

УДК 621.65

doi:10.18720/SPBPU/2/id20-357

Мухаммадиев Мурадулла¹
muhammadiyev_m@rambler.ru

Гловацкий Олег Яковлевич²
g_oleg1982@mail.ru

Эргашев Рустам Рахимович³
erustamrah@mail.ru

Насырова Наира Равильевна¹
n_naira1982@mail.ru

Саидов Фарид¹
saidov.farid.tdtu@mail.ru

¹*Ташкентский государственный технический университет
имени Ислама Каримова, Узбекистан, г. Ташкент*

²*Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем,
Узбекистан, г. Ташкент*

³*Ташкентский институт инженеров ирригации
и механизации сельского хозяйства, Узбекистан, г. Ташкент*

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ГОТОВНОСТИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ МЕТОДАМИ ДИАГНОСТИКИ

Аннотация. В статье представлены разработанные методы и модели анализа динамических показателей насосных агрегатов для разных временных интервалов их состояния при эксплуатации. Основными задачами оценки технического состояния являются выявление отклонений от проектных решений, наличия повреждений, дефектов конструкций насосов, которые могут стать причиной аварий. Приведены результаты разработки диагностической системы насосных агрегатов на насосных станциях. Рассмотрены условия связующих звеньев насосно-энергетического оборудования и его диагностирования. Внедрение предлагаемой диагностической системе приведёт к снижению затрат при эксплуатации насосных агрегатов и расходов на их техническое обслуживание.

Ключевые слова: насос, агрегат, диагностика, эксплуатация.

*Mukhammadiev Muradulla*¹
muhammadiyev_m@rambler.ru

*Glovatsky Oleg*²
g_oleg1982@mail.ru

*Ergashev Rustam*³
erustamrah@mail.ru

*Nasyrova Naira*¹
n_naira1982@mail.ru

*Saidov Farid*¹
saidov.farid.tdtu@mail.ru

¹*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov,
Uzbekistan, Tashkent*

²*Research Institute of Irrigation and Water Problems, Uzbekistan, Tashkent*

³*Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers,
Uzbekistan, Tashkent*

ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION AND READINESS OFF PUMP UNITS BY DIAGNOSTIC METHODS

Abstract. The article presents methods and models of sequential analysis of dynamic coefficients of change of pumping units for different time intervals of their state. The main tasks of assessing the technical condition are to identify deviations from design decisions, the presence of damage, defects in the design of the pumps, which can cause accidents. The results of the development of a diagnostic system of pumping units at pumping stations are presented. The conditions of the connecting links in the operation of the main pumping and power equipment and its diagnosis are considered. Implementation of the proposed diagnostic system will reduce the cost of operating pumping units and the cost of their maintenance.

Keywords: pumping, units, condition, diagnostic, system, operation, maintenance.

Введение

Техническое состояние ирригационных насосных агрегатов (НА) должно обеспечивать бесперебойное и эффективное по-

крытие заданного графика водоподачи, себестоимость перекачиваемой воды, а также показатели надёжности агрегатов [1–3].

Основной особенностью оценки технического состояния НА является учёт факторов старения узлов, каналов, гидроагрегатов. Это можно сделать на основе диагностики динамического уровня элементов НА в процессе эксплуатации. После анализа полученных данных можно будет принять решение о дальнейшем использовании или модернизации насосного агрегата.

Материалы и методы

Оценка технического состояния и безопасности эксплуатации положена в основу реконструкции гидротехнического узла насосных станций.

Использованы методы принципиально нового теоретического подхода к проблеме надёжности функционирования сложных систем.

Результаты

Известно, что в большинстве случаев «диагностика» технического состояния НА ограничивается измерением рабочих характеристик, а именно, напора и подачи. Причём, в связи с отсутствием или дороговизной расходомеров, чаще всего, только напора [2, 4].

