



УДК 681.3.016

Д.Е. Бортыяков, С.В. Мещеряков, Н.А. Солодилова

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ**

D.E. Bortyakov, S.V. Mescheryakov, N.A. Solodilova

**QUALITY ASSURANCE OF COMPUTER-AIDED DESIGN
FOR PRODUCTION METALWARE BASED ON DISTRIBUTED DATABASE
OF OPERATING DEFECTS**

Выполнен анализ базы данных эксплуатационных дефектов промышленных объектов на различных предприятиях Северо-Западного региона России. Выявлены наиболее характерные дефекты металлоконструкций и способы их устранения. Изменены традиционные математические модели расчета металлоконструкций с целью улучшения качества автоматизированного проектирования.

БАЗА ДАННЫХ. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ ДЕФЕКТ. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА.

Production object database of operating defects on various enterprises in the North-West region of Russia is analyzed. The most problematic metalware and chronic defects are figured out as well as methods to resolve them. Traditional mathematic models of metalware estimation are modified for the purpose of quality assurance to computer-aided design.

DATABASE. OPERATING DEFECT. METALWARE. COMPUTER-AIDED DESIGN. QUALITY ASSURANCE.

Металлоконструкции являются неотъемлемой частью технологических и транспортно-перегрузочных систем и оказывают существенное влияние на эффективность функционирования всего производственного комплекса. При проектировании таких объектов, в особенности металлоемких конструкций большого размера, отсутствует возможность создания опытного образца, который можно было бы исследовать в различных условиях, вплоть до аварийных. Выполняемые проекторочные расчеты не учитывают различие в реальных производственных процессах и условиях эксплуатации.

Возникает необходимость корректировки математических моделей конструкций на основе экспериментальных результатов их практического применения при различных условиях работы и интенсивности на-

грузки. Полученные сведения представляют собой разрозненную и разнородную информацию, поскольку на разных предприятиях используются различные средства автоматизации и форматы данных. На многих из них технические паспорта, сведения об эксплуатации и другая учетная информация не структурированы в базе данных и хранятся в виде отдельных офисных документов. Все это затрудняет анализ статистики и делает его невозможным для проектировщиков и потребителей. Для полноценного анализа необходима интеграция разрозненных статистических данных в единую автоматизированную систему сбора и обработки информации.

При проектировании новых конструкций обычно стремятся по возможности использовать единообразные и сопоставимые методы анализа и синтеза, что находит от-

ражение в типовых инженерных методах расчетов. Создание каждой такой методики для конструкции в целом или отдельных ее элементов – сложный и длительный процесс, который приходится вести практически непрерывно на фоне модернизации и появления новых принципиальных схем. В этой ситуации внедрение единой базы данных эксплуатационных дефектов в современную практику автоматизированного проектирования представляется весьма актуальным и позволит специалистам гибко вносить изменения в имеющиеся типовые методики расчета, а также давать рекомендации инженерно-экспертным организациям по сбору дополнительных характеристик эксплуатации в целях выявления причин возникновения дефектов конструкций.

Анализ эксплуатационных дефектов технологических систем на основе распределенной базы данных

Интеграция распределенных данных в единую информационную систему выполнена с применением методов, предложенных в работах [1, 2]. База данных эксплуа-

тационных дефектов реализована на основе объектно-иерархических и реляционных моделей, представленных в работах [3, 4]. Экспериментальные данные для анализа собраны в базу данных с 469 действующих промышленных предприятий Северо-Западного региона России, на которых эксплуатируется более 1370 производственных объектов. Сведения о количестве обследованных объектов, сроках их эксплуатации и общем уровне выявленных дефектов приведены на рис. 1.

Средний возраст промышленных объектов составляет 37 лет. Тем не менее согласно статистике, прямой зависимости между их сроком службы и наличием дефектов не наблюдается. Например, после 50 лет эксплуатации количество дефектов соизмеримо с уровнем 20-летнего возраста. Это объясняется различием в интенсивности производства, графике работы, динамической нагрузке, погодных условиях – легких, средних, тяжелых.

