

Для проведения статистических исследований работы кранов [1], построения математической модели и оптимизации предлагается технология, состоящая из следующих восьми этапов [2-3]. 1. Выбор результативного показателя эффективности работы кранов и совокупности влияющих на него производственно-технических факторов и сбор исходных статистических данных (ИСД) по ним. 2. Математическая постановка задач. 3. Вычисление основных статистических характеристик ИСД и оценка их пригодности для исследования. 4. Проверка ИСД на "нормальность". 5. Корреляционный анализ. 6. Построение регрессионной модели работы сломавшихся кранов. 7. Оценка степени влияния факторов на время поломки крана. 8. Определение оптимальных сроков проведения профилактических работ для работоспособных кранов по их показателям работы. Далее последовательно рассмотрим все выделенные этапы на примере исследования башенных кранов с регистратором параметров в составе прибора безопасности ОНК-140. Основная задача регистратора – сохранять информацию с целью обеспечения анализа причины, приведшей к поломке или аварии крана. Также важной задачей является анализ истории работы крана, необходимый для определения остаточного ресурса при проведении экспертизы.

1. Для статистических исследований по информации, хранящейся в регистраторе параметров работы башенного крана, в качестве результативного показателя эффективности работы крана (отклика) был выбран счетчик моточасов крана – t . Счетчик моточасов крана регистрирует время эксплуатации крана. В качестве влияющих на него факторов выбраны показатели датчиков крана – x_i , $i=1, \dots, 7$. Этот отклик и факторы представляют собой совокупность переменных – y_j , перечень которых приведён в таблице 1.

Таблица 1 Код Наименование x_1 Перемещение по путям (м.) x_2 Высота подъема крюка крана (м.) x_3 Усилие крана (кгс/см.) x_4 Азимут крана (град.) x_5 Вылет стрелы крана (м.) x_6 Масса груза крана (т.) x_7 Загрузка крана (%) y Счетчик моточасов крана По отобранным переменным были собраны ИСД. Фрагмент собранных ИСД для 3-х кранов на время их выхода из работоспособного состояния приведён в таблице 2. Всего были собраны ИСД по 90-та грузоподъёмным кранам, вышедшим из работоспособного состояния. Статистические данные для 16-ти работоспособных кранов, собранные на время оценки их состояния, представляются таблицей, аналогичной таблице 2.

Таблица 2 № x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 y

1	12,84	547,77	81,9	1,7	6,55	3,13	67	178,55
2	10,4	701,4	69,5	2,6	8,13	3,74	35	674,76
3	21,23	604,36	50,6	7,9	17,33	4,35	81	777,18

2. Требуется построить математическую модель процесса работы кранов в виде уравнения регрессии $y = f(x_1, \dots, x_7)$ (1) По математической модели (1) производится постановка оптимизационной задачи, с максимизацией прибыли от работы крана за счёт выбора оптимального срока проведения профилактических работ – $t_{\text{проф}}$ для заданных конкретных значений факторов состояния крана $y_1 = f(t_{\text{проф}}) \rightarrow \max; x_i = \text{const};$ (2) 3. Основные статистические характеристики распределений

Исходные значения приведены в таблице 3

Код	Среднее значение	Медиана	Стандартное отклонение	Стандартная ошибка среднего	Асимметрия	Эксцесс	Отношение статистич. ошиб. к сред. значению
x1	15,635	14,985	6,674	0,7035	0,270978	-0,656	19
x2	490,694	531,500	174,225	18,3650	0,3	79581	-0,822
x3	125,599	118,890	58,796	6,1976	1,602912	3,542	54
x4	4,762	4,650	2,819	0,2971	1,401126	4,107	29
x5	9,956	8,465	5,168	0,5448	0,331130	-1,159	81
x6	3,978	3,485	2,388	0,2518	0,944576	0,122	15
x7	75,956	72,000	36,279	3,5373	1,616827	4,583	92
y	2331,785	1616,465	1945,276	205,0501	1,479796	2,29107	0,088

