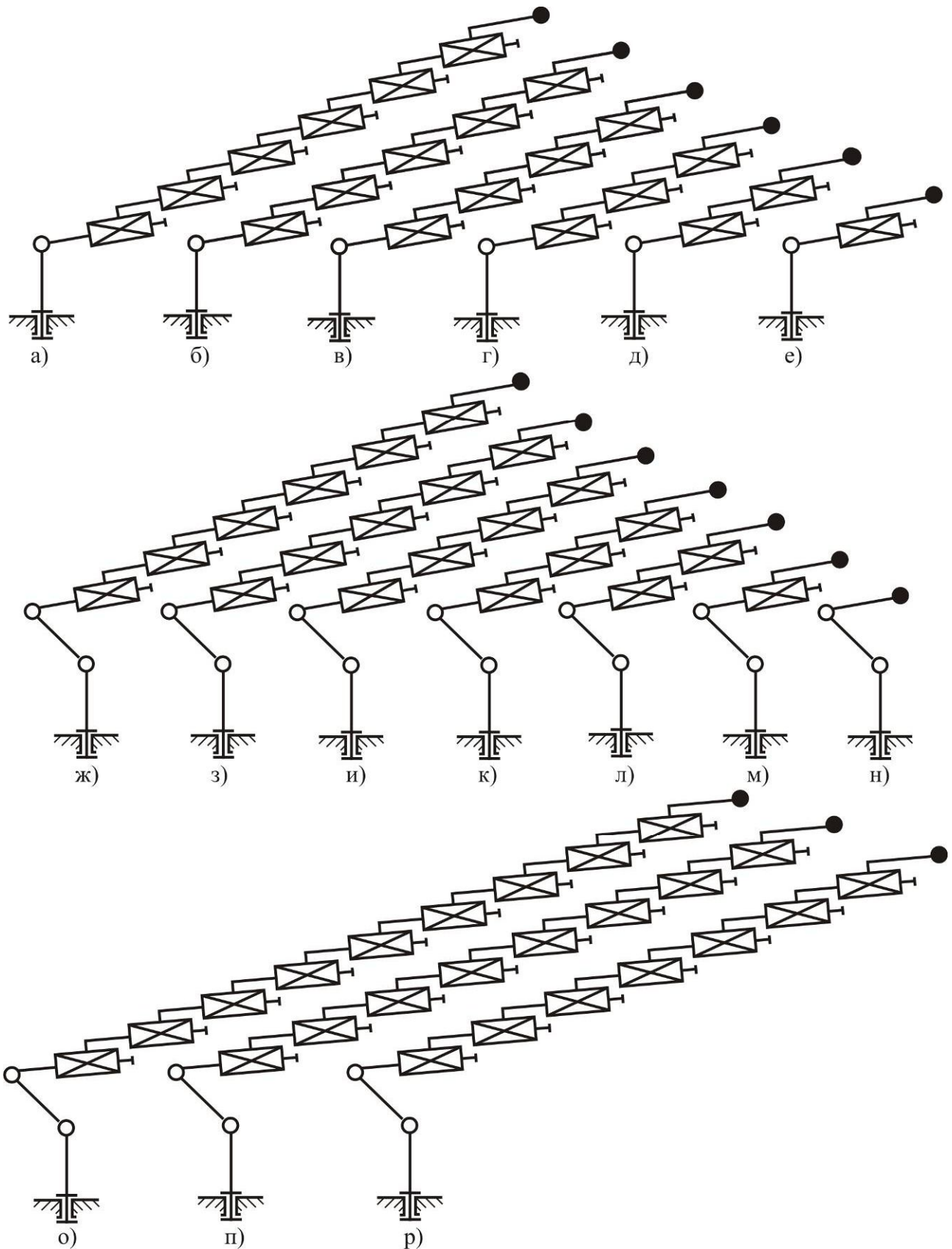


Рис. 9. Часто встречаемые кинематические схемы ряда моделей крано-манипуляторных установок зарубежных фирм-производителей: а – Unic UR-W546С; б – HMF 1910-T5; в – Kato A605; г – Palfinger PFD 99; д – IMT 1.5/11; е – Tadano TM-20; ж – IMT 14/98SL K6; з – PM 12025; и – IMT 10/72SL K4; к – HMF 1800-K3; л – IMT 10/72SL K2; м – PM 12021; н – Varco 295ML; о – PM 65029 SP; п – HMF 6020-K8; р – HMF 1800-K7

представляют собой конструктивное совмещение в виде единой сборочной единицы (модуля движения) собственно самой пары, состоящей из двух звеньев, и приводного пневмо- или гидродвигателя (цилиндра или поворотного двигателя шиберного или поршневого типа) [9, 10, 83-85]. При этом, как правило, одно звено (чаще всего, неподвижное) представляет собой внешнюю деталь цилиндрического поперечного сечения, которая выполняет одновременно роль корпуса пневмо- или гидродвигателя, а другое звено представляет собой шток этого двигателя, совершающее поступательное или вращательное движение. Такой подход к конструктивной компоновке кинематических пар роботов обуславливает их компактность и жесткость, что является необходимым условием для обеспечения требований по допустимой величине погрешностей позиционирования и отработки траектории перемещаемого груза. Звенья кинематической цепи крано-манипуляторных установок проектируются в виде тонкостенных деталей замкнутого поперечного сечения коробчатого типа (рис. 10) [6, 86-88]. Для обеспечения геометрической стабильности геометрии сечения и обеспечения местной устойчивости листовых элементов внутри звеньев могут устанавливаться продольные и поперечные ребра жесткости (диафрагмы) [86-88]. Часть кинематической цепи, представляющая несколько последовательно расположенных поступательных кинематических пар V класса, выполняется в виде телескопической конструкции, когда последующее звено имеет меньшие габаритные размеры поперечного сечения и заходит вовнутрь предыдущего звена [88]. При этом гидроцилиндры, обеспечивающие относительно поворотное движение смежных звеньев, образующих вращательную кинематическую пару V класса, являются самостоятельным элементом металлоконструкции крано-манипуляторной установки. Необходимость их присоединения к обоим звеньям кинематической пары и представления в виде поступательной пары V класса на основе призматического шарнира приводит к усложнению кинематической схемы за счет появления в ней одного или нескольких замкнутых контуров [89] и, таким образом, к несоответствию ее структуры графу типа дерева.

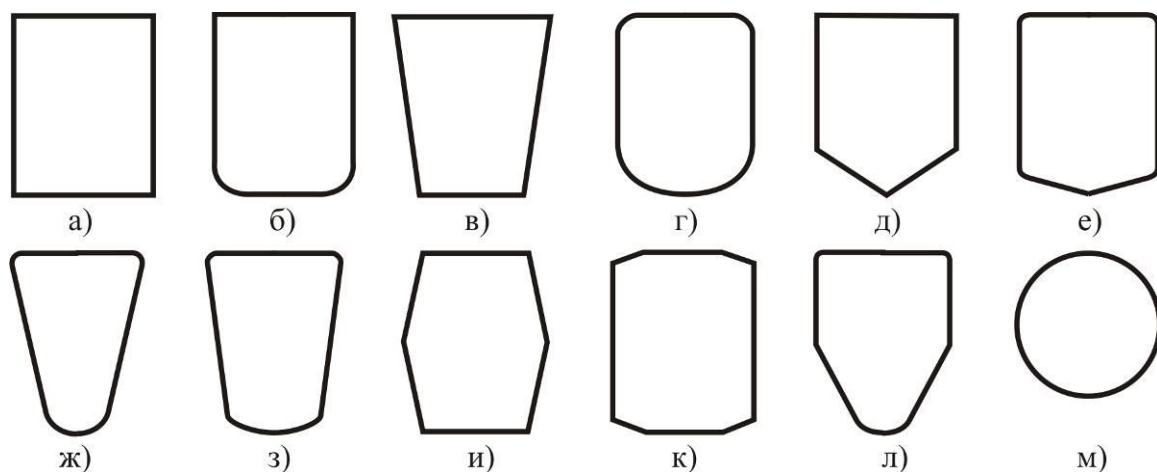


Рис. 10. Профили поперечных сечений звеньев кинематической цепи крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин [6]

Также существенны отличия в конструктивном исполнении шарнирных соединений звеньев кинематической цепи манипуляторов промышленных роботов и грузоподъемных кранов. В случае промышленных роботов с пневматическим или гидравлическим приводом призматические шарниры поступательных кинематических пар V класса чаще всего формируются за счет опирания подвижного звена, являющегося штоком пневмо- или гидроцилиндра, в двух точках – на боковую поверхность отверстия в детали, выполняющей роль торцевой крышки двигателя, и посредством поршня – на внутреннюю поверхность неподвижного звена кинематической пары [84]. Цилиндрические шарниры вращательных кинематических пар V класса чаще всего формируются за счет опирания подвижного звена на две разнесенные подшипниковые опоры (для модулей движения на основе поворотного гидродвигателя поршневого типа)

или на подшипниковую опору и посредством шибера – на внутреннюю поверхность неподвижного звена кинематической пары (для модулей движения на основе поворотного гидродвигателя шибера типа) [84]. В крано-манипуляторных установках призматические шарниры формируются за счет опирания подвижного звена на свободно вращающиеся роликовые опорные устройства [88], а цилиндрические шарниры – за счет соединения двух пар проушин, имеющих соосные отверстия, цилиндрическим шарнирным пальцем [90]. Узлы присоединения приводных гидроцилиндров к звеньям вращательных кинематических пар, представляющие собой цилиндрические шарниры, также формируются за счет соединения пары проушин, приваренных к наружной поверхности звеньев, и хвостовика гидроцилиндра и его штока, имеющих соосные отверстия, цилиндрическим шарнирным пальцем.

### *3. Сравнительный анализ режимов нагружения.*

Отличающиеся условия работы манипуляторов грузоподъемных кранов и промышленных роботов определяют и существенные различия качественных и количественных характеристик режимов нагружения их металлоконструкций. Для большинства промышленных роботов, особенно специализированных по основным видам производств (сварочные, сборочные, перегрузочные в составе обрабатывающих центров, робототехнических комплексов и роботизированных линий и т.п.), графики нагружения оказываются фиксированными в течение достаточно длительного времени эксплуатации как по весу перемещаемого груза, так и по параметрам цикла манипулирования этим грузом – последовательности выполнения движений, их величины и скорости, длительности межоперационных интервалов и др. Изменение графиков нагружения, связанное, как правило, с изменением обслуживаемой роботом технологической операции, требует проведения переналадки и переобучения. Поэтому при проектировании отдельных модулей движения, включая их привод, графики нагружения представляются в фиксированном виде «скорость отработки движения – время отработки движения» для случая манипулирования грузом номинального веса. Примеры подобного подхода содержатся в [83].