Общее состояние обследованных промышленных объектов оценивалось экспертами по трехбалльной системе: исправное,

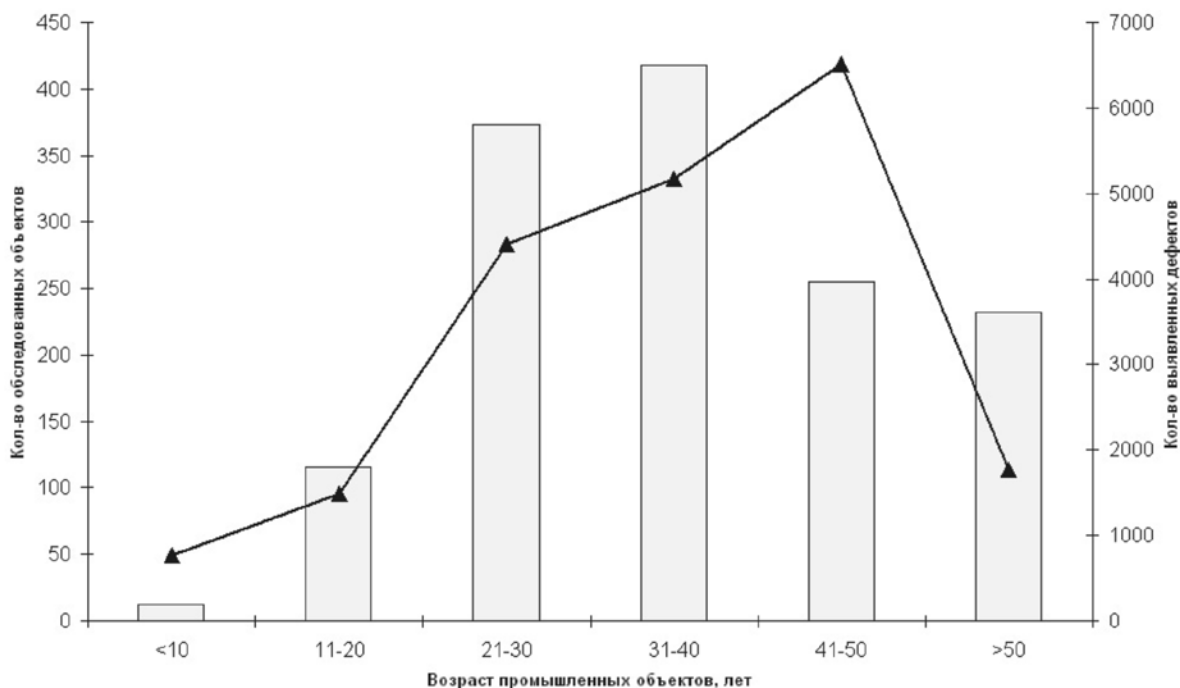


Рис. 1. Сведения о количестве и сроках эксплуатации промышленных объектов (□) кол-во обследованных объектов; (—▲) кол-во выявленных дефектов

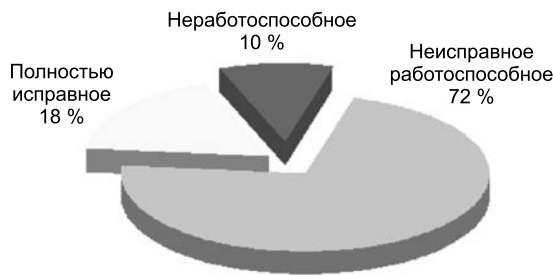


Рис. 2. Общее состояние обследованных промышленных объектов

неисправное работоспособное, неработоспособное (рис. 2). Для неработоспособного оборудования дальнейшая эксплуатация запрещена ввиду обнаруженных критических дефектов. Работоспособное оборудование, в отличие от исправного, предполагает наличие набора несущественных замечаний, которые разрешается устранить в течение определенного срока до очередного технического освидетельствования (от полугода до двух–трех лет в зависимости от условий

эксплуатации и характера нагрузки).

