

Применение измерительно-информационных комплексов для управления эксплуатацией карьерного оборудования.

Современная практика предусматривает организацию как можно более интенсивной эксплуатации горных машин, в ходе которой в равной степени важны производительность, надежность и ресурсосбережение. Только комплексное обеспечение всех трех составляющих гарантирует эффективность работы оборудования. Таким образом, необходимым условием эффективной эксплуатации техники становится обеспечение рациональных режимов ее нагружения, характеризующихся, с одной стороны, высокой производительностью, а с другой стороны – минимальным проявлением пиковых нагрузок, режимов холостого хода и тому подобных явлений, неблагоприятных с точки зрения надежности и энергоемкости. Кроме того, для поддержания высокой технической готовности, с учетом удаленности от заводов – изготовителей, желательно реализовать достаточно точное прогнозирование остаточного ресурса заменяемых агрегатов.

В связи с разнообразием горно-геологических, климатических и технологических условий использования оборудования, обосновать универсальные рекомендации по выбору режимов работы и назначению ресурсов техники практически нереально. Соответствующие решения могут вырабатываться только непосредственно на горном предприятии, с учетом всех локальных особенностей, включая квалификацию персонала. Инструментом для этого может служить только постоянный мониторинг режимов работы оборудования, на основании которого возможно:

- Контролировать качество работы оператора и обеспечивающих служб;
- Осуществлять ресурсосберегающую настройку систем привода;
- Определять показатели организационно-технологической эффективности, в том числе коэффициенты использования и технической готовности.
- Прогнозировать остаточный ресурс узлов и агрегатов;
- В случае отказов агрегатов, определять, что явилось истинной причиной отказа;

Следует отметить, что большинство машин в настоящее время оснащено бортовыми компьютерами, постоянно фиксирующими определенные параметры. Однако использование предоставляемых ими данных для целей эксплуатации, как правило, затруднительно, поскольку как набор характеристик, так и способы их хранения и обработки определяются спецификой задач сопровождения и гарантийного обслуживания по интересам изготовителя. Поэтому в интересах эксплуатации необходимо организовывать специальный мониторинг, и современные измерительные технологии предоставляют достаточную аппаратную базу для этих целей [1-2].

Специально для решения эксплуатационных задач авторами, с участием специалистов ЗАО «Аэротест», разработан измерительно-информационный комплекс (рис. 1), состоящий из набора датчиков, измеряющих те или иные физические параметры (давления, температуры, усилия, перемещения и т.п.) и соединенных с накопителем информации. Последний производит непрерывный или периодический опрос датчиков и накопление результатов измерений в собственной памяти. Специальное считывающее устройство обеспечивает перенос в компьютер, на котором установлено программное обеспечение, позволяющее анализировать данные. Комплекс испытывался в условиях угледобывающего разреза, где эксплуатируются мощные гидравлические экскаваторы и буровые станки. Объектом наблюдения служили гидравлические системы указанных машин, измерялись параметры давления и температуры жидкости. В качестве информационного накопителя был

применен анализатор физических параметров типа АФПу [3], функционировавший в двух режимах:

- «Электронный самописец», или «Регистратор», в котором производится регистрирование сигнала по каждому из аналоговых каналов с заданным интервалом времени и запись этой информации в энергонезависимую память устройства;
- «Накопитель», или «Анализатор», в котором производится автоматическое построение гистограммы результатов измерений во времени, иными словами фиксируется время нахождения машины под определенной нагрузкой (в данном случае – при определенном давлении). Прибор АФПу позволяет различать 10 уровней (интервалов).

Данные о расположении датчиков приведены в табл. 1. Испытания производились в течение 6 месяцев (февраль-июль), суммарная продолжительность измерений составила 734,45 моточаса.

Непосредственным результатом измерений являлись массивы значений давлений и температур, регистрировавшиеся с периодичностью от 1 секунды до 1 минуты, в зависимости от настройки анализатора АФПу. Эти данные подвергались первоначальной обработке с отбраковкой грубых ошибок [1] и визуализировались в виде исходных диаграмм, а также гистограмм (рис 2а-б). С целью перекрестной проверки осуществлялся пересчет данных, полученных в режиме «электронный самописец», и сравнение результатов с гистограммами, непосредственно записанными в режиме «накопитель». Из рис. 2в-г видно, что результат оценки нагрузок не зависит от режима работы прибора, то есть последний обеспечивает вполне удовлетворительную точность.

Дальнейшая обработка данных производилась с целью выявления закономерностей работы карьерных машин и определения путей оптимизации их эксплуатации.

Таблица 1.

Расположение датчиков в ходе испытаний

| Машина | Параметр | Канал | Датчик | Место установки датчика |
|-------------|----------------|----------|----------|--|
| Экскаватор | давление | 3 | PS-3-350 | напорная гидролиния насоса привода рабочего оборудования - НГНПРО (ковш) |
| | | 4 | PS-4-350 | НГНПРО (стрела) |
| | | 5 | PS-5-350 | НГНПРО (рукоять) |
| | | 6 | PS-6-350 | напорная гидролиния насоса привода поворота |
| | | 2 | PS-1-350 | Сливная гидролиния (вход фильтровальной установки) |
| | температура | 7 | Temp7 | гидробак |
| | | 8 | Temp8 | НГНПРО |
| | Буровой станок | давление | 1 | PS-1-35 |
| 2 | | | PS-2-350 | Линия высокого давления. Насос №1 |
| 4 | | | PS-4-35 | Линия низкого давления. Насос №2 |
| 5 | | | PS-5-350 | Линия высокого давления. Насос №2 |
| температура | | 7 | T7 | Линия высокого давления |
| | | 8 | T8 | Линия низкого давления |

На рис. 2а прослеживаются все три характерных режима эксплуатационного процесса: простой (привод выключен, напорное давление равно нулю), холостой ход (давление в напорной и сливной гидролиниях примерно равны и составляют 0.5-1.0 МПа) и рабочий цикл (напорное давление колеблется с высокой амплитудой). Очевидно, что численный анализ исходных массивов позволяет определить реальные значения коэффициента использования (K_n) машины (рис. 3). Те же данные могут быть получены автоматически, с применением анализатора АФПу в режиме накопителя, с соответствующей разбивкой диапазонов. Следует

отметить, что применение стандартного счетчика моточасов в данном случае дало бы величину коэффициента использования 82%. В действительности же реальное значение $K_{и}$ следует вычислять как:

$$K_{и} = (T - T_{п} - T_{xx}) / T$$

где T – время наблюдений. Тогда, по данным рис. 3, коэффициент использования получится равным 60%, так как 22% времени привод работал на холостом ходу. При этом, по-видимому, можно считать, что большая часть «холостого пробега» связана с непосредственным управлением экскаватором, поскольку складывается из кратковременных (от 1 до 14 мин) остановок, и только меньшая часть – с технологическими недочетами (ожидание транспорта и т.п). Поскольку работа привода на холостом ходу означает лишь напрасную потерю моторесурсов и топлива, подобная картина является основанием для подробного анализа технологических особенностей эксплуатации данной машины. Очевидно, что интенсивность ее использования может быть увеличена или, по крайней мере, имеются возможности для ресурсосбережения.

Изучение исходных диаграмм обуславливает целесообразность введения понятия «рабочий цикл», означающего промежуток времени между двумя соседними выключениями или остановками привода на холостой ход. Статистический анализ показывает, что продолжительность рабочего цикла может колебаться в пределах от 1 минуты до 2.5 часов, ее среднее значение составляет около получаса, а математическое ожидание – примерно 15 минут. По-видимому, можно считать, что эта величина распространена по логарифмически нормальному закону (рис. 4) На рис. 5 приведены диаграмма (а) и гистограмма (б) характерного рабочего цикла экскаватора.