Напор, таким образом, является основным показателем работоспособности агрегата. Однако, несмотря на простоту установки манометров для его измерения и высокую точность, абсолютное значение напора без соотнесения его с режимом по подаче не дает возможности оценить истинное техническое состояние насоса. Это связано с тем, что напор сильно зависит от подачи, которая, в свою очередь, является функцией режима работы насоса в широком смысле.

Обобщённый показатель технического состояния НА состоит из трёх комплексных параметров: технического состояния, технического уровня и технологического процесса, всесторонне отражающих свойства НА в процессе эксплуатации.

Универсальность обобщённой оценки технического состояния НА позволяет сравнивать между собой различные типы насосов.

Для оценки технического состояния наиболее целесообразно использовать индексы технического состояния:

$$V_q = \prod_{i=1}^n (q_i)^{\alpha_i},$$

где n – число показателей технического состояния; q_i – показатель технического состояния; α_i – параметр весомости i -го показателя технического состояния.

Для аппроксимации расходных характеристик НА применены современные методы использующие различные финитные полиномиальные функции [4, 5]. Разработана новая диагностическая система. Новые диагностические системы используются на натуральных объектах и стендах ТИИМСХ, ТагГТУ и ПО «Сувмаш» (рисунок 1).

Основной целью диагностики НА является прогнозирование в них дефектов в процессе эксплуатации и обеспечения надёжной и эффективной работы.



Рис. 1. Исследования новых диагностических приборов

В настоящее время большинство портативного или временного диагностического оборудования используется для определения состояния насосов. При определении состояния насосных агрегатов теоретико-информационный подход является перспективным.

Во время работы насосных станций можно по вибрации на режимах, когда, например, кавитация в насосе есть, но ещё нет кавитационного срыва, приводящего к резкому падению давления и расхода на выходе насоса, обнаружить кавитацию и стадию её развития, т. е. выполнить диагностику потока в насосе.

На основе кинематической схемы, приведённой на рисунке 2, был разработан лабораторный стенд для изучения технического состояния НА, где был проведён ряд экспериментов [6, 7].

Лабораторный стенд состоит из электродвигателя, силовых трансмиссионных муфт, насосов, манометров для измерения давления воды, задвижек для закрытия и открытия воды, а также

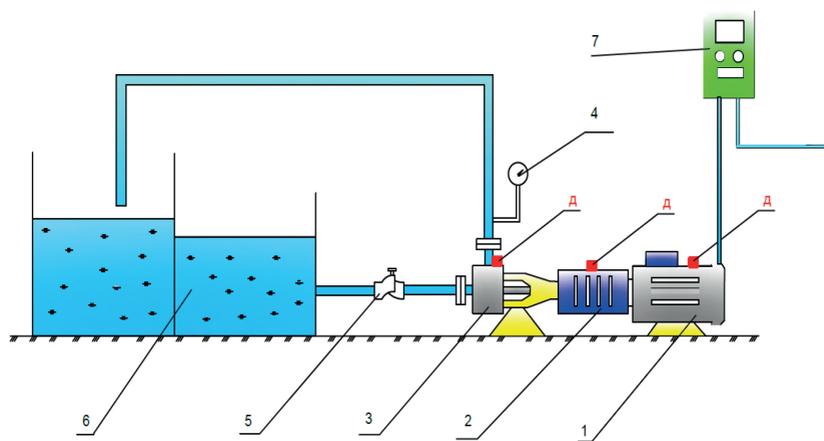


Рис. 2. Кинематическая схема вибростенда насоса:

- 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – насосный фланец;
- 4 – манометр для измерения давления воды; 5 – кран;
- 6 – резервуар для воды; 7 – устройство контроля вращения насоса;
- d* – датчики вибрации

устройства для изменения параметров насосов и числа оборотов вращения насоса. Водозаборник заполняется необходимым количеством воды. Чтобы открыть воду, открывается задвижка, и вода по трубе поступает в насосную станцию. В зависимости от параметров НА определяет текущее состояние конкретных узлов НА.

В настоящее время диагностическое и контрольное оборудование, установленное на НА, позволяет проводить непрерывную диагностику расхода воды и давления в насосах, температуры смазочного масла, тока и выходной мощности электродвигателя. Системы диагностики вибрации, которая может приводить к аварийным ситуациям, развиты и применяются недостаточно.