На всех промышленных объектах, погрузо-разгрузочных и транспортно-технологических комплексах в той или иной степени применяются следующие типы несущих металлоконструкций:

- балочные (более 10 %);
- балочно-ферменные клепаные (более 10 %);
- балочно-ферменные сварные (более 10 %);
- двутавровые (менее 10 %);
- коробчатые (более 10 %);
- рамные (менее 1 %);
- рельсовые (менее 10 %);
- ригельные (менее 1 %);
- сварные листовые (более 10 %);
- трубчатые сварные (более 10 %);
- уголковые (менее 1 %);
- ферменные клепаные (более 10 %);
- ферменные сварные (более 10 %);
- швеллерные (менее 10 %);
- шпренгельные (менее 10 %).

По результатам технических освидетель-

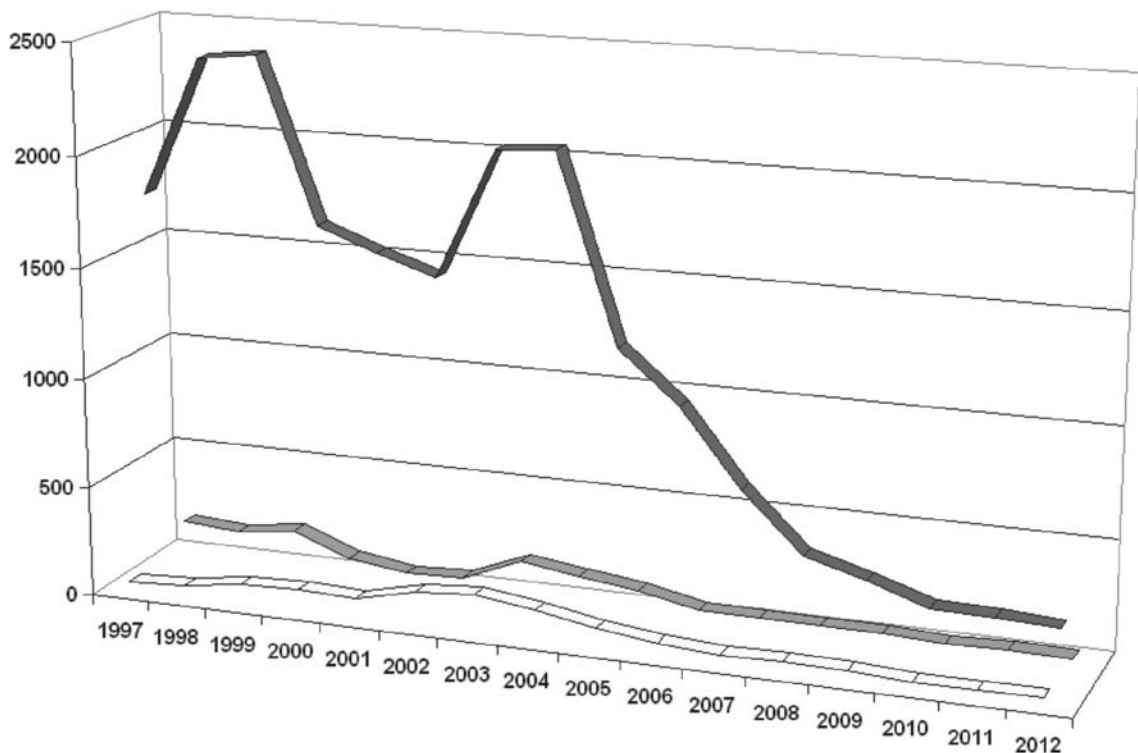


Рис. 3. Количество обследованных промышленных объектов и выявленных дефектов по годам (□) кол-во промышленных объектов; (■) общее кол-во дефектов; (▣) кол-во дефектов металлоконструкций

ствований за более чем 10 лет практически каждый обследованный промышленный объект имеет дефекты металлоконструкций при среднем уровне 15 дефектов на объект (рис. 3).