Для большинства крано-манипуляторных установок мобильных машин, наоборот, характерно большое разнообразие графиков нагружения, так как даже последовательные во времени циклы перемещения груза могут существенно отличаться как по его весу, так и по параметрам цикла манипулирования этим грузом. Исключение могут составлять лишь крано-манипуляторные установки узко специализированных транспортно-технологических машин. Поэтому графики нагружения грузоподъемных кранов носят выраженный стохастический характер и весьма значительно отличаются как для различных типов грузоподъемного оборудования, так и для кранов аналогичной конструкции в разных условиях эксплуатации. При проектировании крано-манипуляторных установок, как правило, используются типовые графики нагружения [87, 91], которые различны для различных режимов работы грузоподъемного оборудования. Например, обобщенный шестиступенчатый график нагружения (относительной нагрузки на крюке) автомобильных стреловых кранов с номинальной грузоподъемностью 4; 6,3; 10 и 16 т приведен в [87]. Режимы работы, число которых достигает 8-ми (1К...8К) [92], определяются классом нагружения (Q0...Q4) и классом использования (C0...C9) [86, 93]. Как результат, аналогичные крановые металлоконструкции для одинакового номинального веса груза, но различных режимов работы могут заметно отличаться по своим компоновочным и массо-габаритным характеристикам, что не характерно для манипуляторов промышленных роботов. Также в настоящее время в связи с развитием экспериментальной базы автоматизированного мониторинга условий нагружения натуральных конструкций и компьютерной базы имитационного моделирования их работы с практически максимально возможным учетом специфики выполнения конкретных транспортно-технологических операций находит подход к проектированию ответственного грузоподъемного оборудования на основе индивидуальных графиков нагружения. Модели и методики построения таких графиков на основе имитационного компьютерного моделирования представлены, в частности, в работах [91, 94-96].



Наблюдаются существенные различия в условиях и количественных характеристиках опирания манипуляторов промышленных роботов и грузоподъемных кранов, а также в реализующих их опорных конструкциях. На рис. 11 приведена функция  $P(p_c)$  распределения числа типоразмеров манипуляторов роботов в зависимости от величины номинального контактного давления на опорную поверхность  $p_c$  и область значений номинального контактного давления  $p_c$  на грунт для крано-манипуляторных установок мобильных машин на пневмоколесном, гусеничном и специальном шасси. Давление  $p_c$  определялось для манипуляторов роботов по зависимостям

$$p_c = \frac{G_m + G_n}{AB} \quad \text{или} \quad p_c = \frac{4(G_m + G_n)}{\pi D},$$

а для крано-манипуляторных установок – по зависимостям

$$p_c = \frac{G_m + G_n + G_c}{n_a S_a} \quad \text{или} \quad p_c = \frac{G_m + G_n + G_c}{2B_t L_t},$$

где  $A, B$  - габаритные размеры прямоугольного основания робота;  $D$  - диаметр основания робота;  $G_c$  - вес мобильного шасси;  $n_a$  - число аутригеров;  $S_a$  - площадь опорной поверхности аутригера;  $B_t, L_t$  - ширина и длина гусеницы.

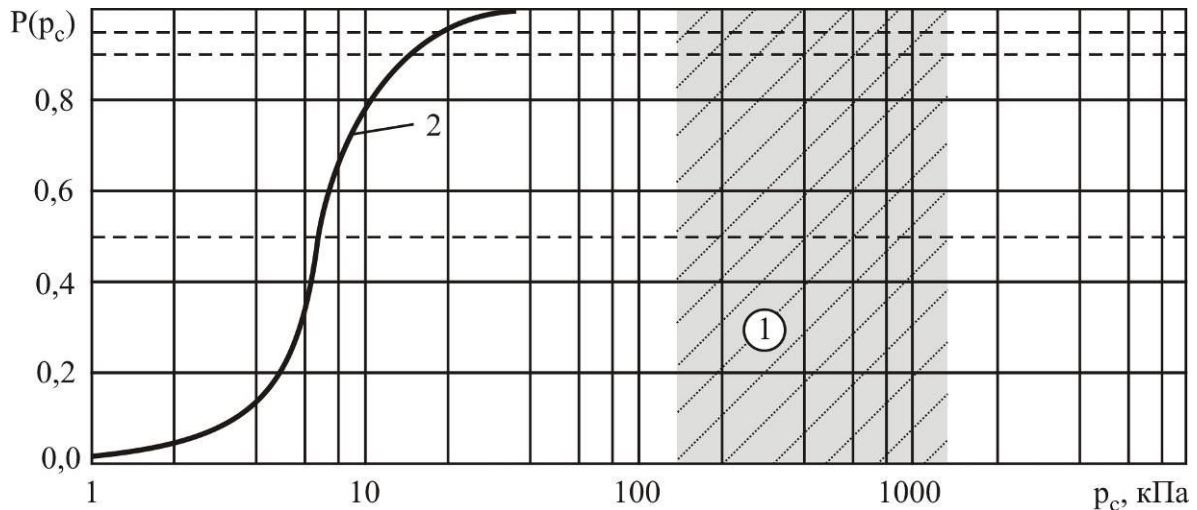


Рис. 11. Распределение числа типоразмеров манипуляторов по величине давления на опорное основание: 1 – область давлений, создаваемых аутригерами кранов-манипуляторов; 2 – давление, создаваемое промышленными роботами

Номинальное контактное давление  $p_c$  характеризует меру возможного влияния физико-механических характеристик, в первую очередь, податливости опорного основания на количественные параметры динамических процессов при эксплуатации манипуляторов. Медианное значение  $p_c$  для манипуляторов промышленных роботов составляет  $\sim 7$  кПа. Менее 10% типоразмеров манипуляторов роботов имеют номинальное контактное давление свыше 15 кПа, менее 5% - свыше 19 кПа. Ширина диапазона изменения  $p_c$  не превышает 35 кПа. Для мобильных машин с расположенными на них крано-манипуляторными установками давление  $p_c$  лежит в диапазоне 150...1500 кПа, хотя для отечественных машин наиболее часто оно соответствует диапазону 200...400 кПа. Следует отметить, что приведенные зависимости для расчета  $p_c$  применительно к мобильным машинам определяют контактное давление из условия равномерного распределения весовой нагрузки на все опорные аутригеры или гусеницы. В реальной ситуации вследствие несимметричного расположения груза относительно

центра тяжести шасси весовая нагрузка распределяется по опорным элементам неодинаково, причем максимальное значение контактного давления  $p_{c,max}$  может превышать номинальное значение  $p_c$  не более, чем в 2 раза. Поэтому приближенно можно считать, что наиболее вероятный диапазон контактных давлений при работе крано-манипуляторных установок составляет 300...700 кПа. Таким образом, разница в величинах контактного давления для манипуляторов грузоподъемных кранов и промышленных роботов составляет 2 порядка, т.е. опорное основание может оказывать существенно большее воздействие на количественные параметры динамических процессов при эксплуатации крано-манипуляторных установок, чем промышленных роботов.

Значение имеют также характер поведения материалов опорной поверхности при их нестационарном деформировании и количественные параметры кривых деформирования. Манипуляторы промышленных роботов с гидроприводом напольного или встроенного исполнения имеют преимущественно стационарную установку, причем в качестве материала опорной поверхности выступает либо бетон, либо сталь. Несмотря на существенные различия вида и параметров кривых деформирования названных материалов, это не имеет практического значения вследствие предельно низкого контактного давления  $p_c$  на опору (рис. 11), при котором ее поведение соответствует абсолютно жесткому телу. Для крано-манипуляторных установок вопрос об особенностях поведения опорного основания оказывается более сложным и носит комплексный характер. Это связано с тем, что в качестве опорного основания выступает двухкомпонентная система «опорная поверхность (грунт)-шасси мобильной машины», каждый из компонентов которой обладает принципиально различными свойствами и количественными параметрами. Деформационные свойства указанной системы формируются как композиция деформационных свойств каждого из компонентов. Деформационные свойства грунтов, определяющиеся их составом и состоянием, характеризуются нелинейными компрессионными кривыми, большим статистическим разбросом механических характеристик и их реологическим поведением [97-99]. Деформационные свойства шасси мобильной машины зависят от его конструкции и вязко-упруго-пластических свойств отдельных элементов – деталей несущей металлоконструкции, амортизаторов, рессор, шарниров, муфт, деталей трансмиссии, зацеплений, колес или гусениц и др. [6, 94, 100]. Однако в целом, принимая во внимание достаточно высокие значения контактного давления  $p_c$  (рис. 11) и реальную деформативность системы «опорная поверхность (грунт)-шасси мобильной машины», опорное основание крано-манипуляторных установок следует рассматривать как физически нелинейное податливое тело, способное к уплотнению в условиях переменной нагруженности аутригеров или гусениц и характеризующееся набором упругих и вязко-пластических параметров.

#### *4. Сравнительный анализ типовых отказов в процессе эксплуатации.*

Сравнительный анализ типовых отказов, характерных для функционирования механических систем манипуляторов промышленных роботов и грузоподъемных кранов, показывает их принципиальное различие.

При эксплуатации промышленных роботов с гидравлическим приводом аварийные ситуации связаны преимущественно со сбоями в электронных цепях систем управления и информационных систем, сбоями в работе гидрооборудования, нарушением требований правил безопасности со стороны обслуживающего персонала при производстве пусконаладочных и ремонтных работ [101-103]. Отказы вследствие дефектности элементов механической части манипуляторов происходят наиболее редко и связаны они, главным образом, с изначальным несоблюдением требований технической документации при изготовлении элементов конструкций, а не с появлением дефектов в ходе эксплуатации [103]. Поэтому не случайно в перечне типовых возможных неисправностей механической системы роботов [102] отсутствуют такие, в основе которых лежит дефектность конструктивных элементов кинематических цепей манипуляторов.

Анализ отказов металлоконструкций грузоподъемных кранов, наоборот, свидетельствует, что основная их причина – дефекты эксплуатационного происхождения, тогда как дефекты технологического происхождения встречаются относительно редко [104]. Для гидравлических кранов-манипуляторов в нормативно-технической документации Ростехнадзора России [105, 106] содержится широкий перечень типовых возможных неисправностей их механической системы, возникающих и развивающихся в процессе эксплуатации до предельно опасного размера по различным физическим механизмам - общей и местной потери устойчивости, хрупкого и усталостного разрушения, остаточных пластических деформаций, коррозии, старения, изнашивания [107, 108]. В их число входят: трещины в сварных швах и основном металле, изгиб стенок и поясов из плоскости, отклонение от прямолинейности и скручивание стержневых элементов, стоек, стрел, башен и т.п., износ сопряженных деталей узлов трения, опор и т.п., выработка отверстий шарнирных соединений, ослабление затяжки или обрыв резьбовых соединений, местные вмятины на поверхности листовых элементов, коррозионное общее и местное (язвенное) утонение металлоконструкций.

Наиболее распространенным и опасным видом эксплуатационных дефектов в металлоконструкциях крано-манипуляторных установок являются трещины различной природы (хрупкие, усталостные, сварочные термические) и различного месторасположения [104-107, 109, 110]. Именно они во многом определяют остаточный ресурс грузоподъемного оборудования и риск возникновения аварийных ситуаций при его эксплуатации, что вообще не характерно для манипуляторов промышленных роботов.