По таблице 3 отметим, что в 4-х случаях из 8-ми, отношение стандартной ошибки к среднему значению не превышает 0,05 и в 4 случаях это отношение лежит в пределах от 0,05 до 0,09 и по этому показателю ИСД вполне пригодны для статистических исследований. Выбранный основной метод исследования – регрессионный анализ – не накладывает каких-либо ограничений на распределения ИСД, они могут быть произвольными. Вместе с тем использование корреляционного и дисперсионного анализов, введённых в информационную технологию исследования и «усиливающих» степень достоверности её результатов, требует, чтобы распределения ИСД, используемые в исследовании, подчинялись нормальному закону. Для оценки нормальности распределения сравнивают значения асимметрии, эксцесса и разницы медианы и среднего с удвоенными значениями соответствующих стандартных ошибок. Найдено, что две стандартных ошибки асимметрии равны 0,508064, эксцесса - 1,005872. Результаты вычислений показателей распределений ИСД приведены в таблице 4.

Код	Разница медианы-среднего	Две стандартные ошибки среднего	Нормальность по медиане	Асимметрия	Нормальность по асимметрии	Эксцесс	Нормальность по эксцессу
x1	-0,65	1,4070	+ 0,270978	+ -0,6	5619	+ x2	40,806
x2	36,730	- -0,379	581	+ -0,8	2261	+ x3	-6,1
x3	09	12,396	+ 1,602912	- 3,54254	- x4	-0,1	12
x4	0,5942	+ 1,401126	- 4,10729	- x5	-1,4	91	1,0896
x5	- 0,331130	+ -1,1	5981	- x6	-0,4	93	0,5036
x6	+ 0,944576	+ 0,12215	+ x7	-3,9	56	7,0746	+ 1,616827
x7	- 4,58392	- y	-71	5,32	410,15	- 1,479796	- 2,29107

По таблице 4 находим, что разница между медианой и средним значением в 5-ти случаях из 8-ми, не превышает две стандартные ошибки. Асимметрия в 4-х случаях из 8-ми не превышает две стандартные ошибки асимметрии. Эксцесс в 3-х случаях из 8-ми не превышает две стандартные ошибки эксцесса. Наихудшие результаты получены для факторов x3, x4, и x7. Дополнительно проведём оценку нормальности ИСД по критерию согласия (КС) Колмогорова – Смирнова [4]. Если коэффициент доверия R_k предположению о нормальности эмпирического распределения, который можно найти по статистическим таблицам [4], не меньше 0,20, то предположение о нормальности не отвергается. Если R_k 0,20, то предположение о нормальности рекомендуется отвергнуть. Соответствие эмпирического и гипотетического распределений можно визуально проследить по графикам. Такие графики строятся и выдаются

в специализированных программных процедурах Statistica 8.0 [5], на которые производится ориентация вычислений по излагаемому математическому аппарату. Для примера, на рис.1 представлен график оценки нормальности фактора x_1 . В 6-ти случаях из 8-ми распределение ИСД соответствуют нормальному закону по КС Колмогорова-Смирнова, что составляет 75%. Можно надеяться, что с увеличением количества анализируемых кранов результаты по оценке нормальности распределений их ИСД улучшатся.

5. Тесноту связи между переменными принято характеризовать парными коэффициентами линейной корреляции [4]. Рис. 1 – Эмпирическая и гипотетическая функции распределения фактора x_1 . Критическое значение коэффициента линейной корреляции вычисляется по формуле [6]: (3) где $t_{crit} = 1,9873$ – критическое значение критерия Стьюдента для рекомендуемого уровня значимости, определяемого по статистическим таблицам при $n - 2 = 90 - 2 = 88$ -ми степенях свободы [7]; $n = 90$ – количество кранов. Вычисленные значения коэффициентов линейной корреляции между результативным показателем и влияющими на него факторами приведены в таблице 5, в которой существенные значения коэффициентов линейной корреляции, значение которых по абсолютной величине не меньше $t_{crit} \geq 0,2$ выделены заштрихованными клетками. Таблица 5

Код	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	y
0,36	-0,20	-0,15	0,01	-0,09	-0,08	-0,12		

Для наглядности результаты таблицы 5 на рис.2 представлены в виде диаграммы. Рис. 2 – Влияние производственно-технических факторов на наработку крана на отказ. По рис.2 отметим, что чем больше x_1 - перемещение по путям, тем больше y - наработка на отказ. Фактор x_4 – имеет очень слабую связь с наработкой на отказ. Все остальные факторы оказывают отрицательное влияние на наработку на отказ, т.е. чем они больше, тем наработка на отказ меньше, что не противоречит здравому смыслу.