Система диагностики обеспечивает постоянную оценку состояния НА, снижая затраты на техническое обслуживание, их безопасную и надёжную эксплуатацию и ремонт. Эта система автоматически обнаруживает изменения в насосном агрегате — предоставляет базу данных о неисправностях и ведёт учёт необходимости решения конкретных проблем.

Исследования, проведённые с НА, которые имеют одинаковые рабочие условия, показали, что уровень вибраций в них может быть различным.

Автоматизированная диагностическая система также предоставляет непрерывные данные о состоянии НА и служит для предотвращения возможной аварии. Она также служит для составления банка технических данных, по которому в свою очередь можно определить — состояние деталей насоса находится на требуемом уровне или нет [8, 9].

Разработанные системы должны обеспечивать высокую точность определения регистрируемых параметров и быть в состоянии обрабатывать полученные данные [10, 11]. Количество устанавливаемых датчиков позволяет собрать необходимые сведения для обновления базы данных и предупреждении о возможных аварийных ситуациях в НА. Регистрируемые данные выбирались с учетом используемой системы управления насосным агрегатом — SCADA. Нормы, рекомендованные системой диагностики представлены на рисунке 3.

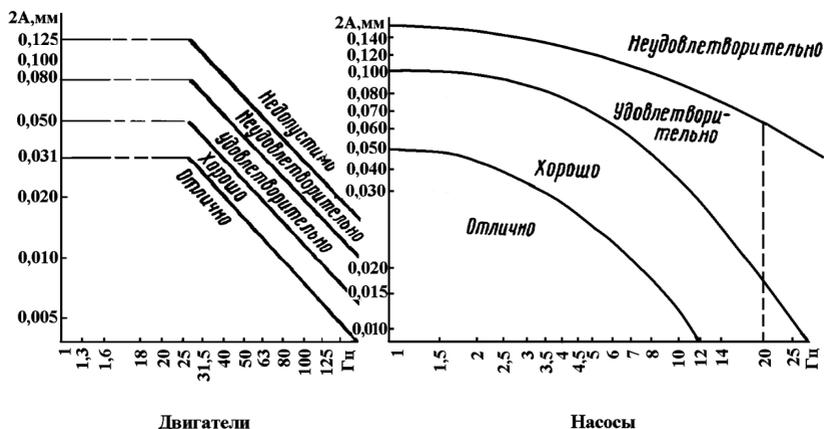


Рис. 3. Нормы для оценки вибрационного состояния НА

Функция надёжности НА определяется как результат учета ряда факторов: внешней среды, технологических свойств систем, эксплуатационных требований и т. д.

Сравнивают полученные показатели надёжности объектов с требуемыми по техническим условиям показателями надёжности [1, 2].

$$P_{\text{расч}} \geq P_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{расч}}$ – расчётное значение нижней границы оценки вероятности безотказной работы, $P_{\text{тр}}$ – требуемое значение вероятности безотказной работы.

Когда условие (1) не выполняется, требование по надёжности считается невыполненным, требуется произвести для НА доработку, которая обеспечит выполнение соотношения.

При оценке параметрической надёжности условие надёжности записывается:

$$\Pi \geq B, \quad (2)$$

где Π – потенциальная способность конструкции противостоять внешним воздействиям во всем времени эксплуатации НА, B – внешнее воздействие.

Неравенство (2) может выражать условие надёжности НА по предельному состоянию (устойчивость, несущая способность, деформативность и т. д.).

Функция V может выражать как внешние воздействия, так и возникающие от них деформации. В общем случае все расчёты НА, обеспечивающие его надёжную работу, могут быть сведены к равенству:

$$v = Y_1 - Y_2 \geq 0, \quad (3)$$

где Y_1 – сумма внутренних факторов, характеризующая несущую способность (или предел допустимой деформации и т. д.), Y_2 – сумма внешних факторов, характеризующая действующие нагрузки при их наиболее невыгодном сочетании.