В процессе эксплуатации крано-манипуляторных установок из-за специфической конструкции цилиндрических шарниров узлов соединения звеньев вращательных кинематических пар V класса достаточно часто наблюдается возникновение и развитие повреждения проушин в виде прогрессирующего увеличения диаметра их отверстий относительно исходного номинального значения вследствие ударно-фрикционного изнашивания [105] и появление повышенного зазора между поверхностями проушин и шарнирного пальца. Нормируемая нормативно-распорядительными документами Ростехнадзора России допустимая величина зазора оказывается достаточно велика, составляя 2...4 мм [106]. Наличие таких зазоров - источник дополнительных ударных динамических нагрузок при взаимном перемещении звеньев, оказывающих негативное воздействие на динамическое повышение уровня напряженно-деформированного состояния всей металлоконструкции крана-манипулятора, а также (в случае отсутствия гибкого подвеса) и на транспортируемый груз [6, 111, 112]. Согласно расчетам, результаты которых представлены в [90, 111, 112], в случае повышенных зазоров, близких по величине к допустимым, пиковые значения динамических напряжений в звеньях крано-манипуляторных установок в момент соударения шарнирного пальца с проушиной могут в 5...6 раз превышать номинальные, а ускорение перемещаемого груза в этот момент может скачкообразно достигать 18...20 м/с<sup>2</sup>. Повышенные зазоры в сочетании с неравномерным износом отверстий проушин и шарнирных пальцев также приводят к нарушению кинематической точности конструкций крано-манипуляционных установок. Возникающие при этом значительные инерционные силы непрогнозируемого направления могут являться одной из причин появления и развития усталостных трещин в сварных швах и в основном материале металлоконструкции. В то же время, для манипуляторов промышленных роботов наличие повышенных зазоров в шарнирах не является значимым фактором, подлежащим учету с целью оценки его влияния на величину отклонения текущего состояния манипулятора от номинального, хотя они и могут вызывать низкочастотные (0,5...3 Гц) колебания рабочего органа [113]. Это следствие как весьма малого изнашивания опорных поверхностей шарниров из-за низких контактных давлений и широкого применения подшипников качения, так и включения в конструкцию специальных устройств для периодической принудительной выборки зазоров в передаточных цепях [82]. И хотя процедура выборки зазоров целиком направлена на поддержание в заданных пределах погрешностей позиционирования и отработки траектории, она благоприятно сказывается и на поддержании исходного динамического состояния металлоконструкции манипулятора.

Повсеместное использование в металлоконструкциях звеньев крано-манипуляторных установок тонкостенных профилей (рис. 10) является источником достаточно распространенных дефектов – общих и локальных отклонений стенок и поясов звеньев от исходной плоскости в результате потери устойчивости или внешних ударных воздействий [109]. Появление указанных дефектов в процессе эксплуатации грузоподъемного оборудования приводит к повышению общего уровня напряженно-деформированного состояния и перераспределению напряжений по сечению замкнутого профиля в угловые зоны (перегрузка до 50...60% относительно номинальных значений) [114], к существенному снижению критических нагрузок при потере устойчивости и к изменению частот собственных колебаний по сравнению с исходными значениями [115]. В [105, 106] приведены нормированные значения этих дефектов, при достижении которых дальнейшая эксплуатация крано-манипуляторных установок запрещена и требуется проведение ремонтных мероприятий. Как показывает проведенный в [116] анализ, в наиболее нагруженных элементах конструкции, таких как звенья, которые испытывают напряжения в пределах не менее 50...80% величины предела текучести материала, локальные дефекты типа вмятин недопустимы по условию прочности.

За редким исключением, крано-манипуляторные установки мобильных транспортно-технологических машин эксплуатируются на открытом воздухе и подвержены длительному негативному воздействию таких атмосферных явлений, как низкая или высокая температура воздуха, резкие суточные колебания его температуры, атмосферные осадки, обледенение, ветер. Такие условия эксплуатации обуславливают проявление коррозионных процессов в местах нарушения защитного лакокрасочного покрытия, что вызывает с течением времени общую, локальную или язвенную потерю материала с наружной или внутренней поверхности тонкостенных металлоконструкций звеньев [104, 105, 107]. Особую опасность имеют коррозионные повреждения внутренних полостей звеньев коробчатого поперечного сечения, мест резкого изменения конфигурации конструктивных элементов, узлов сопряжения нескольких элементов с образованием труднодоступных полостей и углублений, поверхностей зазоров и щелей при неплотном прилегании сопрягаемых элементов, сварных соединений с прерывистыми швами [117]. Мониторинг состояния крановых металлоконструкций показывает, что линейная (по толщине конструктивного элемента) скорость распространения коррозионных повреждений в нормальных условиях эксплуатации составляет 0,03...0,2 мм/год [110]. В слабо- и среднеагрессивных условиях эксплуатации (химические производства, морской климат, повышенные температура и влажность) скорость коррозии может быть заметно выше. Коррозионное утонение поперечных сечений металлоконструкций звеньев вызывает постепенный рост уровня напряжений и деформаций в конструкциях, снижение их сопротивления общей и местной потере устойчивости и трещиностойкости, уменьшение частот собственных колебаний [104, 118]. Язвенная коррозия приводит к значительной локальной концентрации напряжений в зоне повреждения материала (коэффициент концентрации напряжений до 2,5...3), поэтому дефекты типа коррозионных язвин поверхности недопустимы в таких нагруженных элементах конструкций, которые испытывают напряжения в пределах не менее 50...80% величины предела текучести материала [116]. Уменьшение частот собственных колебаний из-за коррозии может оказаться опасным, так как согласно результатам моделирования динамики крано-манипуляторных установок с учетом упругой податливости их звеньев [100], это приводит к сближению частоты колебаний звеньев при движении с низшей собственной частотой металлоконструкции, причем изначальная разница частот и так невелика – частоты имеют один порядок значений.

Очевидно, присутствие в металлоконструкциях значительного числа развивающихся с течением времени дефектов значительных размеров способно оказывать воздействие на изменение количественных характеристик динамического и напряженно-деформированного состояния крано-манипуляторных установок по сравнению с их исходным, бездефектным состоянием. Для повышения достоверности результатов расчета и моделирования крановых манипуляторов требуется учет влияния наиболее значимых дефектов, тогда как для про-

мышленных роботов учет дефектности элементов манипуляторов не представляет практического интереса.

Вследствие высокой значимости влияния эксплуатационных дефектов на уровень технического состояния и безопасной эксплуатации крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин нормативно-распорядительными документами Ростехнадзора России широкий круг указанного оборудования отнесен к опасным техническим устройствам. Контроль за их безопасной эксплуатацией осуществляется на основе единой многоуровневой федеральной системы государственного надзора и производственного контроля. Она предусматривает периодическое проведение экспертных обследований кранов-манипуляторов, исчерпавших нормативный срок эксплуатации, в ходе которых предусмотрен комплексный визуальный и инструментальный контроль металлоконструкции, механизмов и систем кранов, а также оценка остаточного ресурса [106, 117].

*4. Сравнительный анализ подходов к проектированию, методов расчета и математического моделирования.*

При моделировании кинематики и динамики манипуляционных систем промышленных роботов в качестве исходного допущения принимается условие абсолютной жесткости опорного основания [12, 80, 119-121]. Это вполне допустимо и подтверждается приведенной выше оценкой величины контактного давления роботов на опорное основание (рис. 11), а также значениями упругих количественных характеристик материалов основания. Для крано-манипуляторных установок данное допущение в общем случае не соответствует реальной ситуации в связи с более высокими контактными давлениями со стороны мобильных транспортно-технологических машин на грунт (рис. 11), имеющий существенно более низкие деформационные и прочностные свойства, чем бетон или сталь [97]. Поэтому стремление к повышению достоверности моделирования кинематики, динамики и прочности кранов-манипуляторов требует отхода от допущения об абсолютной жесткости опорного основания. Однако учет его податливости основан на учете свойств реальных грунтов, который осложняется выраженным нелинейным характером компрессионных кривых для всех известных видов скального и нескального грунта [99, 122], реологической природой его свойств и значительным стохастическим разбросом количественных характеристик механических свойств даже для одного вида грунта, что обусловлено сочетанием ряда случайных составляющих - процентного содержания основных компонентов, гранулометрического состава, текстуры, состава примесей, степени предварительного уплотнения, пористости, водонасыщения, промерзания, пластичности и др. [97-99]. В диапазоне значений уплотняющего давления на грунт  $p_c \sim 100 \dots 500$  кПа, который характерен для работы большинства гидравлических кранов-манипуляторов с аутригерами или гусеничным движителем (рис. 11), без существенной потери точности расчетов компрессионные кривые грунтов допустимо аппроксимировать линейной зависимостью [98].

Еще одним распространенным допущением, принимаемым при моделировании кинематики и динамики манипуляционных систем промышленных роботов, является допущение о неподвижности опорного основания [12, 119, 120]. Оно отражает тот факт, что подавляющее число манипуляторов с гидравлическим приводом являются стационарно установленными, так как имеют напольное, встроенное или подвесное исполнение. Для крано-манипуляторных установок такое допущение в общем случае не является корректным. Это обусловлено тем, что их опорное основание, расположенное на шасси мобильных машин, во время эксплуатации может совершать перемещения как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях. Источниками таких перемещений могут служить движение мобильной машины, раскачивание плавучего средства на поверхности воды, податливость шасси и грунта, сейсмические воздействия. Отказ от указанного допущения требует адаптации применяющихся методов динамического анализа манипуляторов промышленных роботов путем присоединения к основанию дополнительного шарнира или набора шарниров, обладающих шестью степенями свободы [6, 123].



При моделировании кинематики и динамики манипуляторов промышленных роботов широко используется допущение об идеальности кинематических пар, их конструктивных элементов, шарнирных соединений и передаточных механизмов [121, 124]. Отход от этого допущения связан лишь с учетом наличия люфтов в шарнирах, характеризующихся малыми значениями вследствие их принудительной выборки в процессе периодических технических обслуживаний механических систем роботов, и наличия гибких элементов (цепей, ремней, гибких валов) в конструкции передаточных механизмов. Подобное допущение также широко используется и при моделировании кинематики, динамики и прочности крано-манипуляторных установок [6, 89, 125-127], однако отход от него дополнительно связан с учетом не идеальности кинематических пар и их конструктивных элементов вследствие возникновения и развития эксплуатационных дефектов существенного размера [90, 111, 112]. Более того, указанное допущение оказывается вообще неприемлемым при анализе реального напряженно-деформированного состояния металлоконструкций и оценке остаточного ресурса кранов-манипуляторов в соответствии с требованиями нормативно-распорядительной документации Ростехнадзора России [106, 117].