6. Нелинейный регрессионный анализ. Для вычисления коэффициентов уравнения регрессии будем использовать метод наименьших квадратов (МНК), который требует, чтобы: (4) где y_i – экспериментальное значение результативного показателя для i -го башенного крана; \hat{y}_i – значение результативного показателя для i -го крана, вычисленное по аппроксимирующей зависимости; n – количество кранов; m – количество факторов. Наряду с требованием (4) при получении уравнений регрессии требуется, чтобы отношение стандартной ошибки результативного показателя к его среднему значению не превышало 0,1. Уровни значимости коэффициента множественной детерминации и критерия Фишера уравнения регрессии и коэффициентов в уравнении регрессии по критерию Стьюдента не превышали 0,05 [7]. Приведём уравнение регрессии, полученное с помощью стандартной процедуры ППП Statistica 8.0 [5]: (5)

7. Оценка степени влияния факторов на наработку на отказ производится по их удельным весам и коэффициентам эластичности, вычисленным по (5). Результаты оценки приведены в таблице 6 и на рис.3. Таблица 6

Код	Удельный вес	Коэффициент эластичности
x_1	0,097021	

0,240411 x2 0,040614 -0,257399 x3 0,130564 -0,361245 x4 0,026845 0,067718 x5
 0,364603 -0,614846 x6 0,264603 -0,514338 x7 0,068801 -0,203384 Рис. 3 –

Диаграмма влияния факторов на y по коэффициентам эластичности Характер диаграммы, приведенной на рис.3 в качественном плане аналогичен рис.2, имеются некоторые различия в количественных значениях, что можно объяснить тем, что в отличие от коэффициентов линейной регрессии коэффициенты уравнений регрессии учитывают и взаимное влияния факторов на резульативный показатель. 7. Для выбора эффективных управленческих решений подставив в уравнение регрессии (5) известные значения факторов для работоспособных башенных кранов можно вычислить для каждого из них среднее время поломки, например, для первого крана. (6) Отметим, что вычисленное значение по (5) представляет собой время, в течении которого вероятность поломки крана равна 0,5. Будем считать, что время регистрации состояния для первого работающего башенного крана отстоит от среднего значения наработки на отказ на 3σ (используем правило 3σ для нормального закона [5]), и вычислим стандартное отклонение времени наработки на отказ: (7) Для первого работающего башенного крана вычислим три первых из девяти временных интервалов в диапазоне от -3σ до $+3\sigma$: (8) По стандартизированной нормальной функции (9) где m – количество работоспособных кранов; r – количество учитываемых временных интервалов.

Далее находим вероятности отказа крана для трёх первых из девяти временных значениях: (10) Результаты вычислений по (9) и (10) для первого крана по девяти учитываемым интервалам приведены в таблице 7. Таблица 7 Ин № вре-мен.

интервала i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Время наработ. на отказ	0,0014	0,0228	0,1587	0,3085	0,5000	0,6915	0,8413	0,9772	0,9986
Вероятность поломки p_i	0,0014	0,0228	0,1587	0,3085	0,5000	0,6915	0,8413	0,9772	0,9986
Время отсчета t_i	315,07	1392,8	2470,5	3009,4	3548,3	4087,2	4626,0	5703,8	6781,5

Время проведения профилактических работ назначим по результатам оптимизации, сводящейся к максимизации прибыли от работающего крана, до проведения профилактики: (11) Фактически прибыль (11) можно разложить на три составляющие. Доход от работы крана: (12) Затраты на профилактику: (13) Затраты на ремонт: (14) В математических выражениях (12) – (14) используются следующие стоимостные показатели: Сполезн=700 руб. – доход от одного часа работы крана; Спроф =24000 руб. – затраты на одну профилактику крана; Срем=500000 руб. – средние затраты на ремонт одного крана. В качестве примера в таблице 8 и на рис.4 представлены результаты оптимизации для первого работающего крана. При проведении оптимизации использовалась процедура метода касательных ППП Excel 2010. Таблица 8 №