Из гистограммы видно, что эквивалентное рабочее давление, рассчитываемое, с учетом гипотезы линейного суммирования повреждений, по формуле:

$$p_{эқв} = \Sigma(p_i * t_i / T)$$

где p_i – давление, действовавшее в течение времени t_i ; $\Sigma t_i = T$, существенно ниже номинального, и составляет около 10 МПа, что хорошо коррелируется с известными результатами [4] (рис.6). На более длительных отрезках времени, включающих, кроме рабочих циклов, еще и холостой ход, величина $p_{эқв}$ будет еще ниже (рис.7). Вместе с тем вывод о наличии зависимости между величинами эквивалентного давления и продолжительности наблюдений был бы ошибочным (рис. 8). Очевидно, разнообразие горно-геологических и климатических условий делает невозможным предсказание величины эквивалентной нагрузки даже на основании весьма длительных испытаний, и, для получения достоверных результатов прогнозирования остаточного ресурса желателей постоянный контроль режимов нагружения.

Общеизвестно, что долговечность агрегатов есть степенная функция эквивалентного рабочего давления:

$$R_A = k_d * R_{номА} * (p_{ном} / p_{эқв})^a$$

Здесь R_A , $R_{номА}$ – фактический и номинальный ресурсы агрегата, $p_{ном}$, $p_{эқв}$ - номинальное (в данном случае за «номинальное» принимается давление настройки предохранительного клапана) и эквивалентное рабочее давление; k_d – коэффициент динамичности. Анализ литературных данных показывает, что, в зависимости от конструктивных особенностей механизмов, величина a колеблется в интервале [1,7...3]. Эксперименты, проведенные применительно к аксиально-поршневым гидромашинам, определили значение $a = 2$ [5]. Величину коэффициента динамичности в данном случае определим как:

$$k_d = (p_{макс} - p_{мин}) / (2 * p_{ном})$$

Здесь p_{\max} ; p_{\min} – соответственно максимальное и минимальное текущее значение давления (см. рис. 9а), Таким образом, величина эквивалентного рабочего давления, вычисленная на основании накопленных данных о режимах нагружения, может быть использована для определения остаточного ресурса агрегатов по формуле:

$$R_{\text{остА}} = k_d * (R_{\text{ноmA}} * [p_{\text{ном}} / p_{\text{экв}}(T)]^a - T)$$

Здесь $p_{\text{экв}}(T)$ - эквивалентное рабочее давление, определенное на отрезке времени T .

Из рис. 9 видно, что даже в стабильном тепловом режиме для всех исполнительных механизмов экскаватора характерна высокая динамичность рабочего процесса. Для бурового станка характерна значительно меньшая динамика (рис. 10). Средняя амплитуда колебаний давления в напорной магистрали гидросистемы экскаватора достигает 58% от номинального давления, частота – до 75 мГц). Такая информация дает возможность не только уточнить прогноз остаточного ресурса агрегатов, но и предсказать долговечность элементов гидролиний, в том числе рукавов высокого давления, в виде:

$$R_{\text{остГЛ}} = (N_{\text{ГЛ}} - K_{\text{и}} * Z * T) * (p_{\text{ном}} / p_{\text{макс}})^a$$

Здесь $N_{\text{ГЛ}}$ – номинальная долговечность элемента гидролиний, циклов, Z - частота колебаний давления.

Обращает на себя внимание высокая динамика сливной гидролинии. Зачастую давление здесь снижается до нулевого уровня, что, несомненно способствует появлению кавитационных процессов. Реализация подобных режимов работы может являться, в частности, причиной поломок гидрошин. Так, на рис 11 приведена фотография распределительного диска аксиально-поршневого гидромотора привода поворота экскаватора. На кромках питающих отверстий (семидолей) явно заметны следы кавитационного износа. Вообще, высокая амплитуда колебаний свидетельствует о недостаточной стабильности работы гидросистемы. В таких случаях целесообразно поставить вопрос перед изготовителем машины об усовершенствовании конструкции гидропривода путем применения соответствующих демпфирующих устройств, прежде всего в реверсивных контурах вращательного движения.

Интересно отметить, что, несмотря на высокую динамику, максимальные измеренные значения давлений (28 МПа) несколько ниже показателей настройки предохранительных клапанов (31 МПа), что указывает не только на хорошую работу регуляторов объемной подачи насосов, но также и на достаточность энерговооруженности экскаватора для данных горногеологических условий. Это наблюдение открывает дополнительные резервы для повышения надежности гидравлической системы. В самом деле, из диаграмм видно, что общее время функционирования в интервале давлений от 25 до 28 МПа (иллюстрируется рис. 12) не превышает 1% от эффективного рабочего времени. Поэтому ограничение нагрузок уровнем 25 МПа путем перестройки регуляторов и клапанов не приведет к изменению производительности экскаватора, но существенно снизит риск внезапных отказов, и прежде всего, разгерметизаций гидросистемы.

В ходе испытаний стало очевидно, что применение перенастраиваемых информационных накопителей с широким набором датчиков позволяет получить столь значительное количество данных, что скорость обработки и анализа последних становится критичным фактором. В полной мере возможности подобных технологий для оптимизации эксплуатации горных машин могут быть реализованы только при наличии специальной программы-обработчика, обеспечивающей своевременный и объективный анализ больших потоков информации. В свою очередь, программное обеспечение должно иметь возможность адаптации с учетом специфики задач, стоящих перед организацией, эксплуатирующей технику.

Таким образом, выходные данные предлагаемого измерительного комплекса, обработанные определенным образом, позволяют оперативно оценивать время и динамику простоев, холостого хода и рабочего цикла, что, в свою очередь, дает возможность судить о непроизводительном расходе топлива, позволяет контролировать работу персонала и выбирать более рациональные технологические режимы эксплуатации. Кроме того, анализируя динамику работы машины, можно с высокой степенью достоверности установить причины отказов тех или иных систем, а также выработать рекомендации для совершенствования оборудования и более обоснованного принятия решений о закупке тех или иных моделей техники.

Относительно низкая стоимость предлагаемого измерительно-информационного комплекса (она примерно соответствует стоимости топлива, потребляемого мощным гидравлическим экскаватором за 2 часа работы на холостом ходу), простота его установки и - в первую очередь – открываемые им возможности контроля и управления, позволяют предположить, что экономия от его внедрения будет колоссальной как с точки зрения установления оптимальных режимов работы машины, так и с точки зрения предвосхищения возможных отказов агрегатов и повышения надежности гидросистем.

Литература

1. Бродский Г.С., Шмарьян Е.М., Гавинский Ю.А. Инструментальный комплекс для исследования и контроля эксплуатационных параметров тяжелых экскаваторов. 10-я Всесоюзная конференция по молекулярной электронике, Краснодар, 1986 г.
2. Екимов В.К., Федосеев В.Н., Енютин Ю.А., Литвинов В.А., Штейнцвайг В.М., Левченко Е.М., Шумаков А.Б., Бродский Г.С., Бродская Е.С., Волкова С.В. Применение мобильного измерительного комплекса для мониторинга мостовых сооружений. «Приборы+Автоматизация», №5(47)б 2004, с. 23-30
3. Бродский Г.С., Фаерштейн Л.Н., Шумаков А.В., Штейнцвайг В.М. Информационные накопители как средство контроля и диагностики состояния техники. ИГД им. А.А.Скочинского, 2004
4. Бродский Г.С. Повышение надежности гидрофицированных роторных экскаваторов путем создания систем кондиционирования рабочей жидкости. Дисс. к.т.н., М., ИГД им. А.А. Скочинского, 1986
5. Бродский Г.С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин. М., «Горная промышленность», 2004 – 360 с.