Для повышения достоверности моделирования кинематики и динамики манипуляторов промышленных роботов и грузоподъемных кранов выполняется учет упругой податливости их конструкций. Однако конечная цель такого учета оказывается разной: для манипуляторов промышленных роботов учет упругой податливости шарниров и звеньев важен с точки зрения обеспечения заданных параметров погрешностей позиционирования и отработки траектории перемещения груза, тогда как для крано-манипуляторных установок он важен с точки зрения формирования динамического напряженно-деформированного состояния металлоконструкций и не превышения его уровнем предельного значения по условиям статической и усталостной прочности. Как показывают результаты экспериментальных исследований [121], упругие свойства конструкций современных роботов обусловлены преимущественно упругостью элементов шарнирных соединений звеньев кинематической цепи и в меньшей степени - упругостью самих звеньев. Для крано-манипуляторных установок наряду с упругостью шарнирных соединений не меньшее значение имеет распределенная упругая податливость длинных тонкостенных звеньев. Как показывают расчеты [100], размах колебаний кинематических и силовых факторов, определяющих динамику и динамическую прочность конструктивных элементов металлоконструкций манипуляционных систем мобильных машин, а также величина их возможного отклонения от решения, полученного для модели с абсолютно жесткими звеньями, оказываются достаточно существенными. При этом упругость звеньев обуславливает наличие переменных виброускорений даже на этапе их установившегося движения, что вызывает появление переменных во времени инерционных нагрузок на металлоконструкцию и необходимость проведения уточненного расчета напряженно-деформированного состояния звеньев и оценки их усталостной прочности с учетом действия этих дополнительных нагрузок. Следует отметить, что учет распределенной упругой податливости звеньев выполняется и для манипуляторов промышленных роботов с целью определения колебаний звеньев в процессе отработки ими движений и оценки динамической погрешности позиционирования [83, 121]. Однако учет упругости звеньев, зазоров и трения в шарнирах дает незначительное отличие результатов моделирования динамики роботов от результатов моделирования динамики системы абсолютно твердых тел с идеальными связями [121].

При исследовании кинематики и динамики манипуляторов промышленных роботов различают так называемые прямые и обратные задачи [80, 119-121, 124]. Прямая задача кинематики заключается в определении траектории движения рабочего органа по заданным обобщенным координатам манипулятора, обратная – в определении требуемых значений обобщенных координат для обеспечения требуемой траектории рабочего органа. Прямая задача динамики подразумевает определение параметров движения (координат, скоростей, ускорений) по заданным усилиям и нагрузкам, обратная - определение необходимых усилий для обеспечения требуемой траектории движения [6, 12]. Таким образом, решение обратных задач лежит в основе программирования траекторий движения манипулятора промышленно-

го робота. Реализация запрограммированных траекторий возможна только благодаря наличию у роботов высокоточных систем управления, которые, как это было отмечено выше, отсутствуют у крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин. Таким образом, для последних решение обратных задач лишено практического интереса, так как траектории не могут быть реализованы при ручном управлении человеком.

При проектировании крано-манипуляторных установок оценке их напряженно-деформированного состояния уделяется более серьезное внимание, чем в случае манипуляторов промышленных роботов. Это следствие ряда причин, рассмотренных выше: более высокого уровня нагруженности элементов металлоконструкции вследствие необходимости обеспечения существенно меньшей удельной материалоемкости, необходимости учета более широкого круга действующих эксплуатационных нагрузок [91] и их расчетных комбинаций [142], а также необходимости учета потенциально возможного негативного влияния возникающих в процессе эксплуатации дефектов на снижение прочности конструкций. Методы синтеза и анализа крановых металлоконструкций постоянно совершенствуются на основе привлечения методов статистического моделирования нагруженности, возможностей современной вычислительной техники, расчета тонкостенных конструкций, оценки общей устойчивости, прогнозирования живучести, многокритериальной оптимизации, определения остаточного ресурса [8, 86, 87]. Для уточненной оценки напряженно-деформированного состояния сложных составных пространственных металлоконструкций, характерных для крано-манипуляторных установок, в практике краностроения в настоящее время широко используется метод конечных элементов и реализующие его универсальные программные пакеты ANSYS, NX Nastran, NE Nastran, MSC.Patran/Nastran, Pro/MECHANICA и др. [137-141].

Для современного машиностроения важным направлением совершенствования конструкций машин является их оптимальное проектирование [128, 129]. Применительно к грузоподъемным машинам основными целями их оптимизации являются снижение материалоемкости несущих металлоконструкций при соблюдении комплекса конструктивных, прочностных, жесткостных и эксплуатационных требований, сокращение эксплуатационных расходов, повышение производительности и энергоэффективности кранового оборудования. К настоящему времени разработан и используется на практике целый ряд методов одно- и многокритериального оптимального проектирования механизмов и металлоконструкций грузоподъемных машин различных типов, в том числе, ориентированных на оптимизацию гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин общего назначения [94, 126, 130-132] и специализированных машин, в частности, лесопромышленных машин [133, 134]. Основной целью оптимального проектирования манипуляторов промышленных роботов является оптимизация их движений с позиций повышения быстродействия и точности позиционирования. Для достижения указанной цели разработан ряд методов одно- и многокритериальной оптимизации, позволяющих установить такие оптимальные характеристики манипуляторов, как режимы управления манипуляционными роботами [121], компоновка роботов модульного типа [81], распределение масс между звеньями кинематической цепи [135], параметры приводных устройств [136].

#### **Выводы.**

1. Основные технические характеристики крано-манипуляторных установок и манипуляторов промышленных роботов, отражающие их грузовые и геометрические свойства, выражаются аналогичными физическими показателями. Однако нельзя говорить об их количественном соответствии. Абсолютные и относительные значения основных технических характеристик манипуляторов, определяющих грузовые и грузо-моментные параметры кранов и роботов, значительно отличаются по величине, причем отличия составляют, как правило, 2...3 порядка. Таким образом, по аналогии с влиянием размеров машиностроительных конструкций на механические свойства конструкционных материалов и их прочностные характеристики, выражаемого так называемым «масштабным фактором», следует ввести понятие масштабного фактора применительно к техническим характеристикам манипуляторов.

Его необходимо принимать во внимание при проектировании и моделировании гидравлических крано-манипуляторных установок.

2. Следствием наличия масштабного фактора, связанного с конструктивными размерами манипуляторов, является необходимость учета при проектировании металлоконструкций гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин существенно меньшей удельной материалоемкости, что, как следствие, обуславливает необходимость проведения их более детального прочностного анализа с привлечением методов статистического моделирования нагруженности, расчета тонкостенных конструкций, оценки общей устойчивости, прогнозирования живучести, многокритериальной оптимизации, определения остаточного ресурса. Использование указанных методов при проектировании манипуляторов промышленных роботов также выполняется в достаточном объеме, однако основную роль играют расчеты на жесткость с учетом динамических эффектов от перемещения звеньев и транспортируемого груза с целью обеспечения требуемой точности отработки пространственной траектории движения груза и получения требуемой точности позиционирования в характерных точках этой траектории.

3. Существенно меньшая по сравнению с манипуляторами промышленных роботов относительная собственная масса крано-манипуляторных установок конструктивно реализуется путем проектирования их звеньев с поперечными сечениями, имеющими уменьшенные площади и повышенные значения моментов инерции, т.е. путем использования тонкостенных (преимущественно, коробчатого сечения) профилей. Такие звенья, как правило, уже нельзя рассматривать как абсолютно жесткие, что является общепринятым допущением при проведении динамического анализа манипуляционных систем промышленных роботов.

4. Еще одним следствием наличия масштабного фактора, связанного с конструктивными размерами манипуляторов, и широким спектром возможных условий их эксплуатации является необходимость учета при проектировании металлоконструкций гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин ряда внешних эксплуатационных нагрузок, как правило, не представляющих существенного значения для небольших по размерам звеньев манипуляторов промышленных роботов. В их число входят нагрузки от подвижного основания, ветровые, сейсмические, температурные, технологические, испытательные и специальные нагрузки на элементы металлоконструкции и груз. Вследствие значительной длины и площади поверхности звеньев крано-манипуляторных установок они могут достигать значительных величин, сравнимых с величиной нагрузок от веса транспортируемого груза и собственного веса элементов металлоконструкции, а также инерционных весовых нагрузок. Необходимость учета достаточно большого числа эксплуатационных нагрузок, отличающихся характером изменения во времени, величиной, условиями возникновения и приложения, обуславливает необходимость проведения при проектировании крано-манипуляторных установок прочностных и жесткостных расчетов для нескольких различных расчетных сочетаний нагрузок с рассмотрением нескольких предельных состояний.

5. Конструктивная реализация звеньев и шарниров узлов соединения звеньев кинематических цепей манипуляторов в случае промышленных роботов и в случае крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин является принципиально различной. Это обуславливает необходимость использования различающихся методик конструирования и расчета напряженно-деформированного состояния элементов металлоконструкций, а также использования различающихся подходов к постановке задачи оптимального проектирования указанных манипуляторов.

6. Относительно более высокий уровень напряженного состояния в металлоконструкциях крано-манипуляторных установок по сравнению с металлоконструкциями манипуляторов промышленных роботов, близкий к уровню несущей способности конструкции, более разнообразные и менее качественные условия эксплуатации обуславливают обязательное возникновение и развитие во времени повреждений и дефектов различной природы – общей и местной потери устойчивости, хрупкого и усталостного разрушения, остаточных пластических деформаций, коррозии, изнашивания. Как результат, значительную часть своего нор-

мативного срока эксплуатации крано-манипуляторные установки функционируют в условиях присутствия значительного числа указанных повреждений, характерные размеры которых с течением времени могут приближаться к предельно допустимым значениям по условиям обеспечения работоспособности конструкции, что приводит к нарастающему несоответствию реальных и паспортных характеристик установок. Учет этого явления требует проведения специального анализа влияния повреждений на количественные показатели крано-манипуляторных установок и оценки их изменения во времени. На этапе проектирования грузоподъемного оборудования подобный анализ позволяет оценить степень возможного воздействия наиболее опасных повреждений на показатели надежности конструкции и разработать адекватные защитные конструкторско-технологические мероприятия. На этапе эксплуатации транспортно-технологических машин при проведении технических и экспертных обследований подобный анализ позволяет провести оценку текущего функционального состояния крано-манипуляторных установок и величины их остаточного ресурса, а также определить объем и содержание необходимых ремонтно-восстановительных мероприятий, скорректировать при необходимости график планово-предупредительных ремонтов.

7. В отличие от промышленных роботов, для кранов-манипуляторов не является критичным обеспечение жестких требований по быстродействию и согласованности во времени выполнения смежных технологических операций, а также точности позиционирования и пространственной ориентации груза в конечной точке и в промежуточных точках вдоль требуемой траектории манипулирования. Это обстоятельство обуславливает ряд отличий в конструктивном исполнении механических систем манипуляторов, системах управления и подходах к моделированию кинематики, динамики и прочности. Как следствие, для крано-манипуляторных установок характерно изготовление звеньев кинематической цепи из стальных тонкостенных профилей, имеющих поперечные сечения с малыми площадями и большими моментами инерции; допущение образования и развития в металлоконструкциях эксплуатационных дефектов достаточно значительной величины, снижающих исходные жесткостные, прочностные и вибрационные характеристики; применение более простых и дешевых систем ручного управления перемещением груза с помощью человека-оператора; необходимость учета при моделировании кинематики и динамики реальных конструктивных, технологических и режимных свойств взаимосвязанной системы «опорная поверхность-шасси машины-манипулятор»; необходимость выполнения значительно большего по объему комплекса проверочных прочностных расчетов, включая уточненные расчеты динамического напряженно-деформированного состояния металлоконструкций в условиях действия значительного числа эксплуатационных нагрузок различной природы и случайной величины.