Тогда надёжность НА определится вероятностью значений больше $v \geq 0$:

$$P = P \cdot (v \geq 0). \quad (4)$$

Когда известно соотношение $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и закон распределения случайных величин x_i , то моменты распределения случайных величин устанавливаются по показателю надёжности P .

Одна из наиболее важных характеристик надёжности – коэффициент готовности НА. Поэтому при выполнении производственных заданий на насосный агрегат (НА) значительное место занимают вопросы тщательного анализа перехода системы от одного состояния к другому и динамики изменения коэффициента готовности НА при каждом состоянии.

Допустим, НА в ходе выполнения задания находится в n состояниях и период времени нахождения в каждом состоянии $t_i = t_{K_i} - t_{H_i}$. Здесь t_{H_i} и t_{K_i} – моменты времени начала и конца нахождения в t_m состоянии.

Можно отметить, что оценка состояния НА зависит от продолжительности времени нахождения в каждом состоянии и динамики изменения коэффициента готовности на каждом интервале времени $[t_{H_i}, t_{K_i}]$.

Суммарное время нормальной эксплуатации НА можно определить следующим образом:

$$T = \sum_{i=1}^n t_{M_i} + \sum_{i=1}^n (t_{K_i} - t_{H_i}). \quad (5)$$

Для оценки коэффициента готовности НА на каждом интервале времени можно использовать следующее уравнение:

$$\pi_i(t) + (\lambda_i + \mu_i) \cdot \pi_i(t) = \mu_i \quad (6)$$

Здесь $\pi_i(t)$ – коэффициент готовности НА на интервале $[t_{H_i}, t_{K_i}]$; λ_i и μ_i – интенсивности отказа и восстановления в данном интервале.

Общее решение уравнения (6) имеет вид [12]

$$\pi_i(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} + C e^{-(\lambda_i + \mu_i)t_{H_i}} \quad (7)$$

Здесь $t_i \in [t_{H_i}, t_{K_i}]$.

Для нахождения константы C для каждого состояния можно использовать следующие начальные условия:

$$t_i = t_{H_i}, \pi_i(t) = \pi_i(t_{H_i}), \quad (ш = 1, 2, \dots, n). \quad (8)$$

С использованием начальных условий из общего решения (6) получим

$$\pi_i(t_{H_i}) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} + C e^{-(\lambda_i + \mu_i)t_{H_i}}. \quad (8)$$

Откуда

$$C = \frac{\pi_i(t_{H_i})(\lambda_i + \mu_i) - \mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \cdot e^{(\lambda_i + \mu_i)t_{H_i}}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), получим частные решения дифференциальных уравнений, в следующем виде:

$$\pi_i(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} + \frac{\pi_i(t_{H_i})(\lambda_i + \mu_i) - \mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \cdot e^{(\lambda_i + \mu_i)(t_{H_i} - t)}. \quad (10)$$

В выражении (10), что $t_{H_i} - t_i \leq 0$, поэтому при $t_i \rightarrow t_{K_i}$, значение $\pi_i(t)$ уменьшается.

При исследовании коэффициента готовности НА встречаются следующие два случая:

1) коэффициент готовности НА $\pi_i(t_i)$ равен коэффициенту готовности в конце предыдущего интервала времени, т. е.

$$\pi_i(t_i) = \pi_{i-1}(t_{K_{i-1}});$$

2) коэффициент готовности НА $\pi_i(t_i)$ не равен коэффициенту готовности в конце предыдущего интервала времени, т. е.

$$\pi_i(t_i) = \pi_{i-1}(t_{K_{i-1}}) + \alpha_i,$$

где α_i – скачки коэффициентов готовности при переходе от одного состояния к другому. В этом случае, если с учётом предложенной нами методики будет возможность уменьшить абсолютное значение α_i до нуля, то исследование можно продолжить как в первом случае, иначе требуются дополнительные исследования по изучению α_i .