Рисунки к статье:

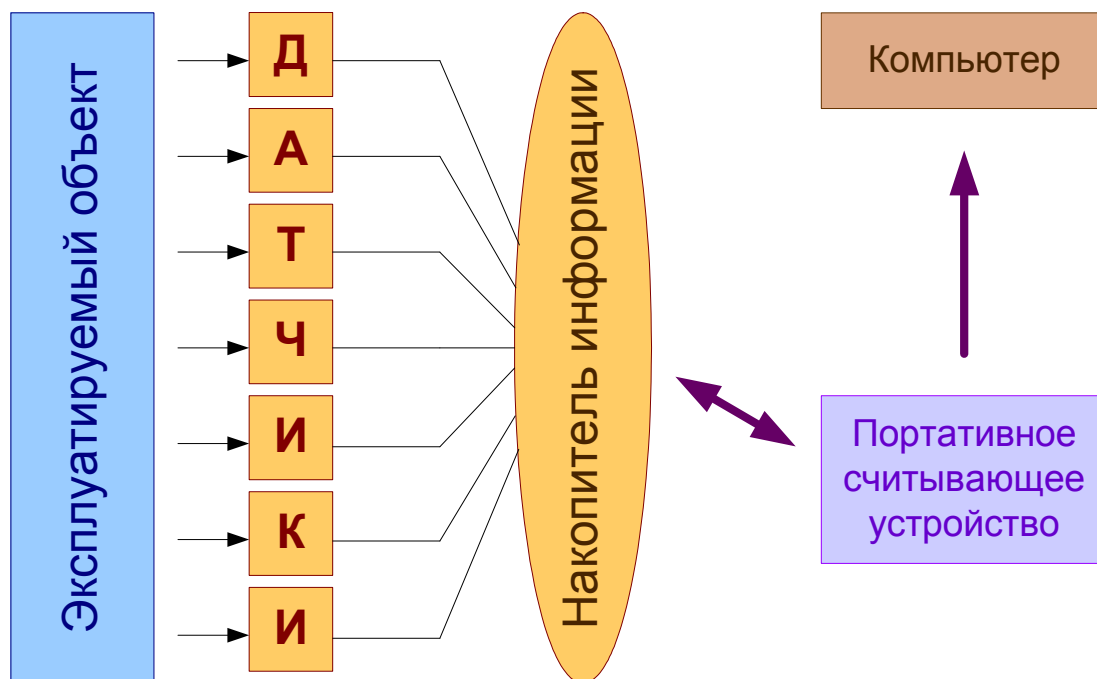
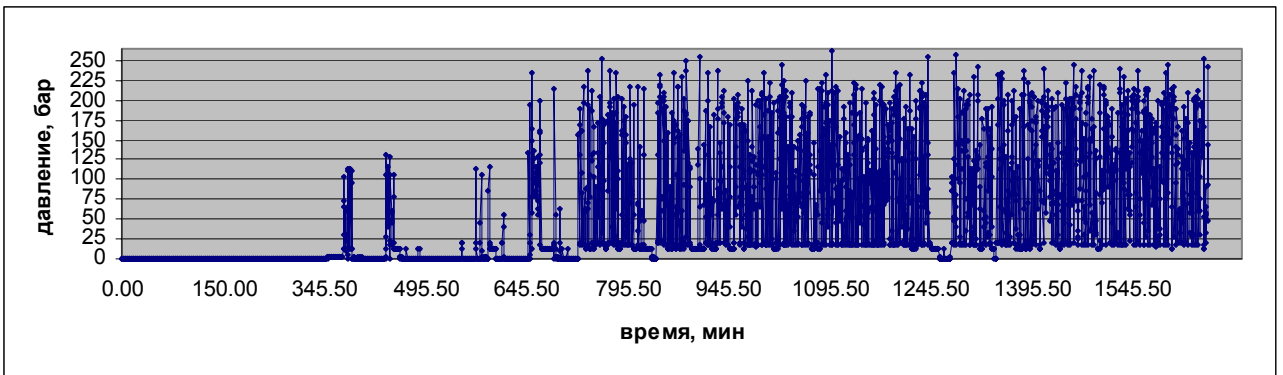
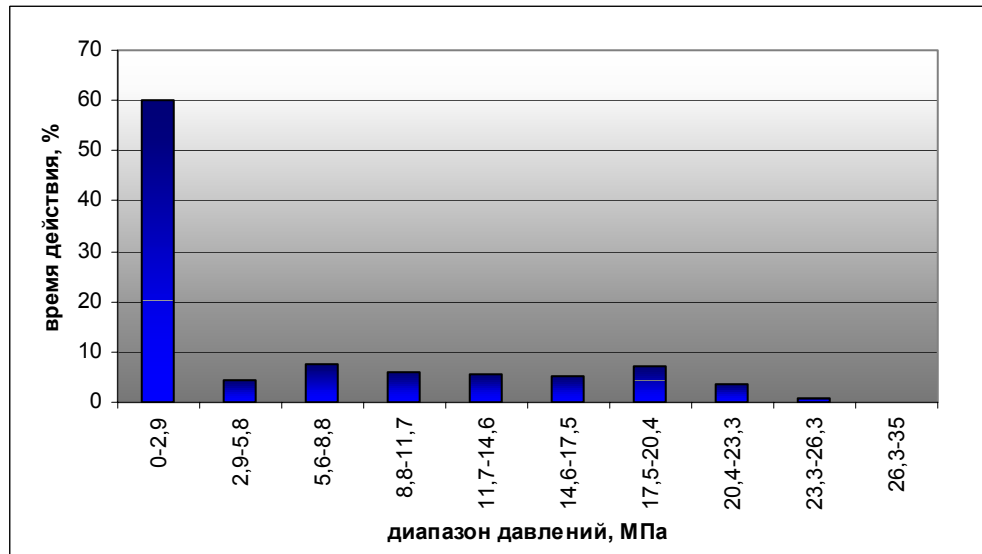