Время	Вероятность поломки	Доход от работы крана	Затраты на ремонт	Затраты на профилактику	Прибыль
1	315,07	0,0014	220240,231	700	23966,4
2	1392,8	0,0228	195573,831	24000	1392,809
3	2470,5	0,1587	1454930,423	24000	79350
4	3009,4	0,3085	1456708,783	24000	154250
5	3548,3	0,5000	16596	24000	1285862,78

3548,287 0,5000 1241900,450 250000 12000 979900,450 6 408 7,157 0,6915 88262
1,554 345750 7404 529467,554 7 462 6,026 0,8413 51390 5,228 420650 3809
89446,428 8 570 3,765 0,9772 9103 2,089 488600 547 -398115, 111 9 678 1,504
0,9986 6645,874 499300 34 -492687, 726 Рис. 4 – График дохода башенного крана
(работающего) с учетом профилактических и ремонтных работ По таблице 8 и
рис.4 можно определить наилучший вариант по прибыли, равной 1355389,22
рубля, которая может быть получена при проведении профилактики после его
наработки 2470,548 моточасов. Для более точного назначения времени
проведения профилактических работ построим нелинейное уравнение
регрессии: (15) По уравнению регрессии (15) вычислим первую производную (16)
и определим оптимальный срок проведения профилактических работ (17): (16)
(17) Подставив вычисленное по (17) значение $t_{opt}=2566,51$ моточасов в
формулу (15) найдём: (18) Аналогично описанной выше процедуре вычисления
оптимального времени проведения профилактических работ,
продемонстрированной на первом кране, вычислены оптимальные сроки
проведения профилактики ещё для 15-ти работоспособных кранов. Полученные
результаты приведены в таблице 9. Таблица 9 № t_{opt} уопт № t_{opt} уопт 1 2566
1357499,646 9 1381 714193,437 2 1650 872688,552 10 2076 1123068,939 3 1545
810476,099 11 1399 724356,257 4 2738 1513076,353 12 2132 1156278,163 5 2620
1443690,388 13 1356 699523,1 6 2328 1271759,88 14 1627 879332,467 7 2031
1096678,704 15 2333 1274935,283 8 1911 1026454,131 16 2685 1481924,192

Проведенный расчет показал, что оптимальное время выполнения
профилактических работ для 16-ти работоспособных кранов меняется от 1356-ти
до 2685-ти моточасов и доход от работы крана меняется от 699523-х до 1481924-
х руб. Вопросам построения эффективного бизнес- процесса ремонта и
профилактики кранов, а также производственных процессов изготовления и
монтажа вентиляционного и сантехнического оборудования посвящены работы
[8, 9], вопросы прикладной теории массового обслуживания освещены в работах
[10, 11]. В заключение отметим, что ценность предложенной методики
статистического исследования обеспечивается соблюдением следующих
основополагающих принципов. 1. В качестве показателей состояния башенных
кранов используются исходные статистические данные, фиксируемые
стандартным регистратором ОНК-140. Предлагаемая технология позволяет
сравнительно несложно вводить и другие показатели, например, в случае
применения других регистраторов. 2. Математическая модель работы кранов,
построенная на основе регрессионного анализа, позволяет оценить степень
влияния производственно-технических факторов кранов на их наработку на
отказ и оптимизировать процесс выбора времени проведения профилактических
работ. 3. Методика, предложенная для построения модели и оптимизации,
включает в себя апробированные процедуры обработки статистических данных,
обеспечивающие получение корректных результатов. 4. Применение методики

опробовано на реальных данных предприятия по ремонту и профилактике кранов ООО ПИУЦ ЛУН. Выявленные на рассмотренном примере некоторые нежелательные эффекты, в частности, не все производственно-технические показатели удовлетворяют принципу «нормальности», не все коэффициенты линейной корреляции результативного показателя с факторами преодолевают уровень существенности, не все показатели качества полученного уравнения регрессии, укладываются в регламентируемые значения. Наличие указанных недостатков можно объяснить сравнительно небольшим объёмом имеющихся ИСД и при его увеличении эти недостатки будут устранены.