Рассмотрим алгоритмы реализации первого случая. В данном случае вместо n начальных условий (5) достаточно использовать только одно начальное условие, поставленное для первого интервала времени:

$$t_i = t_{H_i}, \quad \pi_i(t_i) = \pi_i(t_{H_i}).$$

Для остальных интервалов времени $\pi_i(t_{K_i})$ можно определить из начальных условий

$$t_i = t_{H_i}, \quad \pi_i(t_i) = \pi_{i-1}(t_{H_{i-1}}), \quad (i = 2, \dots, n),$$

учитывая, что $\pi_{y_i+1}(t_{H_{i-1}}) = \pi_i(t_{K_i})$.

Коэффициенты оперативной готовности $\pi_i(t_{K_i})$ для каждого интервала времени можно получить расчетным путем последовательно, по возрастанию номеров интервалов времени. Данный алгоритм намного облегчает процесс уточнения коэффициента готовности НА за весь период эксплуатации.

Аналогично данной методике можно проводить многоэтапное обследование состояния НА по другим характеристикам надёжности [14].

Агрегат представляет собой совокупность отдельных узлов, от состояния которых зависит работоспособность всего объекта. Суперпозиция виброакустических полей, генерируемых ими, создаёт сложную волновую картину, характеризующуюся спектральным распределением. Разделение сигналов определенных частот позволяет вычислить диагностические параметры и исключить влияние посторонних шумов на их значения.

Построение модели технического состояния НА заключается в создании перечня распознаваемых состояний с описанием их диагностических векторов и определением информативных параметров, имеющих границы нормального и аномальных состояний.

Для диагностирования НА необходимо иметь два типа информации, позволяющей, с одной стороны, определить границы нормального и аномальных состояний, а с другой – определить реальные значения параметров, характеризующих состояния НА в период его обследования.

К первому типу относится индивидуальный набор технических характеристик. В него входят:

- параметры диагностирования насоса и двигателя;
- частота вращения вала НА;
- типы подшипников и их идентификационные номера;
- число рабочих колёс насоса и количество лопаток на каждом из них;

Другим типом входной информации являются спектры виброакустических сигналов. Изменения их амплитуд на характерных частотах свидетельствуют об отклонениях в работе агрегата. Поскольку значения параметров индивидуальны для каждого НА, то должен быть выбран метод относительных измерений для тех из них, которые не могут быть оценены в абсолютных значениях.

Основным диагностическим параметром, регламентируемым ГОСТами, является величина виброскорости. Анализ спектров показал, что наибольший вклад в интегральную величину вносят гармоники и субгармоники частоты вращения вала [5, 10].

Опыт экспериментальных исследований показал, что в водо-подводящих сооружениях НС устанавливаются свободные поверхности потока, резко изменяющие глубины и скорости по течению на довольно коротком отрезке пути и в итоге увеличивающие силы сопротивления движению. Поэтому, кроме сопротивлений, обусловленных разностью давлений и трением, в соответствии с принципами гидромеханики рекомендуется учитывать силы вихреобразования или обтекания и силы инерции в проточной части насосов [15, 16].

Если характеристики независимы, то вероятность P_1 для j -ой аномалии режима рассчитывается следующим образом

$$P_{1j} = P(D_0) \prod_{i=1}^N \int_{H_{ji}}^{B_{ji}} f\left(\frac{\tilde{\chi}_i}{D_0}\right) d\tilde{\chi}_i \quad (11)$$

Вероятность пропуска j -ой аномалии, соответственно, будет равна

$$P_{2j} = P(D_j) \prod_{i=1}^N \int_{H_{0i}}^{B_{0i}} f\left(\frac{\tilde{\chi}_i}{D_0}\right) d\tilde{\chi}_i \quad (12)$$

где D_0 – плотность вероятности нормального состояния; D_j – плотность вероятности аномального состояния.