8. В настоящее время наиболее адекватным подходом к проектированию крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин общего и специального назначения и к моделированию их кинематики, динамики и прочности, который в максимальной степени позволит органично учесть влияние множества значимых параметров, так или иначе накладывающих отпечаток на эксплуатацию гидравлических кранов-манипуляторов, является подход на основе комплексного рассмотрения физических процессов в единой системе «Опорная поверхность-шасси машины-манипулятор-груз-внешние воздействия».

#### **Список литературы.**

1. Новоселов, В. Время перемен. Российский рынок гидроманипуляторов / В. Новоселов // Строительная техника и технологии. – 2013. – №4. – С. 98-110.
2. Бандурин, Р.А. Рынок кранов-манипуляторов в России / Р.А. Бандурин // Проблемы современной экономики. – 2015. - № 26. – С. 138-142.
3. Козырев, Ю.Г. Применение промышленных роботов / Ю.Г. Козырев. – М.: КноРус, 2011. – 488 с.
4. Попов, Е.П. Основы робототехники / Е.П. Попов, Г.В. Письменный. – М.: Высшая школа, 1990. – 224 с.

5. Novoselov V. Go-ahead times. Russian market of hydraulic manipulators, *СТТ*, 2007, No. 5, pp. 140-144.
6. Лагерев, А.В. Динамико-прочностной анализ гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин / А.В. Лагерев, А.А. Мильто, И.А. Лагерев. – Брянск: РИО БГУ, 2015. – 186 с.
7. Промышленный робот [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленный\\_робот](https://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленный_робот).
8. Лагерева, Э.А. Научные проблемы проектирования гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин / Э.А. Лагерева // Достижения вузовской науки. – 2015. - № 14. - С. 101-106.
9. Козырев, Ю.Г. Промышленные роботы / Ю.Г. Козырев. – М.: Машиностроение, 1988. – 392 с.
10. Василенко, Н.В. Основы робототехники / Н.В. Василенко, К.Д. Никитин, В.П. Пономарев, А.Ю. Смолин. – Томск: МГП «Раско», 1993. – 475 с.
11. Executive Summary: World Robotics 2014. Industrial Robots. IFR, International Federation of Robotics.
12. Крахмалев, О.Н. Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ, 2012. – 200 с.
13. Лагерев, И.А. Сравнительный анализ характеристик кранов-манипуляторов отечественных и зарубежных производителей / И.А. Лагерев // Подъемно-транспортное дело. – 2016. - № 1-2. – С. 8-10.
14. Binderberger Maschien bau GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.binderberger.com/web/kraene-greifer>.
15. Гидроманипуляторы EPSILON [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.v-kran.ru/epsilon.htm>.
16. Palfinger [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.palfinger.com](http://www.palfinger.com).
17. Гидроманипуляторы Penz [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.v-kran.ru/penz.htm>.
18. ОАО «Мозырский машиностроительный завод» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mozyrmash.by/>.
19. Penny Hydraulics Vehicle Mounted Equipment. Cranes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.pennyhydraulicsvehiclemountedequipment.com/vehicle\\_mounted\\_products.php?cid=1](http://www.pennyhydraulicsvehiclemountedequipment.com/vehicle_mounted_products.php?cid=1).
20. Atlas. Cranes & Excavators. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.atlas-machines.ru/all\\_catalog](http://www.atlas-machines.ru/all_catalog).
21. MKG Maschinen und Kranbau GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.mkg-cranes.com](http://www.mkg-cranes.com).
22. HMF [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.hmf.dk](http://www.hmf.dk).
23. Amco Veba [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.amcoveba.it](http://www.amcoveba.it).
24. Cormach [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.cormach.com](http://www.cormach.com).
25. Effer. Cranes & People. Автомобильные КМУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://effer.su/production-effer.html>.
26. Fassi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.fassi.com](http://www.fassi.com).
27. Ferrari [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.flliferrari.it](http://www.flliferrari.it).
28. PM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.pm-group.eu](http://www.pm-group.eu).
29. Bigmax [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.bigmaxcranes.com](http://www.bigmaxcranes.com).
30. XCMG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.xcmg.com](http://www.xcmg.com).
31. Auto Crane [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.autocrane.com](http://www.autocrane.com).
32. IMT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.imt.com](http://www.imt.com).
33. Jomas [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.jomac ltd.com](http://www.jomac ltd.com).



34. Maxilift Cranes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.maxiliftcobracranes.com](http://www.maxiliftcobracranes.com).
35. Fisher Crane Co. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fischercrane.com>.
36. Petersen Industries [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.petersenind.com](http://www.petersenind.com).
37. Prentice [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.prenticeforestry.com](http://www.prenticeforestry.com).
38. Serco Loaders [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.sercoloaders.com](http://www.sercoloaders.com).
39. Stellar Industries [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.stellarindustries.com](http://www.stellarindustries.com).
40. Terex Cranes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.terex.com/cranes/ru/index.htm#products>.
41. Гидроманипуляторы Kesla (Foresteri) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.v-kran.ru/foresteri.htm>.
42. Cranab Slagkraft [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cranab.se/>.
43. HIAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.hiabus.com](http://www.hiabus.com).
44. Гидроманипуляторы V-KRAN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.v-kran.ru/vkran.htm>.
45. Kanglim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.kanglim.com](http://www.kanglim.com).
46. Dongyang Mechatronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dy.co.kr>.
47. Soosan [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.soosanheavy.com](http://www.soosanheavy.com).
48. Tadano [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.tadano.com](http://www.tadano.com).
49. Unic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.uniccrane-global.com](http://www.uniccrane-global.com).
50. Kato [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.kato-works.co.jp/eng](http://www.kato-works.co.jp/eng).
51. Maeda [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.maedaminicranes.co.uk](http://www.maedaminicranes.co.uk).
52. ShinMaywa [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.shinmaywa.co.jp/english](http://www.shinmaywa.co.jp/english).
53. ЗАО «БАКМ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.bakm.ru](http://www.bakm.ru).
54. ООО «Велмаш С» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.velmash.com](http://www.velmash.com).
55. ЗАО «Дизель-Ремонт»: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://diesel-remont.ru>.
56. ЗАО «Златмаш» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.zlatmash.ru](http://www.zlatmash.ru).
57. ЗАО «ИНМАН» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.inman.ru](http://www.inman.ru).
58. ОАО «Стройдормаш» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.sdm-zavod.ru](http://www.sdm-zavod.ru).
59. ОАО «Майкопский машиностроительный завод» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.maykop-mmz.com](http://www.maykop-mmz.com).
60. ОАО «Соломбальский машиностроительный завод» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.smz.ru](http://www.smz.ru).
61. ОАО «Клинцовский автокрановый завод» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oaokaz.ru/>.
62. ОАО «Галичский автокрановый завод» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.gakz.ru](http://www.gakz.ru).
63. ОАО «Автокран» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.ivmarka.ru/ru/about/plants/avtokran](http://www.ivmarka.ru/ru/about/plants/avtokran).
64. Роботы KUKA малой грузоподъемности. Каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://belfingroup.com/assets/files/Catalog\\_Kuka/KUKA\\_KUKA\\_small\\_capacity.pdf](http://belfingroup.com/assets/files/Catalog_Kuka/KUKA_KUKA_small_capacity.pdf).
65. KUKA Robotics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kuka-robotics.com/en/company/>.
66. Epson Robots [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.robots.epson.com](http://www.robots.epson.com).
67. Промышленные роботы Denso [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://robotforum.ru/promyishlennyye-robotyi/denso.html>.
68. Промышленные роботы Universal Robots [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://robotforum.ru/promyishlennyye-robotyi/universal-robots.html>.

67. AEB Robotics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.aeb-robotics.com](http://www.aeb-robotics.com).
68. Comau Robotics Product Range [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.comau.com/Download/robot/BROCHURE/EN\\_brochure\\_robots.pdf](http://www.comau.com/Download/robot/BROCHURE/EN_brochure_robots.pdf).
69. Промышленные роботы Adept [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://robotforum.ru/promyishlennyye-roboty/adept.html?item\\_start=0](http://robotforum.ru/promyishlennyye-roboty/adept.html?item_start=0).
70. KC Robotics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kcrobotics.com/industrial-robots/>.
71. ABB Robotics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.abb.ru/product/ru/9AAC100735.aspx>.
72. Роботы FANUC. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dmliefer.ru/sites/default/files/robot-ru.pdf>.
73. Kawasaki Robotics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://robotics.kawasaki.com/ja1/>.
74. Промышленные роботы MELFA. Каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://idrb.ru/MITSUBISHI\\_ELECTRIC/Industrial\\_Robots.pdf](http://idrb.ru/MITSUBISHI_ELECTRIC/Industrial_Robots.pdf).
75. Nachi Robots. Catalog 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://lehmann-rus.com/files/NACHI-Robot\\_2012RU.pdf](http://lehmann-rus.com/files/NACHI-Robot_2012RU.pdf).
76. DAIHEN Corporation. Робототехника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://daihen.ru/robots.html>.
77. RoboMatic. Industrial Robots [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.robomatic.ru/robots/promyishlennyye-roboty-po-proizvoditelyam/panasonic-yaponiya>.
78. YASKAWA. Роботы Motoman [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.motoman.com.ru/ru/produkcija/roboty/?no\\_cache=1](http://www.motoman.com.ru/ru/produkcija/roboty/?no_cache=1).
79. ГОСТ 25685-83. Роботы промышленные. Классификация. – Введ. 1984-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 4 с.
80. Механика промышленных роботов: В 3 кн. / Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн. 1: Кинематика и динамика / Е.И. Воробьев, С.А. Попов, Г.И. Шевелева. – М.: Высш. шк., 1988. – 304 с.
81. Воробьев, Е.И. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа / Е.И. Воробьев, Ю.Г. Козырев, В.И. Царенко; Под общ. ред. Е.П. Попова. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
82. Механика промышленных роботов: В 3 кн. / Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн. 2: Расчет и проектирование механизмов / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. – М.: Высш. шк., 1988. – 367 с.
83. Механика промышленных роботов: В 3 кн. / Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн. 3: Основы конструирования / Е.И. Воробьев, А.В. Бабич, К.П. Жуков, С.А. Попов, Ю.И. Семин. – М.: Высш. шк., 1989. – 383 с.
84. Промышленные роботы в машиностроении: Альбом схем и чертежей / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1986. – 140 с.
85. Лагерев, А.В. Проектирование насосных гидроприводов подъемно-транспортных машин / А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2006. – 232 с.
86. Соколов, С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / С.А. Соколов. – СПб.: Политехника, 2005. – 423 с.
87. Вершинский, А.В. Строительная механика и металлические конструкции / А.В. Вершинский, М.М. Гохберг, В.П. Семенов; под общ. ред. М.М. Гохберга. – Л.: Машиностроение, 1984. – 231 с.
88. Вайнсон, А.А. Подъемно-транспортные машины строительной промышленности: атлас конструкций / А.А. Вайнсон. – М.: Машиностроение, 1976. – 152 с.
89. Лагерев, А.В. Универсальная методика динамического анализа гидравлических кранов-манипуляторов / А.В. Лагерев, А.А. Мильто, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. - № 3. – С. 24-31.