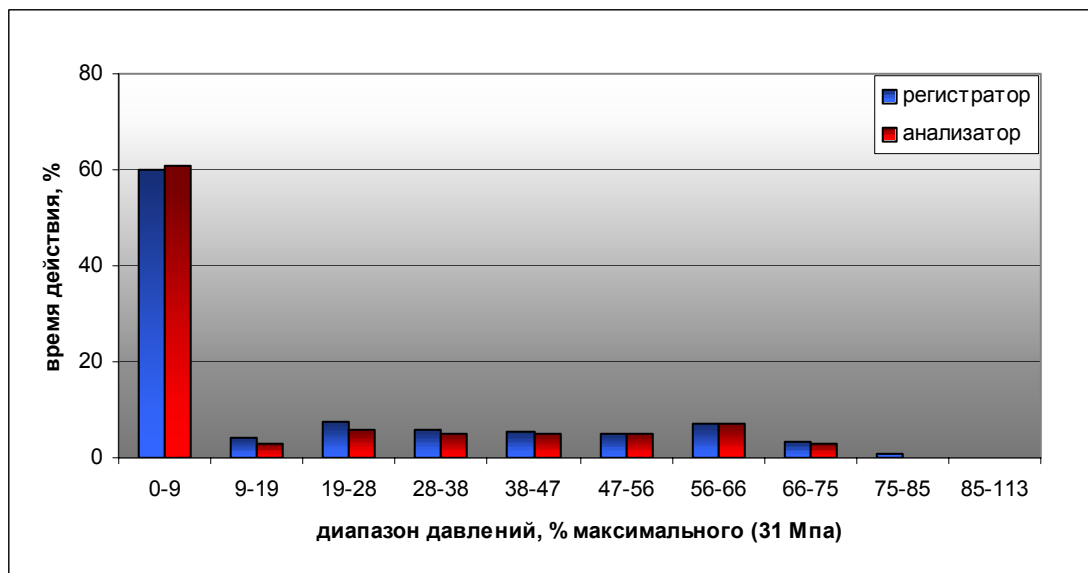
Рис. 1. Принципиальная схема измерений



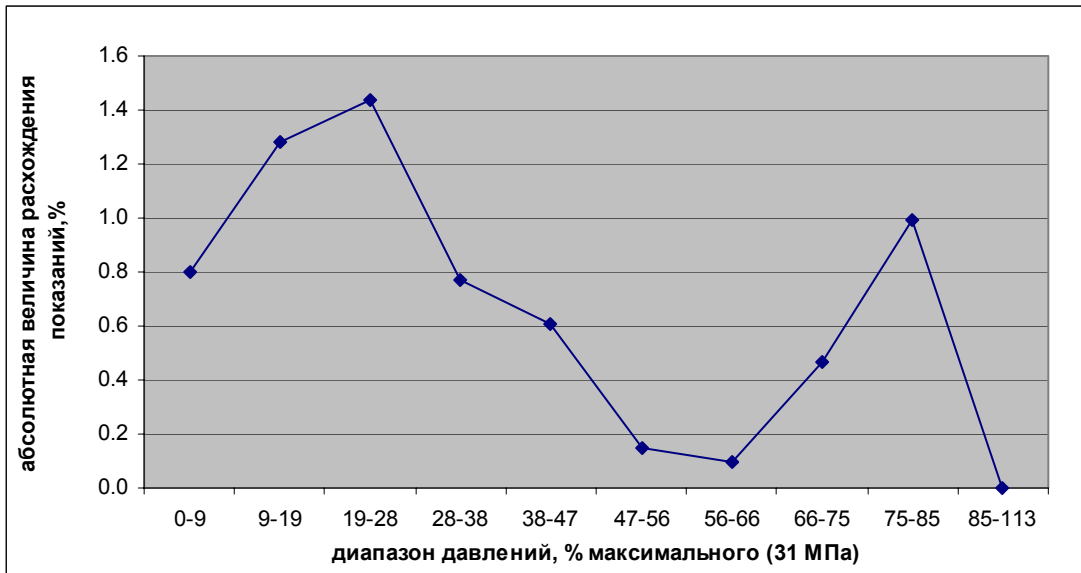
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Пример исходной диаграммы (а) и гистограммы (б) нагружения гидропривода рабочего оборудования экскаватора за 27.55 часа (Частота измерений 33 мГц). Сравнительная гистограмма нагружения (в) и расхождение показаний приборов (г).

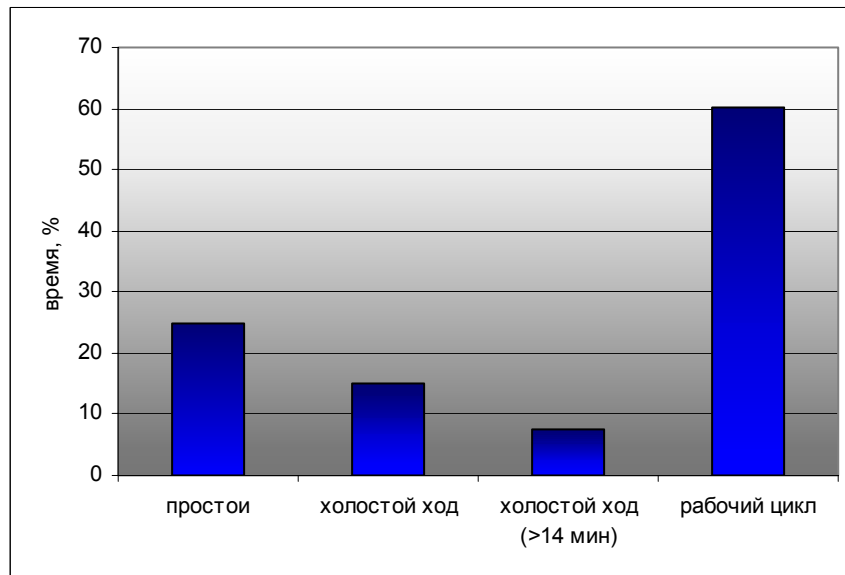


Рис.3. Определение коэффициента использования с применением информационных накопителей. На примере экскаватора по данным за 129,9 часа.

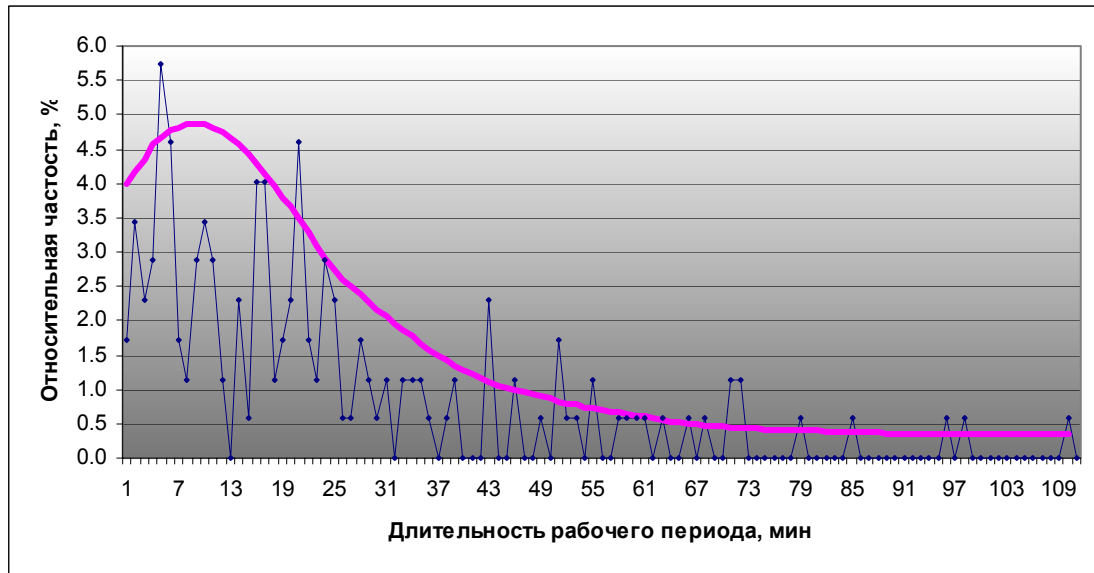
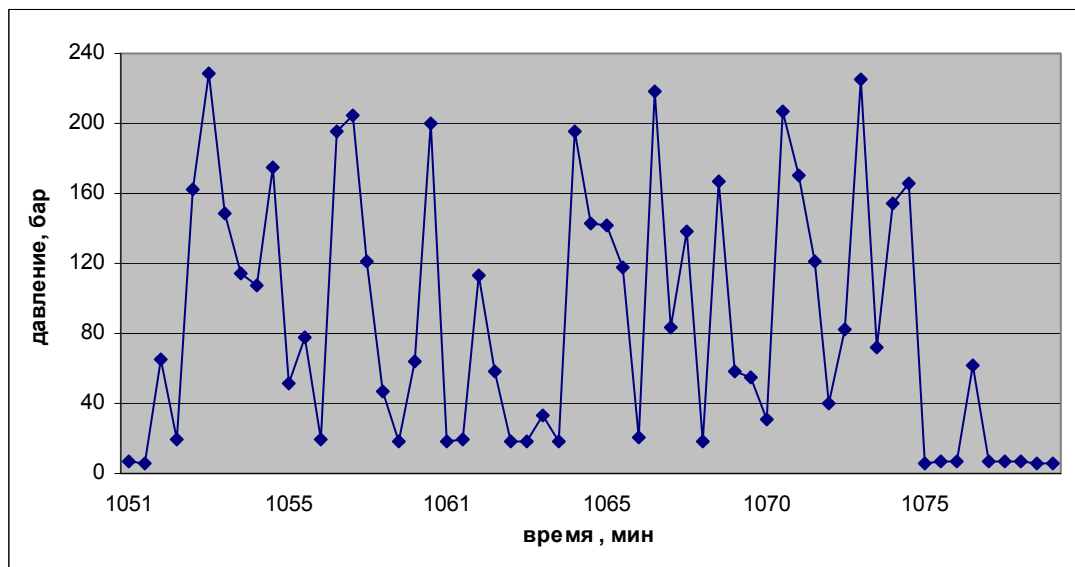
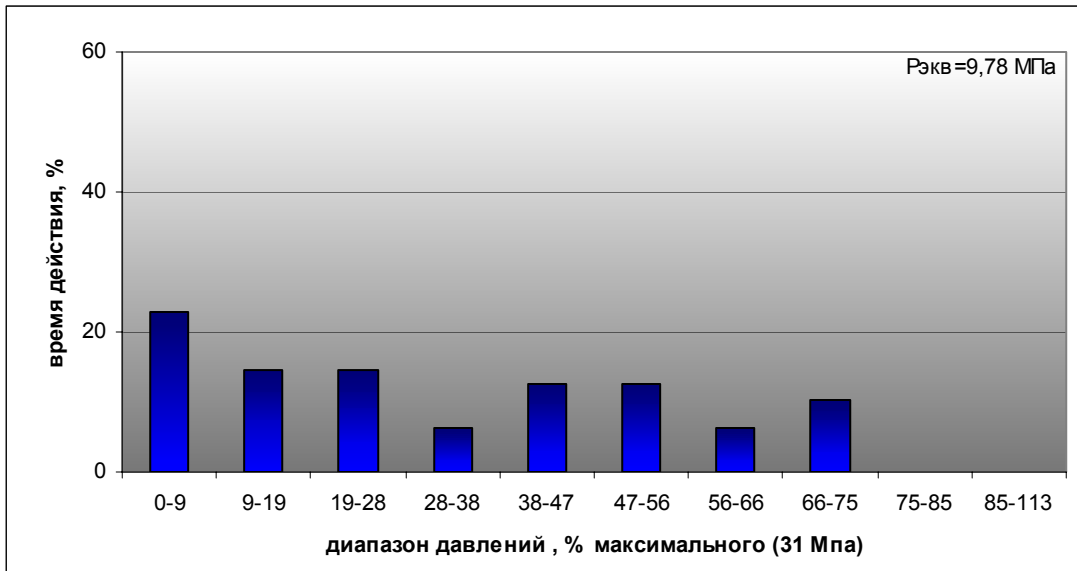