Вероятность ложной тревоги для M аномалий равна

$$P_1 = P(D_0) \sum_{j=1}^M \prod_{i=1}^N \int_{H_{ji}}^{B_{ji}} f\left(\frac{\tilde{\chi}_i}{D_0}\right) d\tilde{\chi}_i \quad (13)$$

Вероятность пропуска любой из M аномалий

$$P_2 = \sum_{j=1}^M P(D_j) \prod_{i=1}^N \int_{H_{0i}}^{B_{0i}} f\left(\frac{\tilde{\chi}_i}{D_0}\right) d\tilde{\chi}_i \quad (14)$$

здесь $P(D_j)$ – априорная вероятность j -го состояния.

В общем случае параметры не независимы, поэтому для применения формул (12)–(14) при оценках вероятностей ошибок необходимы дополнительные ортогонализирующие преобразования. В формуле (14) L – число линий спектра.

Разгонные вибрационные характеристики НА регистрируются в процессе от момента пуска до выхода на установившийся режим. Основной особенностью разгонных характеристик НА является малый промежуток времени от момента включения электродвигателя до полного разгона роторной системы. Как показали исследования, время разгона НА под нагрузку составляет обычно менее 3 с [17, 18]. Примеры разгонных характеристик для НА, представлены на рис. 4.

Дефекты лопастей рабочего колеса, вызванные износом, деформацией, а также разные расстояния между лопастями могут стать причиной дискретных составляющих вибрации на оборотной частоте, первой и второй ее гармониках, лопастной частоте и связанных с ней боковых частотных составляющих.

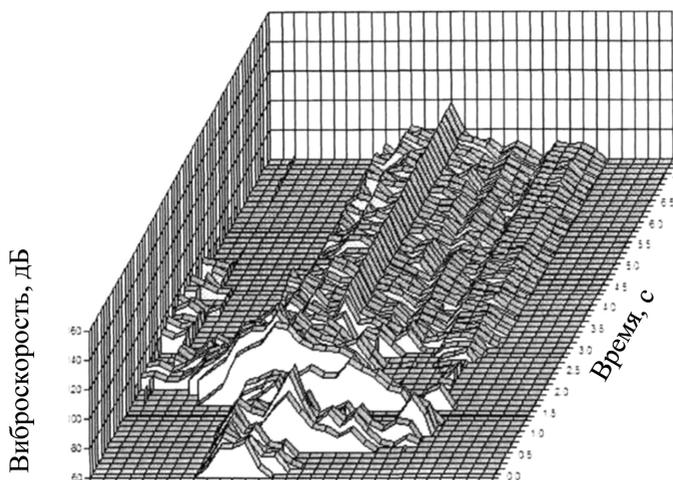


Рис. 4. Мультиспектр логарифмических уровней виброскорости при разгоне насосных агрегатов

На рис. 5 представлена фотография экрана монитора с изображением параметров вибрации НА № 3 НС «Нарпай» [15, 18]. На фотографии выделены диаграммы виброскорости подшипников с характерным резким изменением параметров низкочастотных колебаний вибрации.

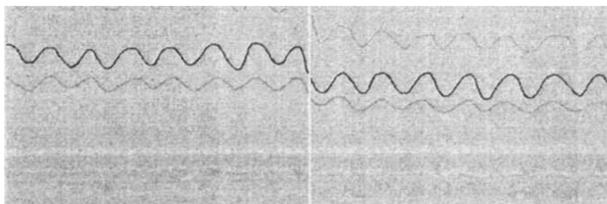


Рис. 5. Диаграммы виброскорости подшипников на штатной системе контроля НА № 3 «Нарпай»

Выполненный анализ позволяет сделать вывод о том, что низкочастотные колебания интенсивности вибрации НА связаны с изменениями параметров агрегатов.

Заключение

1. Для оценки технического состояния НА предложенные диагностические системы позволяют получать и хранить больше количество данных о вибрации НА и анализировать полученные данные для каждого НА.

2. В результате внедрения предложенной диагностической системы использованы методы исследования во времени параметров при эксплуатации НА для предотвращения аварий, возникающих в результате технологического сбоя, на основе полученной информации об изменениях технического состояния НА в зависимости от уровня показателей вибрации.