90. Лагерев, И.А., Мильто А.А., Лагерев А.В. Эффективность упругого демпфирования в шарнирных соединениях стрел крано-манипуляторных установок при повышенных зазорах / И.А. Лагерев, А.А. Мильто, А.В. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2016. - №1. – С. 18-36.
91. Лагерев, А.В. Нагруженность подъемно-транспортной техники / А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2010. – 180 с.
92. ГОСТ 25546-82. Краны грузоподъемные. Режимы работы. – Введ. 1986-01-01. – М.: Госстандарт: Изд-во стандартов, 2002. – 5 с.
93. Александров, М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 552 с.
94. Лагерев, И.А. Оценка динамической нагруженности и оптимизация трехзвенных гидравлических кранов манипуляторов транспортно-технологических машин для сварки трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Лагерев Игорь Александрович. – Брянск, 2011. – 197 с.
95. Брауде, В.И. Надежность подъемно-транспортных машин / В.И. Брауде, Л.Н. Семенов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 183 с.
96. Лагерев, И.А. Моделирование факторов нагруженности металлоконструкции мостового крана на основе сетевой имитационной модели / И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – №2. – С. 74-81.
97. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1971. – 368 с.
98. Ухов, С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский, З.Г. Тер-Мартirosян, С.Н. Чернышов. - М.: АСВ, 1994. – 527 с.
99. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с.
100. Ковальский, В.Ф. Математическое моделирование динамики манипуляционной системы мобильной транспортно-технологической машины с учетом упругости звеньев / В.Ф. Ковальский, И.А. Лагерев // Известия МГТУ «МАМИ». – 2016. - № 3.
101. Алексеев, А.П. Промышленный робот «Универсал-15»: Устройство, наладка, обслуживание / А.П. Алексеев, В.П. Степанов. – М.: Машиностроение, 1990. – 96 с.
102. Малахов, М.В. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт промышленных роботов / М.В. Малахов, Н.А. Нейбергер, Г.Н. Сидорин. – М.: Металлургия, 1989. – 224 с.
103. Пашков, В.М. Промышленный робот «Циклон-5»: Устройство, наладка, обслуживание / В.М. Пашков. – М.: Машиностроение, 1988. – 80 с.
104. Пустовой, В.Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса / В.Н. Пустовой. – М.: Транспорт, 1992. – 256 с.
105. Справочник по техническому обслуживанию, ремонту и диагностированию грузоподъемных кранов: в 2-х т. Т.1 / В.С. Котельников, Н.А. Шишков, А.С. Липатов, Л.А. Невзоров, А.М. Горлин. – М.: Госгортехнадзор России, 1996. – 392 с.
106. Методические рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Часть 2. Краны стреловые общего назначения и краны-манипуляторы грузоподъемные. РД 10-112-2-09. – Введены в действие с 01.05.2009. – М.: ООО «НИИКраностроения», 2009. – 120 с.
107. Сероштан, В.И. Диагностирование грузоподъемных машин / В.И. Сероштан, Ю.С. Огарь, А.И. Головин, А.И. Глазун, М.И. Селиванов, В.В. Рахаев; Под ред. В.И. Сероштана, Ю.С. Огаря. – М.: Машиностроение, 1992. – 192 с.
108. Ивашков, И.И. Монтаж, эксплуатация и ремонт подъемно-транспортных машин / И.И. Ивашков. – М.: Машиностроение, 1981. – 335 с.
109. Справочное пособие по ремонту металлоконструкций грузоподъемных кранов / А.А. Короткий, М.Н. Хальфин, Б.Ф. Иванов, А.С. Логвинов. – Новочеркасск: НГТУ, 1994. – 180 с.
110. Концевой, Е.М. Ремонт крановых металлоконструкций / Е.М. Концевой, М.А. Розенштейн. – М.: Машиностроение, 1979. – 206 с.

111. Лагерев, И.А. Динамика гидравлических крано-манипуляторных установок при наличии зазоров в шарнирных соединениях звеньев / И.А. Лагерев, А.А. Мильто, А.В. Лагерев // Приводы и компоненты машин. – 2015. – № 2. – С. 2-4.
112. Лагерев, И.А. Снижение ударной нагрузки, вызываемой люфтом в шарнирных соединениях звеньев крано-манипуляторных установок / И.А. Лагерев, А.А. Мильто, А.В. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – № 2. – С. 37-43.
113. Кнауэр, И.Б. Промышленный робот «Универсал-5.02»: Устройство, наладка, обслуживание / И.Б. Кнауэр, В.В. Слепцов. – М.: Машиностроение, 1988. – 48 с.
114. Грачев, А.А. Устойчивость тонкостенных элементов крановых конструкций: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Грачев Алексей Андреевич. – СПб., 2013. – 21 с.
115. Калинин, В.С. Устойчивость, прочность и колебания элементов судовых конструкций / В.С. Калинин. – Л.: Судостроение, 1987. – 304 с.
116. Лагерев, А.В. Характеристики прочности стержней ферменных металлоконструкций кранов типа КБ-572 с дефектами вмятины и язвенной коррозии / А.В. Лагерев, Н.С. Парфенов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 3. – С. 47-55.
117. Рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Общие положения. РД 10-112-1-04. – Одобрены Федеральной службой по технологическому надзору, протокол от 26 апреля 2004 г.
118. Данилов, А.С. Диагностика повреждаемости металлических конструкций грузоподъемных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Данилов Александр Сергеевич. – Тула, 2010. 160 с.
119. Шахинпур, М. Курс робототехники / М. Шахинпур. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
120. Фу, К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
121. Черноусько, Ф.Л. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация / Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий. – М.: Наука, 1989. – 368 с.
122. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – Введ. 2013-01-01. – М.: Стандартинформ, 2013.
123. Лагерев, А.В. Методика исследования динамики и прочности гидравлических крано-манипуляторных установок на подвижном шасси / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев, А.А. Мильто // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – № 1. – С. 43-48.
124. Попов, Е.П. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы / Е.П. Попов, А.Ф. Верещагин, С.Л. Зенкевич. – М.: Наука, 1980.
125. Lagerev, A.V Preliminary Dynamics and Stress Analysis of Articulating Non-Telescoping Boom Cranes Using Finite Element Method / A.V. Lagerev, I.A. Lagerev, A.A. Milto // International Review on Modelling and Simulations. – 2015. – Vol. 8. – №2. – P. 223-226. – <http://dx.doi.org/10.15866/iremos.v8i2.5713>.
126. Lagerev, A.V. Tool for Preliminary Dynamics and Stress Analysis of Articulating Cranes / A.V. Lagerev, I.A. Lagerev, A.A. Milto // International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.M.O.S.). – 2014. – Vol. 7. – № 4. – P. 644-652. – DOI <http://dx.doi.org/10.15866/iremos.v7i4.2045>.
127. Лагерев, А.В. Универсальная методика определения напряжений в стержневых элементах конструкций гидравлических кранов-манипуляторов в задачах динамики / А.В. Лагерев, А.А. Мильто, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – №4. – С. 21-26.
128. Лагерев, И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2013. – 228 с.
129. Хог, Э. Прикладное оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции / Э. Хог, Я. Арора. – М.: Мир, 1983. – 478 с.

130. Лагерев, А.В. Оптимизация конструкции крана-манипулятора машины для сварки магистральных трубопроводов при модернизации / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Подъемно-транспортное дело. – 2013. – №1. – С. 4-7.
131. Лагерев, Е.А. Оптимальное проектирование гидравлических механизмов поворота шибберного типа крано-манипуляторных установок мобильных грузоподъемных машин / Е.А. Лагерев, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 57-63.
132. Лагерев, А.В. Оптимальное проектирование гидравлических механизмов поворота поршневого типа крано-манипуляторных установок многоцелевых транспортно-технологических машин / А.В. Лагерев, Е.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. - № 1. - С. 37-45.
133. Гасымов, Г.Ш. Нагруженность валочно-пакетирующих машин на постепенных и выборочных рубках леса / Г.Ш. Гасымов, В.А. Александров. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. – 192 с.
134. Емтыль, З.К. Совершенствование кинематики, динамики и конструкции лесопромышленных гидроманипуляторов: автореферат дис. ... докт. техн. наук: 05.21.01 / Емтыль Зауркан Камболетович. – Воронеж, 2002. – 35 с.
135. Егорова, О.В. Оптимизация конструктивных параметров промышленных роботов позиционного типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.18 / Егорова Ольга Владимировна. – М., 1984. – 193 с.
136. Боровин, Г.К. Динамика и оптимизация систем управления движением роботов с исполнительными электромеханическими и гидравлическими приводами: дис. ... докт. физ.-мат. наук: 01.02.01 / Боровин Геннадий Константинович. – М., 1994. – 410 с.
137. Лагерев, И.А. Расчеты грузоподъемных машин методом конечных элементов / И.А. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2013. – 116 с.
138. Вершинский, А.В. Численный анализ металлических конструкций подъемно-транспортных машин / А.В. Вершинский, И.А. Лагерев, А.Н. Шубин, А.В. Лагерев. – Брянск: РИО БГУ, 2014. – 186 с.
139. Вершинский, А.В. Расчет металлических конструкций подъемно-транспортных машин методом конечных элементов / А.В. Вершинский, И.А. Лагерев, А.Н. Шубин, А.В. Лагерев. – Брянск: РИО БГУ, 2015. – 210 с.
140. Шимкович, Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows / Д.Г. Шимкович. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 448 с.
141. Гончаров, П.С. NX для конструктора-машиностроителя / П.С. Гончаров. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 498 с.
142. ГОСТ 32579.1-2013. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Ч. 1. Общие положения. – Введ. 2015-06-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 36 с.

#### **Сведения об авторе**

Лагерев Игорь Александрович - кандидат технических наук, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», *lagerev-bgu@yandex.ru*.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF HYDRAULIC CRANE-MANIPULATING INSTALLATIONS TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES AND INDUSTRIAL ROBOTS HYDRAULIC MANIPULATORS

Lagerev I.A.

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University

The article presents results of comparative analysis of hydraulic crane-manipulator installations of mobile transport and technological machines and hydraulic manipulators of industrial robots. The comparative analysis is based on consideration of a wide range of types and sizes indicated technical devices of both domestic and foreign production: 1580 structures of cranes and more than 450 structures of industrial robots. It was performed in the following areas: functional purpose and basic technical characteristics; a design; the loading conditions of the model and failures in operation process; approaches to the design, calculation methods and mathematical modeling. The conclusions about the degree of similarity and the degree of difference hydraulic crane-manipulator installations of transport and technological machines and hydraulic industrial robot manipulators from the standpoint of their design and modeling occurring in them during operation of dynamic and structural processes.