На обследованных объектах все металлоконструкции выдержали статические испытания, однако в результате динамического нагружения после снятия нагрузки у некоторых элементов металлоконструкций были обнаружены дефекты. Наиболее характерными из них, на основе анализа базы данных дефектов, являются трещины, остаточная деформация, прогиб, течи рабочей жидкости, ослабление заклепок или болтовых соединений.

В 35 % случаев по результатам обследования сделан либо капитальный ремонт с заменой отдельных элементов металлоконструкций, либо текущий ремонт местных деформаций с применением сварки.

Аналогичные исследования [5] подтверждают, что результаты замеров при статических и динамических испытаниях могут сильно отличаться друг от друга. На рис. 4 приведен пример результатов нивелировки высотного положения направляющих стального типа для порталного крана

по перемещению на складе завода железобетонных изделий. Во многих точках замеров (на участке от 3–5 до 8–10) наблюдается характерный прогиб металлического профиля под нагрузкой. При этом разность отметок высотного положения направляющих значительно превышает предельно допустимое отклонение 20 мм согласно действующим нормативам [6, 7].

Вопросы оценки динамических свойств металлоконструкций на стадии проектирования не затрагиваются или затрагиваются минимальным образом. Отсутствие анализа динамических процессов может привести к критическим ситуациям, например сильное отклонение груза из плоскости движения тележки может привести к поломке ног перегружателя. Расчетный прогноз потенциальной возможности появления таких динамических качеств необходимо осуществлять с использованием критериев эксплуатации и последующей корректировкой расчетных методик.

Расчетная математическая модель крановых металлоконструкций

При построении расчетной математической модели использована концепция

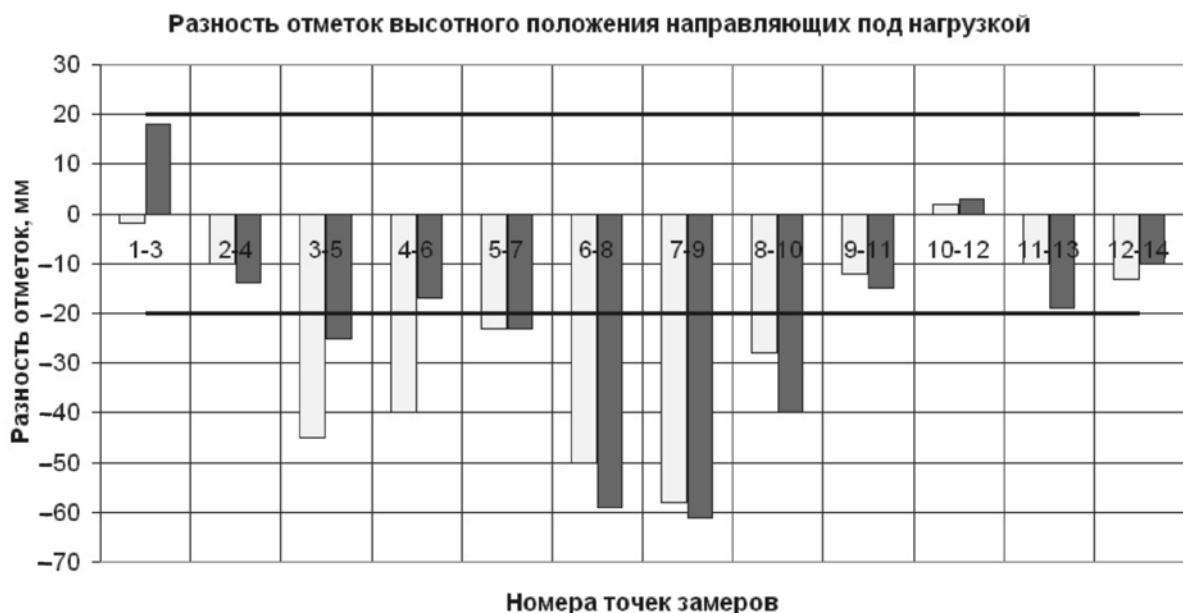


Рис. 4. Результаты замеров высотного положения направляющих под нагрузкой (□) ось А; (■) ось Б; (— —) предельное отклонение 20 мм