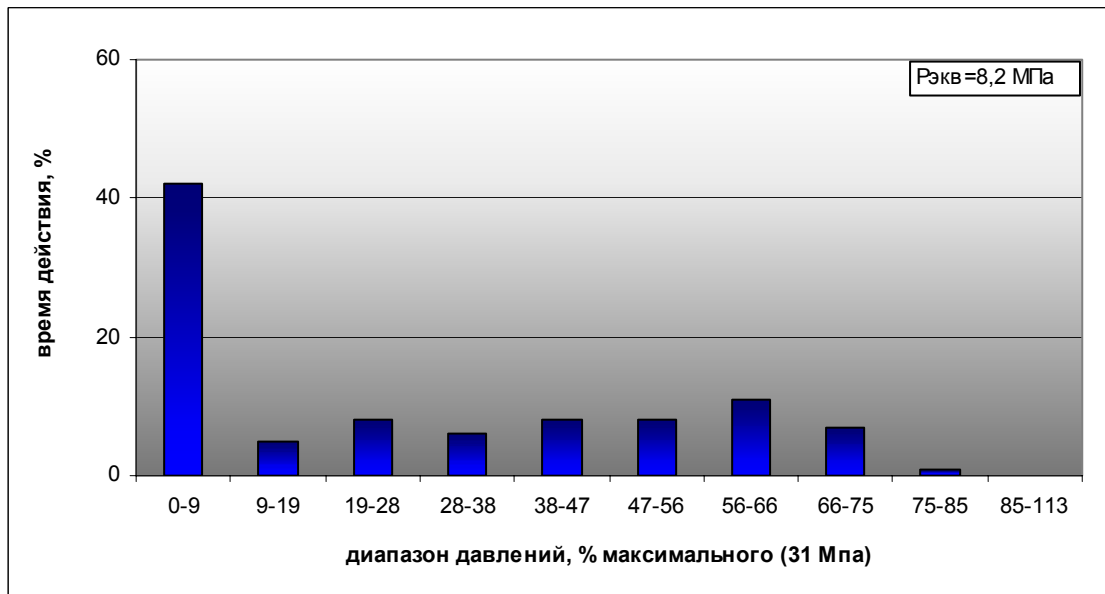
Рис. 4. Распределение величины продолжительности рабочего цикла экскаватора по данным за 130 моточасов (всего 174 рабочих цикла)



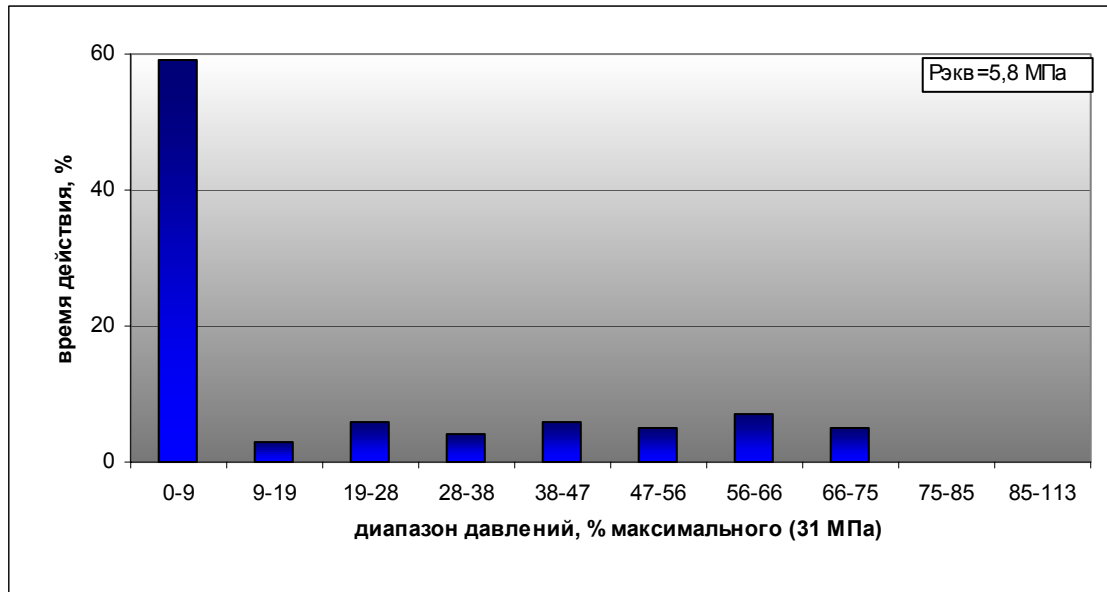
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Нагрузки привода рабочего оборудования экскаватора:
а - в течение характерного рабочего цикла, диаграмма, периодичность измерения 30 с;
б - в течение характерного рабочего цикла, гистограмма;
в - в течение 212 моточасов;
г - в течение 500 моточасов.