**Key words:** crane-manipulating installation, transport and technological machine, industrial robot, hydraulic manipulator, comparative analysis, calculation method, loading regime, specifications

### References

1. Novoselov V. Vremya peremen. Rossiyskiy rynek gidromanipulyatorov. *Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii*, 2013, No.4, pp. 98-110.
2. Bandurin R.A. The market for crane-manipulators in Russia [Rynek kranov-manipulyatorov v Rossii]. *Problemy sovremennoy ekonomiki*, 2015, No.26, pp. 138-142.
3. Kozyrev Yu.G. *Primenenie promyshlennykh robotov* [The use of industrial robots]. Moscow, KnoRus, 2011. 488 p.
4. Popov E.P., Pismennyi G.V. *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of robotics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1990. 224 p.
5. Novoselov V. Go-ahead times. Russian market of hydraulic manipulators. *CTT*, 2007, No. 5, pp. 140-144.
6. Lagerev A.V., Milto A.A., Lagerev I.A. *Dinamiko-prochnostnoy analiz gidravlicheskih kranov-manipulyatornykh ustanovok mobilnykh mashin* [Dynamic and mechanical analysis of hydraulic crane-manipulating installations of mobile machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 186 p.
7. *Promyshlenniy robot* (Industrial robot). Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленный\\_робот](https://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленный_робот).
8. Lagereva E.A. The scientific problem of designing hydraulic crane-manipulating installations of mobile transport technological machines. *Dostizheniya vuzovskoy nauki*, 2015, No.14, pp. 101-106.
9. Kozyrev Yu.G. *Promyshlennyye roboty* [Industrial robots]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 392 p.
10. Vasilenko N.V., Nikitin K.D., Ponomarev V.P., Smolin A.Yu. *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of robotics]. Tomsk, MGP "Rasko", 1993. 475 p.
11. Executive Summary: World Robotics 2014. Industrial Robots. IFR, International Federation of Robotics.
12. Krakhmalev O.N. *Matematicheskoe modelirovanie dinamiki manipulyatsionnykh sistem promyshlennykh robotov i kranov-manipulyatorov* [Mathematical modelling of dynamics of manipulation systems of industrial robot and cranes]. Bryansk, BGTU, 2012. 200 p.
13. Lagerev I.A. An characteristics analysis of articulating cranes of domestic and foreign producers. *Podemno-transportnoe delo*, 2016, No. 1-2, pp. 8-10.
14. Binderberger Maschien bau GmbH. Available at: <http://www.binderberger.com/web/kraene-greifer>.
15. Hydromanipulators EPSILON. Available at: <http://www.v-kran.ru/epsilon.htm>.

16. Palfinger. Available at: [www.palfinger.com](http://www.palfinger.com).
17. Hydromanipulators Penz. Available at: <http://www.v-kran.ru/penz.htm>.
18. OAO "Mozyrskiy mashinostroitelnyy zavod". Available at: <http://www.mozyrmash.by/>.
19. Penny Hydraulics Vehicle Mounted Equipment. Cranes. Available at: [http://www.pennyhydraulicsvehiclemountedequipment.com/vehicle\\_mounted\\_products.php?cid=1](http://www.pennyhydraulicsvehiclemountedequipment.com/vehicle_mounted_products.php?cid=1).
20. Atlas. Cranes & Excavators. Available at: [http://www.atlas-machines.ru/all\\_catalog](http://www.atlas-machines.ru/all_catalog).
21. MKG Maschinen und Kranbau GmbH. Available at: [www.mkg-cranes.com](http://www.mkg-cranes.com).
22. HMF. Available at: [www.hmf.dk](http://www.hmf.dk).
23. Amco Veba. Available at: [www.amcoveba.it](http://www.amcoveba.it).
24. Cormach. Available at: [www.cormach.com](http://www.cormach.com).
25. Effer. Cranes & People. Avtomobilnye KMU. Available at: <http://effer.su/production-effer.html>.
26. Fassi. Available at: [www.fassi.com](http://www.fassi.com).
27. Ferrari. Available at: [www.flliferrari.it](http://www.flliferrari.it).
28. PM. Available at: [www.pm-group.eu](http://www.pm-group.eu).
29. Bigmax. Available at: [www.bigmaxcranes.com](http://www.bigmaxcranes.com).
30. XCMG. Available at: [www.xcmg.com](http://www.xcmg.com).
31. Auto Crane. Available at: [www.autocrane.com](http://www.autocrane.com).
32. IMT. Available at: [www.imt.com](http://www.imt.com).
33. Jomac. Available at: [www.jomacLtd.com](http://www.jomacLtd.com).
34. Maxilift Cranes. Available at: [www.maxiliftcobracranes.com](http://www.maxiliftcobracranes.com).
35. Fisher Crane Co. Available at: <http://www.fischercrane.com>.
36. Petersen Industries. Available at: [www.petersenind.com](http://www.petersenind.com).
37. Prentice. Available at: [www.prenticeforestry.com](http://www.prenticeforestry.com).
38. Serco Loaders. Available at: [www.sercoloaders.com](http://www.sercoloaders.com).
39. Stellar Industries. Available at: [www.stellarindustries.com](http://www.stellarindustries.com).
40. Terex Cranes. Available at: <http://www.terex.com/cranes/ru/index.htm#products>.
41. Hydromanipulators Kesla (Foresteri). Available at: <http://www.v-kran.ru/foresteri.htm>.
42. Cranab Slagkraft. Available at: <http://www.cranab.se/>.
43. HIAB. Available at: [www.hiabus.com](http://www.hiabus.com).
44. Hydromanipulators V-KRAN. Available at: <http://www.v-kran.ru/vkran.htm>.
45. Kanglim. Available at: [www.kanglim.com](http://www.kanglim.com).
46. Dongyang Mechatronics. Available at: <http://www.dy.co.kr>.
47. Soosan. Available at: [www.soosanheavy.com](http://www.soosanheavy.com).
48. Tadano. Available at: [www.tadano.com](http://www.tadano.com).
49. Unic. Available at: [www.uniccrane-global.com](http://www.uniccrane-global.com).
50. Kato. Available at: [www.kato-works.co.jp/eng](http://www.kato-works.co.jp/eng).
51. Maeda. Available at: [www.maedaminicranes.co.uk](http://www.maedaminicranes.co.uk).
52. ShinMaywa. Available at: [www.shinmaywa.co.jp/english](http://www.shinmaywa.co.jp/english).
53. ZAO "BAKM". Available at: [www.bakm.ru](http://www.bakm.ru).
54. OOO "Velmarsh S". Available at: [www.velmarsh.com](http://www.velmarsh.com).
55. ZAO "Dizel-Remont". Available at: <http://dizel-remont.ru>.
56. ZAO "Zlatmash". Available at: [www.zlatmash.ru](http://www.zlatmash.ru).
57. ZAO "INMAN". Available at: [www.inman.ru](http://www.inman.ru).
58. OAO "Stroydormash". Available at: [www.sdm-zavod.ru](http://www.sdm-zavod.ru).
59. OAO "Maykopskiy mashinostroitelnyy zavod". Available at: [www.maykop-mmz.com](http://www.maykop-mmz.com).
60. OAO "Solombalskiy mashinostroitelnyy zavod". Available at: [www.smz.ru](http://www.smz.ru).
61. OAO "Klintsovskiy avtokranovyy zavod". Available at: <http://www.oaokaz.ru/>.
62. OAO "Galichskiy avtokranovyy zavod". Available at: [www.gakz.ru](http://www.gakz.ru).
63. OAO "avtokran". Available at: [www.ivmarka.ru/ru/about/plants/avtokran](http://www.ivmarka.ru/ru/about/plants/avtokran).
64. Robots KUKA light-duty. Directory. Available at: [http://belfingroup.com/assets/files/Catalog\\_Kuka/KUKA\\_KUKA\\_small\\_capacity.pdf](http://belfingroup.com/assets/files/Catalog_Kuka/KUKA_KUKA_small_capacity.pdf).



65. KUKA Robotics. Available at: <http://www.kuka-robotics.com/en/company/>.
66. Epson Robots. Available at: [www.robots.epson.com](http://www.robots.epson.com).
67. Industrial robots Denso. Available at: <http://robotforum.ru/promyshlennyye-robotyi/denso.html>.
68. Industrial robots Universal Robots. Available at: <http://robotforum.ru/promyshlennyye-robotyi/universal-robots.html>.
67. AEB Robotics. Available at: [www.aeb-robotics.com](http://www.aeb-robotics.com).
68. Comau Robotics Product Range. Available at: [http://www.comau.com/Download/robot/BROCHURE/EN\\_brochure\\_robots.pdf](http://www.comau.com/Download/robot/BROCHURE/EN_brochure_robots.pdf).
69. Industrial robots Adept. Available at: [http://robotforum.ru/promyshlennyye-robotyi/adept.html?item\\_start=0](http://robotforum.ru/promyshlennyye-robotyi/adept.html?item_start=0).
70. KC Robotics. Available at: <http://www.kcrobotics.com/industrial-robots/>.
71. ABB Robotics. Available at: <http://www.abb.ru/product/ru/9AAC100735.aspx>.
72. Robots FANUC. Directory. Available at: <http://dmliefer.ru/sites/default/files/robot-ru.pdf>.
73. Kawasaki Robotics. Available at: <https://robotics.kawasaki.com/ja1/>.
74. Industrial robots MELFA. Directory. Available at: [http://idrb.ru/MITSUBISHI\\_ELECTRIC/Industrial\\_Robots.pdf](http://idrb.ru/MITSUBISHI_ELECTRIC/Industrial_Robots.pdf).
75. Nachi Robots. Catalog 2012. Available at: [http://lehmann-rus.com/files/NACHI-Robot\\_2012RU.pdf](http://lehmann-rus.com/files/NACHI-Robot_2012RU.pdf).
76. DAIHEN Corporation. Available at: <http://daihen.ru/robots.html>.
77. RoboMatic. Industrial Robots. Available at: <http://www.robomatic.ru/robots/promyshlennyye-roboty-po-proizvoditelyam/panasonic-yaponiya>.
78. YASKAWA. Robots Motoman. Available at: [http://www.motoman.com.ru/ru/produkcija/roboty/?no\\_cache=1](http://www.motoman.com.ru/ru/produkcija/roboty/?no_cache=1).
79. GOST 25685-83. *Industrial robots. Classification*. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1984. 4 p.
80. Vorobev E.I., Popov S.A., Sheveleva G.I. *Mekhanika promyshlennykh robotov. Kniga 1. Kinematika i dinamika* [Mechanics of industrial robots. Book 1. Kinematics and dynamics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1988. 304 p.
81. Vorobev E.I., Kozyrev Yu.G., Tsarenko V.I. *Promyshlennyye roboty agregatno-modulnogo tipa* [Industrial robots aggregate-modular type]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 240 p.
82. Vorobev E.I., Egorov O.D., Popov S.A. *Mekhanika promyshlennykh robotov. Kniga 2. Raschet i proektirovanie mekhanizmov* [Mechanics of industrial robots. Book 2. Calculation and design of mechanisms]. Moscow, Vysshaya shkola, 1988. 367 p.
83. Vorobev E.I., Babich A.V., Zhukov K.P., Popov S.A., Semin Yu.I. *Mekhanika promyshlennykh robotov. Kniga 3. Osnovy konstruirovaniya* [Mechanics of industrial robots. Book 3. Design basics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1989. 383 p.
84. Solomentsev Yu.M. *Promyshlennyye roboty v mashinostroenii: Albom skhem i chertezhey* [Industrial robots mechanical engineering: an Album of diagrams and drawings]. Moscow, Mashinostroenie, 1986. 140 p.
85. Lagerev A.V. *Proektirovanie nasosnykh gidroprivodov podemno-transportnykh mashin* [The design of pump hydraulic drives of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2006. 232 p.
86. Sokolov S.A. *Metallicheskie konstruksii podemno-transportnykh mashin* [Lifting-transport machines metall constructions]. SPb, Politekhnik, 2005. 423 p.
87. Vershinskiy A.V., Gokhberg M.M., Semenov A.V. *Stroitel'naya mekhanika i metallicheskie konstruksii* [Structural mechanics and metal constructions]. Leningrad, Mashinostroenie, 1984. 231 p.
88. Vaynson A.A. *Podemno-transportnye mashiny stroitel'noy promyshlennosti: atlas konstruksiy* [Lifting-transport machines for building industry: an Atlas of structures]. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 152 p.

89. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Universal technique for analysing hydraulic articulating crane dynamics, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.3, pp. 24-31.
90. Lagerev I.A., Milto A.A., Lagerev A.V. Effectiveness of elastic damping in the pivot joints of cargo boom of crane-manipulating installations at large gaps, *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No.1, pp. 18-36. URL: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2016-N1/2016-01-02.pdf>.
91. Lagerev A.V. *Nagruzhenost podemno-transportnoy tekhniki* [Load lifting and transport equipment]. Bryansk, BGTU, 2010. 180 p.
92. GOST 25546-82. *Cranes. Modes of operation*. Moscow, Gosstandart: Izdatelstvo standartov, 2002. 5 p.
93. Aleksandrov M.P. *Gruzopodemnye mashiny* [Lifting-transport machines]. Moscow, MGTU imeni N.E. Baumana, 2000. 552 p.
94. Lagerev I.A. Evaluation of dynamic response and optimization of a three-link hydraulic cranes manipulators of transport and technological machines for welding of pipelines. Cand. Diss. (Engineering). Bryansk. 2011. 197 p.
95. Braude V.I., Semenov L.N. *Nadezhnost podemno-transportnykh mashin* [Reliability of carrying and lifting machines]. Leningrad, Mashinostroenie, 1986. 183 p.
96. Lagerev I.A. Simulation of a bridge crane metal construction loading parameters. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, No.2, pp. 74-81.
97. Goldshtein M.N. *Mekhanicheskie svoystva gruntov* [Mechanical properties of soils]. Moscow, Stroyizdat, 1971. 368 p.
98. Ukhov S.B., Semenov V.V., Znamenskiy V.B., Ter-Martirosyan Z.G., Chernyshov S.N. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty* [Soil mechanics, bases and foundations]. Moscow, ASV, 1994. 527 p.
99. Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Gosstroyizdat, 1963. – 636 p.
100. Kovalskiy V.F., Lagerev I.A. The mobile transport-technological machines manipulators dynamics simulation with boom elastic strain consideration. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2016, No. 3.
101. Alekseev A.P., Stepanov V.P. *Promyshlennyy robot "Universal-15": Ustroystvo, naladka, obsluzhivanie* [Industrial robot "Universal-15: Device setup, adjusting, maintenance]. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 96 p.
102. Malakhov M.V., Neiberger H.A., Sidorin G.N. *Montazh, naladka, ekspluatatsiya i remont promyshlennykh robotov* [Installation, adjusting, maintenance and repair of industrial robots]. Moscow, Metallurgiya, 1989. 224 p.
103. Pashkov V.M. *Promyshlennyy robot "Tsiklon-5": Ustroystvo, naladka, obsluzhivanie* [Industrial robot "Tsiklon-5: Device setup, adjusting, maintenance]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 80 p.
104. Pustovoy V.N. *Metallokonstruktsii gruzopodemnykh mashin. Razrushenie i prognozirovaniye ostatochnogo resursa* [Metal structures of lifting machines. Destruction and prediction of residual life]. Moscow, Transport, 1992. 256 p.
105. Kotelnikov V.S., Shishkov N.A., Lipatov A.S., Gorlin A.M. *Spravoshnik po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu, remontu b diagnostirovaniyu gruzopodemnykh kranov. Vol. 1* [Guide for maintenance, repair and diagnostics of hoisting cranes]. Moscow, Gosgortekhnadzor Rossii, 1996. 392 p.
106. RD 10-112-2-09. *Metodicheskiye rekomendatsii po ekspertnomu obsledovaniyu gruzopodyemnykh mashin. Ch. 2. Krany strelovyye obshchego naznacheniya i krany-manipulyatory gruzopodyemniye*. Moscow, OOO «NIIKranostroyeniya», 2009. 120 p.
107. Seroshtan V.I., Ogar Yu.S., Golovin A.I., Glazun A.I., Selivanov M.I., Rakhaev V.V. *Diagnostirovaniye gruzopodemnykh mashin* [The diagnostics of hoisting machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 192 p.

108. Ivashkov I.I. *Montazh, ekspluatatsiya i remont podemno-transportnykh mashin* [Installation, operation and repair of lifting-transport machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 335 p.
109. Korotkiy A.A., Khalfin M.N., Ivanov B.F., Logvinov A.S. *Spravochnoe posobie po remontu metallokonstruktsiy gruzopodemnykh kranov* [Handbook on repair of metal structures of cranes]. Novocherkassk, NGTU, 1994. 180 p.
110. Kontsevoy E.M., Rozenshtein M.A. *Remont kranovykh metallokonstruktsiy* [Repair of crane metal structures]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 206 p.
111. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Dynamics simulation of hydraulic crane-manipulator with gaps in hinge joints of a boom, *Privody i komponenty mashin*, 2015, No.2, pp. 2–4.
112. Lagerev I.A., Milto A.A., Lagerev A.V. Reducing the impact load arising from the looseness in joints of articulating cranes, *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No.2, pp. 37-43.
113. Knauer I.B., Sleptsov V.V. *Promyshlennyy robot "Universal-5.02": Ustroystvo, naladka, obsluzhivanie* [Industrial robot "Universal-5.02: Device setup, adjusting, maintenance]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 48 p.
114. Grachev A.A. The stability of thin-walled elements of crane structures. Cand. Diss. (Engineering). Saint-Petersburg, 2013. 21 p.
115. Kalinin V.S. *Ustoychivost, prochnost i kolebaniya elementov sudovykh konstruktsiy* [Stability, strength and oscillations of elements of ship structures]. Leningrad, Sudostroenie, 1987. 304 p.
116. Lagerev A.V., Parfyonov N.S. Study to toughness of the steel lattice framework with defect of the dent and ulcer corrosion. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, No.3, pp. 47-55.
117. RD 10-112-1-04. *Rekomendatsii po ekspertnomu obsledovaniyu gruzopodyemnykh mashin. Obshchie polozheniya*. Moscow, Rostekhnadzor, 2004.
118. Danilov A.S. Diagnosis of damage to metallic structures of lifting machines. Cand. Diss. (Engineering). Tula, 2010. 160 p.
119. Shahinpoor M. *A Robot Engineering Textbook*. NY, Harper & Row, Publishers, Inc., 1987.
120. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S. *Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence*. McGraw-Hill, Inc., 1989.
121. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetskiy V.G. *Manipulyatsionnye roboty: dinamika, upravlenie, optimizatsiya* [Manipulation robots: dynamics, control, optimization]. Moscow, Nauka, 1989. 368 p.
122. GOST 25100-2011. *Soils. Classification*. Moscow, Standartinform, 2013.
123. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. The study of dynamics and strength of hydraulic crane-manipulating installations on a movable chassis. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No.1, pp. 43-48.
124. Popov E.P., Vereshchagin A.F., Zenkevich S.L. *Manipulyatsionnye roboty: dinamika i algoritmy* [Manipulation robots: dynamics and algorithms]. Moscow, Nauka, 1980.
125. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Preliminary Dynamics and Stress Analysis of Articulating Non-Telescoping Boom Cranes using Finite Element Method, *International Review on Modelling and Simulations*, 2015, Vol. 8, No. 2. pp. 223–226.
126. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Tool for Preliminary Dynamics and Stress Analysis of Articulating Cranes. *International Review on Modelling and Simulations*, 2014, Vol.7, No.4, pp. 644–652.
127. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Universal technique for stress analysis of beam elements of articulating cranes in case of dynamic load, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, No.4, pp. 21-26.
128. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Optimalnoe proektirovanie podzemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskiy Universitet, 2013. 228 p.

129. Haug E.J., Arora J.S. Applied optimal design. Mechanical and structural systems. John Wiley & sons, Inc., 1979.
130. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Trunk pipeline welding machine crane-manipulator optimization during its modernization, *Podyemno-transportnoe delo*, 2013, No.1, pp. 4-7.
131. Lagereva E.A., Lagerev A.V. Optimal design of hydraulic turning mechanisms of the sliding type of crane facilities of mobile hoisting machines, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.2, pp. 57-63.
132. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Optimal design of hydraulic turning mechanisms of the pistoning type of crane facilities of multipurpose hoisting machines, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, No.1, pp. 37-45.
133. Gasyimov G.Sh., Aleksandrov B.A. *Nagruzhennost valochno-paketiruyushchikh mashin na postepennykh i vyborochnykh vyrubkakh lesa* [Loading Feller Bunchers for gradual and selective felling in forest]. Saint-Petersburg, Izdatelstvo SPbGU, 2005. 192 p.
134. Emtyl Z.K. Improving the kinematics, dynamics and design of timber cranes. Doct. Diss. (Engineering). Voronezh, 2002. 35 p.
135. Egorova O.V. Optimization of design parameters of industrial robot positional type. Cand. Diss. (Engineering). Moscow, 1984. 193 p.
136. Borovin G.K. Dynamics and optimization of traffic control systems of robots with the executive electromechanical and hydraulic drives. Doct. Diss. (Physics and Mathematics). Moscow, 1994. 410 p.
137. Lagerev I.A. *Raschety gruzopodyemnykh mashin metodom konechnykh elementov* [Load-lifting machines calculations by finite element method]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet, 2013. 116 p.
138. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Chislennyy analiz metallicheskih konstruktсий podyemno-transportnykh mashin* [Numerical analysis of metal constructions of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2014. 186 p.
139. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Raschet metallicheskih konstruktсий podyemno-transportnykh mashin metodom konechnykh elementov* [Calculation of metal constructions of lifting-transport machines by finite element method]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 210 p.
140. Shimkovich D.G. *Raschet konstruktсий v MSC/NASTRAN for Windows* [Calculation of structures in MSC/NASTRAN for Windows]. Moscow, DMK Press, 2003. 448 p.
141. Goncharov P.S. *NX dlya konstruktora-mashinostroitelya* [NX for designer-mechanical engineer]. Moscow, DMK Press, 2010. 498 p.
142. GOST 32579.1-2013. *Cranes. Design principles for loads and load combinations. Part 1. General*. Moscow, Standartinform, 2015. 36 p.

#### **Author' information**

Igor A. Lagerev - Candidate of Technical Sciences, Vice rector for Innovations at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, [lagerev-bgu@yandex.ru](mailto:lagerev-bgu@yandex.ru).