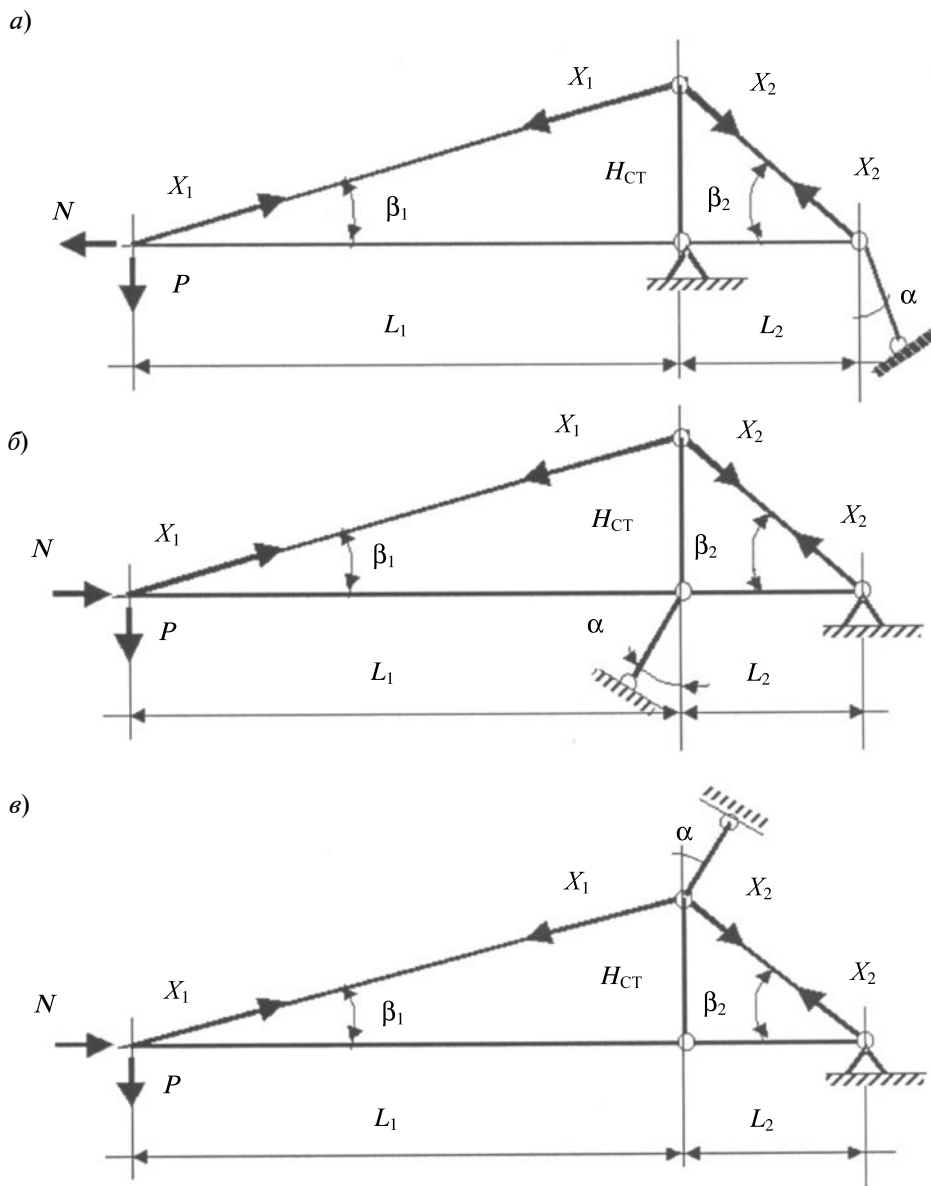


Рис. 5. Расчетные схемы шпренгельных конструкций:

а – хобота; б, в – стрелы с креплением тягового звена соответственно к балке и к узлу шпренгелей

составной динамической многосвязной системы, которая базируется на типовых конструкциях, характеристики функционирования которых известны и хорошо изучены. Такое представление позволяет вскрыть конструктивные особенности и их потенциальные недостатки на ранней стадии и тем самым повысить продуктивность и качество процесса проектирования.