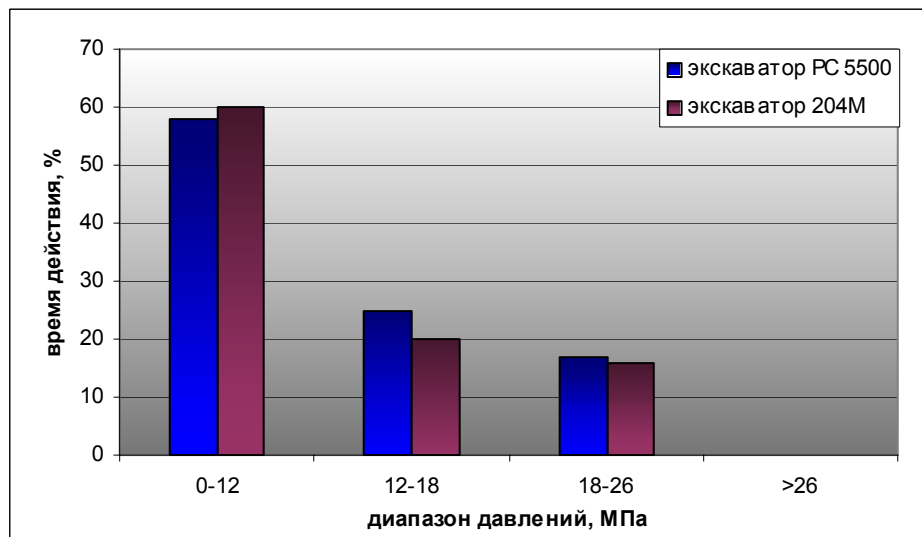


Рис. 6. Гистограмма нагружения рабочего оборудования гидрофицированного экскаватора 204M Superfront и современного гидравлического экскаватора PC5500

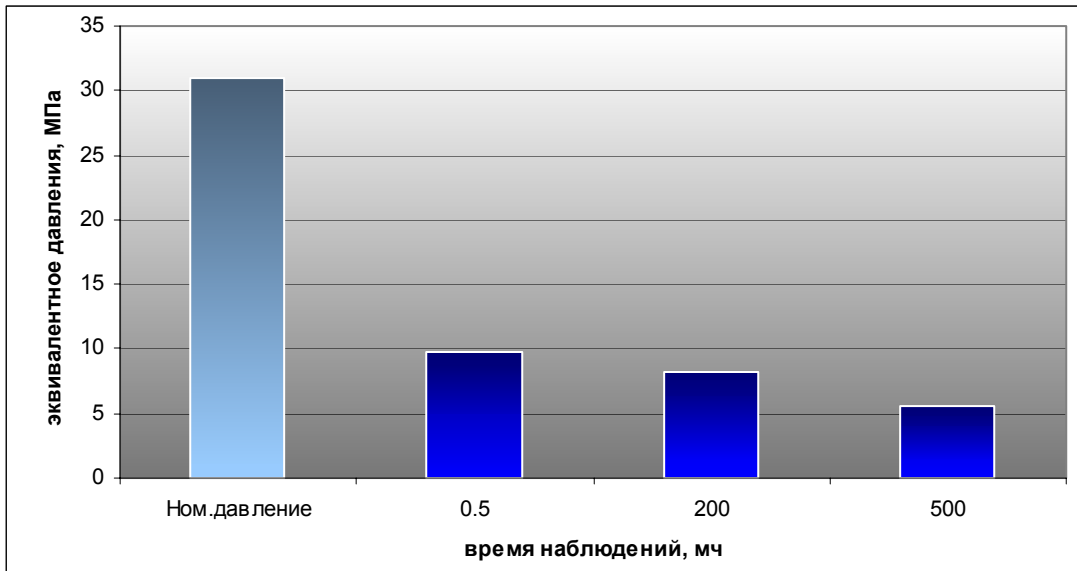
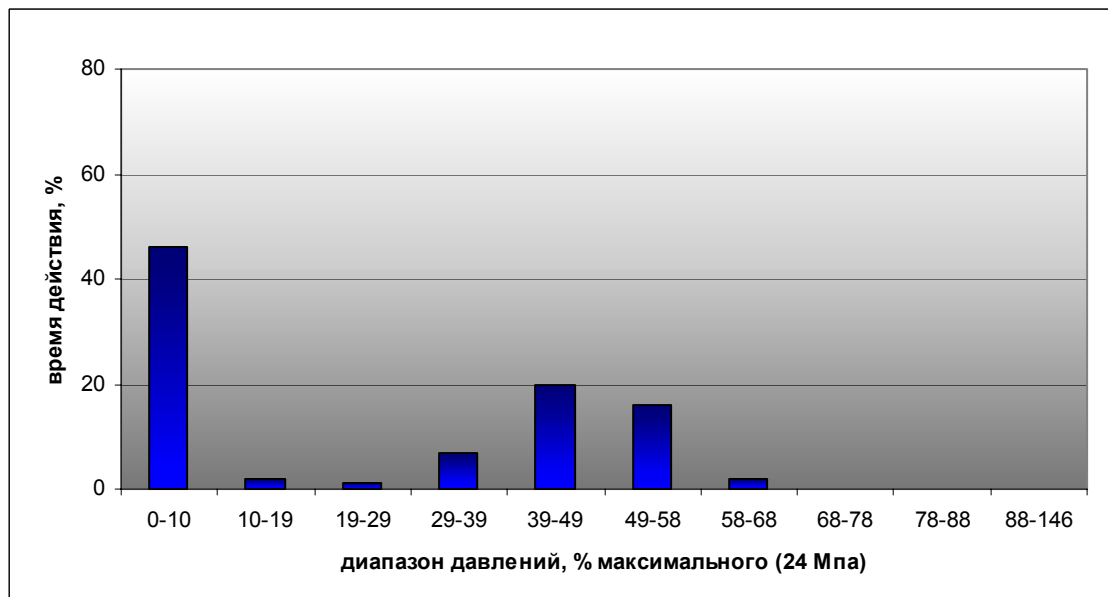
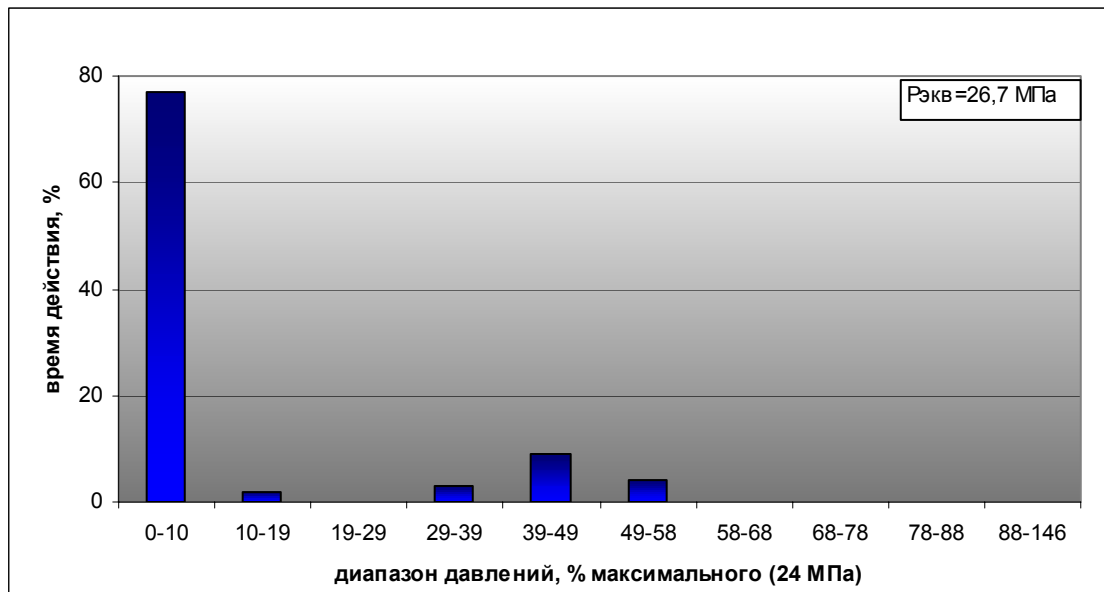