3. Предложена методика расчёта надёжности НА. С использованием различных коэффициентов готовности НА возможно управление режимами эксплуатации.

Описанная методика позволяет достаточно точно определять неисправность, вызывающую повышенную вибрацию агрегата.

Кроме того, программное обеспечение выполнено таким образом, что методика может быть проверена на тестовых сигналах (или с введением заведомо известных значений параметров). Начальная стадия поиска дефектов может варьироваться изменением пороговых значений вероятных состояний, а также величинами установок для каждого параметра.

Список литературы

1. **Гловацкий О. Я., Эргашев Р. Р.** Исследования надежности и состояния системы машинного водоподъема // Материалы международной научно-техн. конф. – Т., 2009. – С. 77–80.
2. **Абзалов Б. Х., Гловацкий О. Я.** Новые методы оценки технического состояния мелиоративных насосных станций систем машинного водоподъема // Труды САНИИРИ. – Т., 2006. – С. 100–104
3. **Муминов Н. А.** К расчету надежности гибких производственных комплексов // Журнал «Проблемы машиностроения и автоматизации». – М.; Будапешт, 1987. – Вып. 15. – С. 57–60.
4. **Гловацкий О. Я., Эргашев Р. Р., Рустамов Ш. Р.** Новые методы повышения достоверности количественной оценки надежности эксплуатации объектов систем машинного водоподъема // Международная научно-практическая конференция «Мелиорация и проблемы восстановления сельского хозяйства России» (Костяковские чтения). – ВНИИГиМ, Россельхозакадемия. – Москва, 2013. – С. 372–376.
5. **Гловацкий О. Я., Бекчанов Ф. А.** Совершенствование методов диагностирования насосов крупных гидротехнических систем // Журнал Гидротехника, № 2(55), Наука и технология, Санкт-Петербург, 2019. – С. 70–73.
6. **F. Bekchanov, R. Ergashev, T. Mavlanov, O. Glovatskiy** Mathematical model of vibrating air pump unit // XXII International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering / Construction the formation of living environment, April 18–21, 2019.
7. **Bekchanov F. A.** New methods for diagnosing pumps hydrotechnical systems. International journal for innovative research in multidisciplinary fields. – Oct-2018. – Vol 4, Issue 10. – Pp. 367–373 (Research Bib№ 14 IF-5.6, Scientific Journal Impact Factor № 23 IF-6.497)
8. **Гловацкий О. Я., Эргашев Р. Р., Бекчанов Ф. А., Рустамов Ш. Р.** Оценка технического состояния и коэффициента готовности насосных агрегатов // Международная агроинженерия, Научно технический журнал, Алматы. – 2012 год. – С. 64–67.

9. **Эргашев Р. Р., Бекчанов Ф. А., Насырова Н. Р.** Диагностические испытания вертикальных насосов // Материалы международной научно-практической конференции «Пути повышения эффективности орошаемого земледелия». – Новочеркасск, № 3(59), 2015. – С. 3136.

10. **Эргашев Р. Р., Гловацкий О. Я., Бекчанов Ф. А., Насырова Н. Р.** Новые методы диагностирования крупных вертикальных насосных агрегатов. // Республика илмий-техник анжумани материаллари мавзусидаги «Суғориладиган ерларнинг мелиоратив ҳолатини яхшилаш ва сув ресурсларидан самарали фойдаланиш муаммолари». – Тошкент. – 2015, 1–2 май. – С.397–402.

11. **Гловацкий О. Я., Эргашев Р. Р., Бекчанов Ф. А.** Анализ диагностирования насосных агрегатов Джизакской головной насосной станция // «Irrigatsiya va melioratsiya» журнал № 3(9). Тошкент. 2017 йил. С. 32–34 (05.00.00; № 22).

12. Программа для обеспечения надёжности насосных агрегатов // № DGU03969. Свидетельство об официальной регистрации программы для электронно-вычислительных машин. 09.09.2016 г. / Гловацкий О. Я., Эргашев Р. Р., Насырова Н. Р., Бекчанов Ф. А.