На основе сформулированной концепции в традиционные математические модели [8–11] внесены изменения с целью по-

лучения требуемых показателей. Помимо механизмов с жесткими звеньями, добавлен учет упругой составляющей и отклонений перемещения, вызванных податливостью звеньев.

На рис. 5 представлен пример расчетных схем для шпренгельных металлических конструкций в виде консольной балки на двух опорах со стойкой и раскосами, которая наиболее часто встречается в современной практике. За основу взят деформационный расчет конструкции, т. к. при прочностном

расчете для соблюдения условия равенства прочности элементов невозможно установить закономерность перераспределения нагрузок между элементами внутри статически неопределенной системы.

Усилия в раскосах принимаются в качестве неизвестных X_1 и X_2 . Система уравнений совместности перемещений одинакова для всех трех рассматриваемых расчетных случаев:

$$\begin{aligned}\delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \Delta_{1P} &= 0, \\ \delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \Delta_{2P} &= 0,\end{aligned}$$

где δ_{ij} – перемещения j -й точки под действием единичной i -й силы; X_1 и X_2 – неизвестные внутренние усилия в раскосах; Δ_{iP} – перемещения i -й точки под действием внешней нагрузки P .

Перемещения всех точек системы под действием внутренних усилий X_1 и X_2 одинаковы для всех расчетных схем (рис. 5) и определяются известными методами [8, 9], но перемещения от внешней нагрузки будут разные. Поперечные силы не учитываются, т. к. для перемещений они не имеют существенного значения. Неизвестные параметры раскосов и стойки выделены отдельно:

$$\begin{aligned}\delta_{11} &= C_1 + L_{p1}/F_{p1}, \\ \delta_{22} &= C_2 + L_{p2}/F_{p2},\end{aligned}$$

где L_{p1} и F_{p1} , L_{p2} и F_{p2} – длины и площади поперечного сечения первого и второго раскосов соответственно; C_1 и C_2 – составляющие коэффициентов δ_{11} и δ_{22} , рассчитанные на основе параметров известных конструктивных элементов.

Тогда система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}(C_1 + L_{p1}/F_{p1})X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1P} &= 0, \\ (C_2 + L_{p2}/F_{p2})X_2 + \delta_{21}X_1 + \Delta_{2P} &= 0.\end{aligned}$$

Выражения для усилий X_1 и X_2 берутся исходя из вероятного распределения внешней нагрузки между балкой и раскосами. Если ввести коэффициент K_p , показывающий, какую часть внешней нагрузки берет на себя балка ($K_p < 1$), то выражения для усилий X_1 и X_2 при условии равновесия узлов будут иметь вид:

$$\begin{aligned}X_1 &= P(1 - K_p)/\sin(\beta_1), \\ X_2 &= X_1 \cos(\beta_1)/\cos(\beta_2) \text{ или} \\ X_2 &= (X_1 \cos(\beta_1) - P \sin(\alpha))/\cos(\beta_2).\end{aligned}$$

Решив данную систему, можно получить величины площадей раскосов F_{p1} и F_{p2} , при которых система удовлетворяет требованиям совместной деформации балочной и шпренгельной систем. Затем выполняется проверочный расчет. Если расчетные напряжения в раскосах получились больше допустимых, высота стойки последовательно уменьшается и расчет повторяется. Получив площади раскосов, удовлетворяющие прочностным и деформационным ограничениям, производится их проверка по условию общей устойчивости.

Реализация новой модели и дальнейшее развитие САПР позволяет оценить эффективность применения усовершенствованных элементов конструкции, в частности, систем гашения колебаний и демпфирующих устройств, на ранних стадиях проектирования.