Рис. 7. Зависимость величины эквивалентного давления в напорной гидролинии привода рабочего оборудования экскаватора от продолжительности наблюдений (величина 0.5 мч соответствует длительности рабочего цикла)



а)

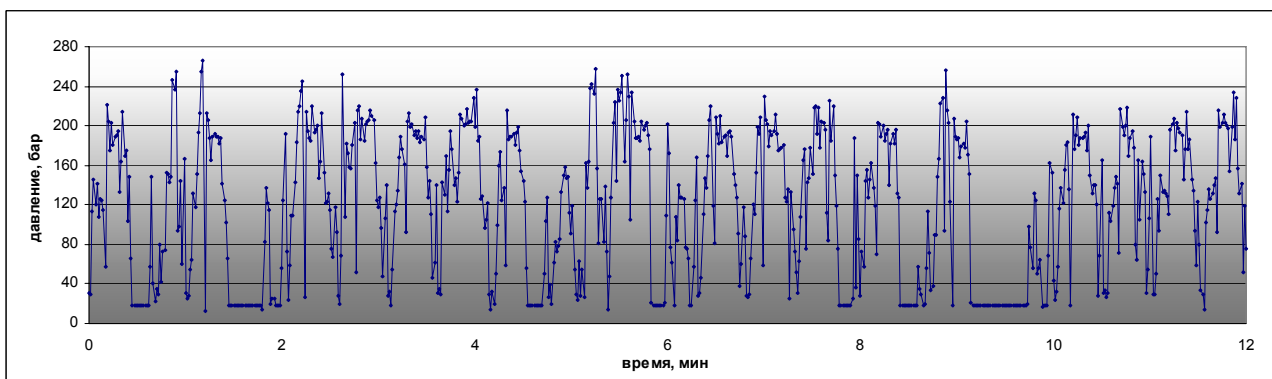


б)

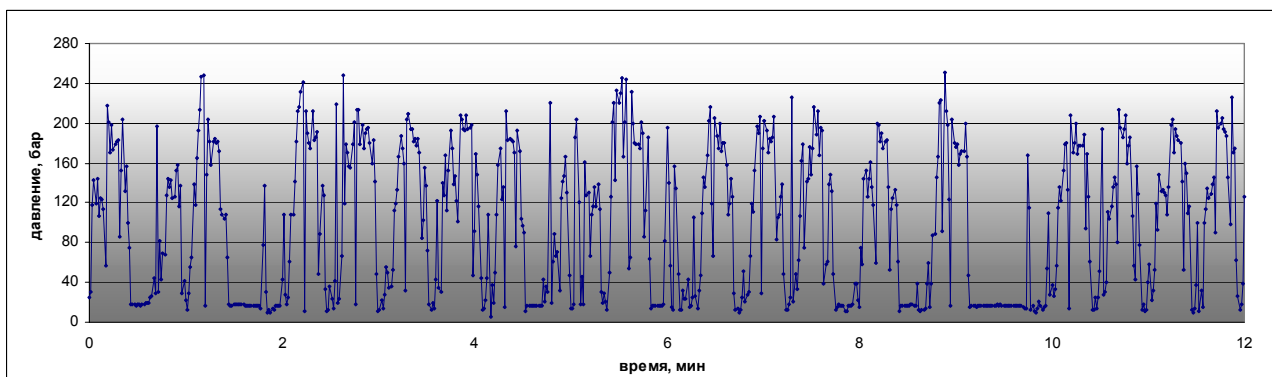
Рис. 8. Гистограммы нагружения привода бурового станка

а – за 13 суток (312 моточасов)

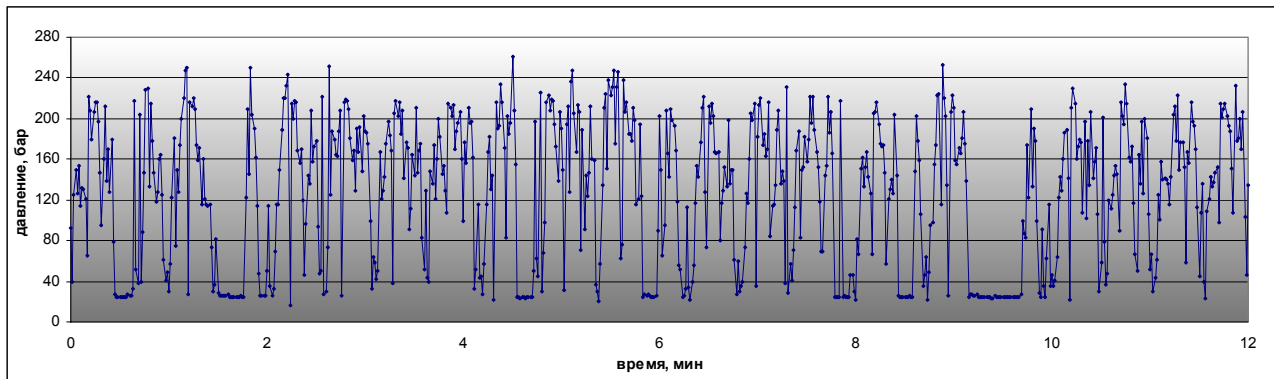
б – за 8 суток (192 моточасов)



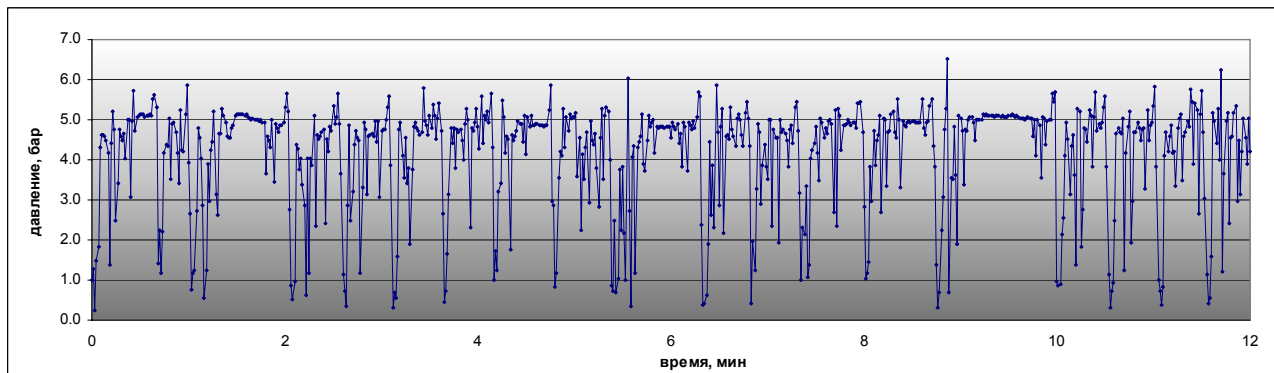
а)



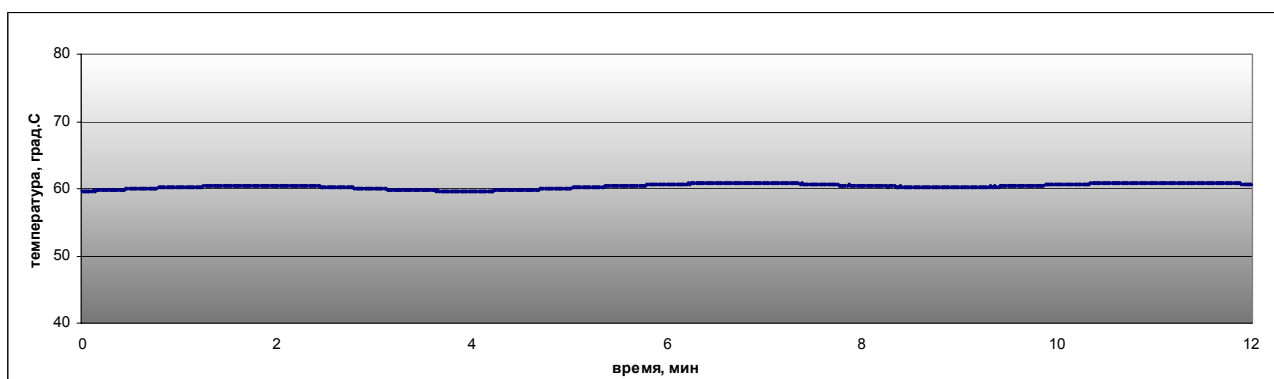
б)