Основная ценность распределенной базы данных эксплуатационных дефектов состоит в возможности анализировать сведения различных предприятий о техническом состоянии промышленных объектов. В процессе промышленной эксплуатации и по результатам периодического обследования выявляются наиболее слабые элементы конструкции и наиболее распространенные дефекты. Нередко эти дефекты вызваны особыми условиями эксплуатации и динамическими нагрузками, которые трудно рассчитать на этапе автоматизированного проектирования.

Описанная математическая модель расчета металлоконструкций и методика ее применения позволяют производить более точный расчет различных систем, улучшающих динамические свойства конструкций, и тем самым повысить качество автоматизированного проектирования. Кроме того, проведенные исследования помогли сформулировать практические рекомендации эксплуатирующим предприятиям и экспертным организациям по регулярному

контролю дополнительных параметров объектов с учетом фактической динамической нагрузки с целью их последующего анализа в базе данных.

Опыт автоматизированного проектирования и промышленной эксплуатации

металлоконструкций кранов подтверждает правильность такого подхода. По статистическим данным (см. рис. 3) на промышленных предприятиях Северо-Западного региона России количество выявленных дефектов в последние годы значительно снизилось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мещеряков, С.В.** Эффективные технологии создания информационных систем [Текст]/ С.В. Мещеряков, В.М. Иванов.— СПб.: Изд-во «Политехника», 2005. — 312 с.

2. **Мещеряков, С.В.** Построение объектно-реляционных моделей баз данных с произвольным набором атрибутов [Текст]/ С.В. Мещеряков, В.М. Иванов // Системы управления и информационные технологии. — 2005. — № 4 (21). — С. 82–87.

3. **Mescheryakov, S.V.** A Successful Implementation of a Data Structure for Storing Multilevel Objects with Varying Attributes [Электронный ресурс]/ S.V. Mescheryakov // IBM, 2002. Режим доступа: <http://www.ibm.com/developerworks/data/zones/informix/library/techarticle/0212mescheryakov/0212mescheryakov.html>

4. **Мещеряков, С.В.** Реализация модели данных для описания иерархических объектов с произвольными атрибутами [Текст]/ С.В. Мещеряков, В.М. Иванов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — № 1 (72). — С. 139–144.

5. **Мещеряков, С.В.** Анализ эксплуатационных дефектов грузоподъемного оборудования в системе автоматизированного проектирования [Текст] / С.В. Мещеряков, В.М. Иванов, Д.Е. Бортыков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — № 6 (138). — Т. 2. — С. 95–102.

6. **РД 50:48:0075.03.05.** Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации надземных крановых путей: Руководящий нормативный документ. — М.: НПЦ «Путь К», 2005. — 213 с.

7. **ПБ 10-382-00.** Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. — СПб.: ЦОТПБСП, 2000.— 129 с.

8. **Орлов, А.Н.** Обобщенная математическая модель стреловых кранов [Текст]/ А.Н. Орлов, Ф. Флюгель // Труды СПбГТУ. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1995. — № 455. — С. 66–77.

9. **Бортыков, Д.Е.** Обеспечение качества системы изменения вылета порталных кранов на этапе проектировочного расчета [Текст]/ Д.Е. Бортыков, А.Н. Орлов // Повышение качества изделий в машиностроении: Межвуз. сб. научн. трудов. —Л.: Изд-во ЛПИ, 1990. — С. 101–104.

10. **Орлов, А.Н.** Нагрузки металлической конструкции крана при ее свободных колебаниях с грузом и управляемыми демпфирующими устройствами [Текст]/ А.Н. Орлов, В.Я. Головачев // Труды СПбГТУ. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1993.— № 445. — С. 94–104.

11. **Манжула, К.П.** Оценка увеличения долговечности крановых металлоконструкций при включении в систему подвеса груза демпфирующих устройств [Текст]/ К.П. Манжула, А.Н. Орлов, В.Я. Головачев, А.М. Кабаков // Труды СПбГТУ. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1993. — № 445. — С. 105–118.

REFERENCES

1. **Mescheryakov S.V., Ivanov V.M.** Effektivnyye tekhnologii sozdaniya informatsionnyh system. — St.-Petersburg: Izd-vo «Politekhnika», 2005. — 312 s. (rus)

2. **Mescheryakov S.V., Ivanov V.M.** Object-relational models construction database systems with varying attributes / Control Systems and Information Technology. — 2005. — № 4 (21). — S. 82–87. (rus)

3. **Mescheryakov S.V.** A Successful Implementation of a Data Structure for Storing Multilevel Objects with Varying Attributes. IBM, 2002. Available <http://www.ibm.com/developerworks/data/zones/informix/library/techarticle/0212mescheryakov/0212mescheryakov.html>

[informix/library/techarticle/0212mescheryakov/0212mescheryakov.html](http://www.ibm.com/developerworks/data/zones/informix/library/techarticle/0212mescheryakov/0212mescheryakov.html)

4. **Mescheryakov S.V., Ivanov V.M.** Realizatsiya modeli dannyih dlya opisaniya ierarhicheskikh ob'ektov s proizvolnyimi atributami (Implementation of a data model for defining hierarchical objects with varying attributes) / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunicacii. Upravlenie. —St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2009.— № 1 (72). — P. 139–144. (rus)

5. **Mescheryakov S.V., Ivanov V.M., Bortyakov D.E.** Analiz ekspluatatsionnyh defektov

gruzopod'emnogo oborudovaniya v sisteme avtomatizirovannogo proektirovaniya (Analysis of operating defects of lifting equipment in computer-aided design system) / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2011. — № 6 (138). — Т. 2. — P. 95–102. (rus)

6. **RD 50:48:0075.03.05.** Rekomendatsii po ustroistvu i bezopasnoi ekspluatatsii nadzemnyh kranovyh putei: Rukovodyashchii normativnyi document. — Moscow: NPC «Put' K», 2005. — 213 s. (rus)

7. **PB 10-382-00.** Pravila ustroistva i bezopasnoi ekspluatatsii gruzopod'emnyh kranov. — St.-Petersburg: COTPBSP, 2000. — 129 s. (rus)

8. **Orlov A.N., Flyugel' F.** Obobshchennaya matematicheskaya model' strelovyh kranov / Trudy SPbGTU. — St.-Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 1995. — № 455. — S. 66–77. (rus)

9. **Bortyakov D.E., Orlov A.N.** Obespechenie kachestva sistemy izmeneniya vyleta portal'nyh kranov na etape proektirovochnogo rascheta / Povyshenie kachestva izdeliy v mashinostroenii: Mezhvuz. sb. nauchn. tr. — St.-Petersburg: Izd-vo LPI, 1990. — S. 101–104. (rus)

10. **Orlov A.N., Golovachev V.Ya.** Nagruzki metallicheskoj konstruktsii kрана pri ee svobodnyh kolebaniyah s gruzom i upravlyaemymi dempфирuyushchimi ustroystvami / Trudy SPbGTU. — St.-Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 1993. — № 445. — S. 94–104. (rus)

11. **Manzhula K.P., Orlov A.N., Golovachev V.Ya., Kabakov A.M.** Otsenka uvelicheniya dolgovechnosti kranovyh metallokonstruktsiy pri vkluchenii v sistemu podvesa gruzа dempфирuyushchih ustroystv / Trudy SPbGTU. — St.-Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 1993. — № 445. — S. 105–118. (rus)

БОРТЯКОВ Данил Евгеньевич — доцент кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: bortyakov@mail.ru

BORTYAKOV, Danil E. — St. Petersburg State Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: bortyakov@mail.ru

МЕЩЕРЯКОВ Сергей Владимирович — ведущий программист Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, доцент.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: serg-phd@mail.ru

MESCHERYAKOV, Sergey V. — St. Petersburg State Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: serg-phd@mail.ru

СОЛОДИЛОВА Наталья Алексеевна — старший преподаватель кафедры конструкторско-технологических инноваций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: solodna@yandex.ru

SOLODILOVA, Natalia A. — St. Petersburg State Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: solodna@yandex.ru