в)



г)



д)

**Рис. 9. Характерная диаграмма нагружения привода экскаватора
(продолжительность записи 12 мин)**

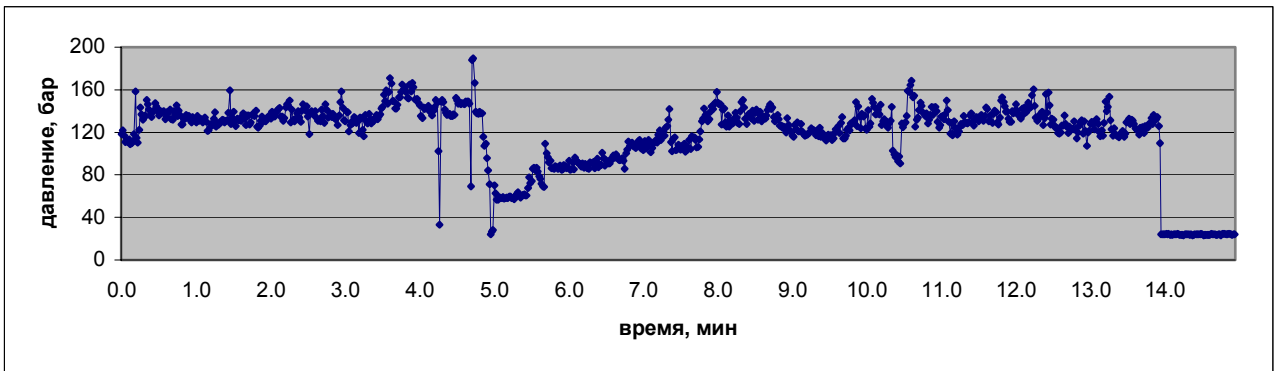
а – рабочее оборудование, насос №1

б - рабочее оборудование, насос №2

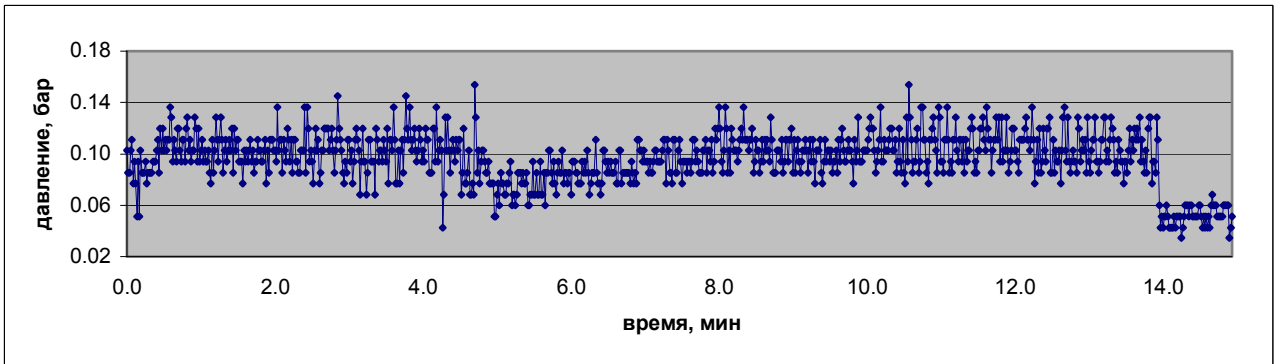
в – насос привода поворота

г – сливная гидролиния, вход фильтровальной установки

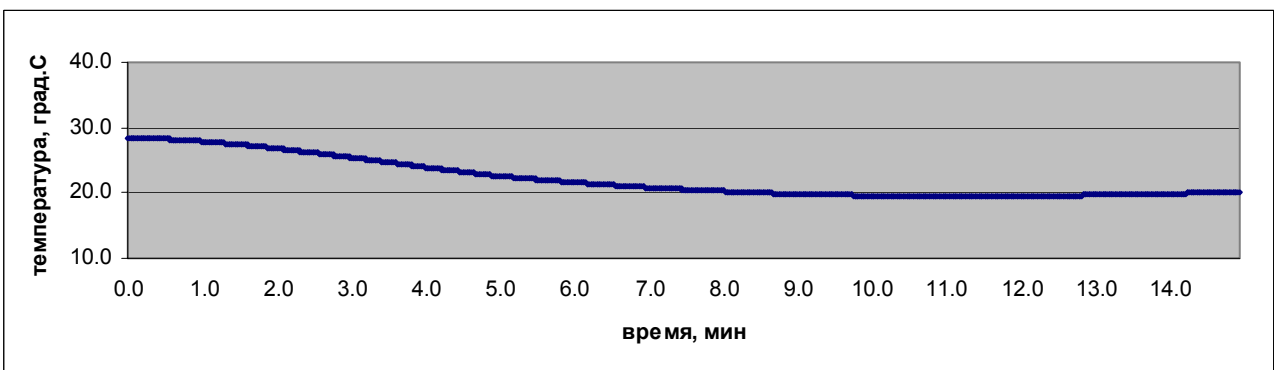
д - температура в напорной гидролинии



а)



б)



в)

Рис. 10. Характерная диаграмма нагружения привода бурового станка за 15 минут работы

а – напорная гидролиния

б – сливная гидролиния

в - температура



Рис. 11. Распределительный диск гидромотора поворота со следами кавитационного износа (гидропривод экскаватора)

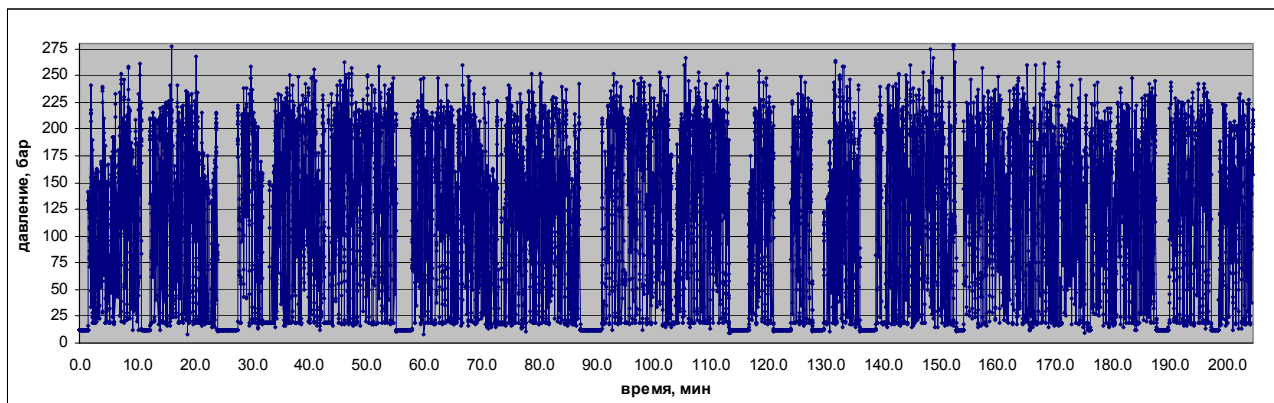


Рис. 12. Диаграмма нагружения привода рабочего оборудования экскаватора. Периодичность регистрации давления 1 с.