

УДК 621.65

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/01>**Гупало Ю.Ю.**

Днепропетровский государственный технический университет

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА**

У статті розглядалася температура підшипників як основоположний параметр оцінки поточного стану насосного обладнання, інформуючи про стан підшипників при повній або частковій завантаженості агрегату. Передбачається можливість скорочення часу на ремонтпридатність за допомогою нового методу вимірювання, обробки і отримання поточної інформації. Новий метод полягає у застосуванні цифрової обробки даних з терморпарі за допомогою модуля аналого-цифрового перетворювача термоЕРС, що сприяє підвищенню швидкості і точності вимірювань. Точка вимірювання температури розташована в місці опори підшипника на поверхні корпусу, оскільки прямий метод вимірювання неможливий. Для експерименту була використана сталь, товщина якої відповідала вимогам технічної документації для застосування в плунжерних насосах. Дослідження проводилося шляхом нагрівання сталі електричним нагрівальним елементом зі стабілізацією і контролем температури. Під час проведення експерименту були отримані температурні характеристики, що визначають три функціональні позиції насоса: включення, вихід на робочий режим і робота за максимально допустимого навантаження. Доведено, що під час часткової або повної завантаженості агрегату шляхом механічного тертя робочих елементів відбувається підвищення температури підшипників, що призводить до тріщин у самому матеріалі підшипника і надалі зносу. Аналізуючи отримані результати, можна зазначити про залежність температури підшипників від продуктивності насоса і кількості оборотів на хвилину.

Визначено природу взаємозв'язку температури підшипників і числа оборотів насоса за шкалою Чеддока, обчислено лінійне рівняння регресії, коефіцієнт еластичності, що виражає безперервність зв'язку між параметрами і так само пропорційність. Порахована помилка апроксимації, що показує, наскільки розрахункові значення відрізняються від фактичних. Перевірено гіпотезу про нульовий коефіцієнт регресії і статичної залежності зв'язку між параметрами.

Виведено графічні залежності температури від поточного часу експлуатації, що сприяють поліпшенню швидкості, якості та інформативності стану обладнання.

**Ключові слова:** плунжерний насос, температура підшипників, кореляційний аналіз, число оборотів насоса, рівняння регресії, шкала Чеддока, точність вимірювань.

**Постановка проблеми.** Потенциал химической индустрии является общепризнанным критерием развития государственной экономики в целом. На сегодняшний день актуальной остается внедрение программы «Химическая индустрия 4.0.», которая подразумевает некий симбиоз новых инновационных технологий и информационно-коммуникационных систем в химическую индустрию с целью выведения продукции на качественно новый уровень. Но, к сожалению, из-за устаревшего оборудования, частых ремонтных работ, высокой энергозависимости это не представляется возможным.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросом повышения надежности насосного оборудования ученые занимаются на протяжении

многих лет. Каждый рассматривал различные перспективы усовершенствования оборудования методом резервирования, повышения уровня герметичности с помощью реконструкции клапана. Значительными недостатками данных способов была недостаточная информативность о состоянии насоса, узко направленная специфика, погрешность измерений, затратность методов. Также были созданы различные методики по измерению состояния оборудования. По такому принципу используются манометры, уровнемеры, газоанализаторы, пьезодатчик и так далее. В последнее время часто применяются уровнемеры. Относительно уровнемеров, то это приборы для измерения предельного значения (уровня) или контроля емкости в сыпучих, жидких, агрессивных средах [4, с. 210].

В агрессивных средах используют бесконтактный метод, где велика вероятность засорения или коррозии устройства [1, с. 99]. Ультразвуковые уровнемеры основаны на поглощении колебаний при возвращении от отраженного сигнала среды [2, с. 35]. Преимущества: многофункциональность устройства, отсутствие контакта со средой, измерение давления на результат не влияет. Существенными же недостатками являются: погрешность сигнала зависит от внешних источников (пыль, пар, газовая смесь), ограниченный диапазон для высоких давлений и температур [3, с. 193]. Микроволновые уровнемеры построены на принципе измерения отраженных радиоволн от поверхности системы «газ – контролируемая среда» [5, с. 113]. Высокая точность измерений, применимость в различных жидкостях, отсутствие погрешности давления и температуры являются преимуществами радарных уровнемеров, к недостаткам относятся: дороговизна, ограничения по диэлектрической проницаемости. Также существенный вклад вносят газоанализаторы – устройства для контроля количества вредных примесей в воздухе [7, с. 154]. Часто применяются на предприятиях термохимические газоанализаторы для сигнализации пропусков паров химического вещества из оборудования. Они работают на принципе восприятия химически чувствительной пленки примесей окружающей среды [6, с. 58–60]. Преимущества устройства: низкая инерционность [8, с. 157], низкая стоимость, а недостатки: пониженная износостойкость сенсора, задержка данных, низкая чувствительность. Тензодатчики, необходимые для измерения уровня вибрации агрегатов, предотвращают износ подшипников. Измерение деформаций – статических и динамических, крепления датчиков к изделию,

простота методики измерений являются неотъемлемыми преимуществами, но недостатками остаются большая погрешность из-за воздействия на датчики температуры. Повышенные нагрузки на оборудование, значительные потери человеко-часов на текущие ремонты приводят к понижению износостойкости оборудования. Поэтому проблема повышения надежности эксплуатационных условий работы насосного оборудования остается актуальной на сегодняшний день.

**Постановка задания.** Целью данной работы являлось повышение надежности эксплуатационных условий работы плунжерного насоса путем определения его текущего состояния.

**Изложение основного материала исследования.** Температура подшипников является одним из критериев, способствующих показать информативность состояния насоса при полной или частичной загруженности агрегата. Из-за интенсивности работы, отсутствия прерывания технологического процесса путем внедрения в структурный элемент цепочки нет возможности непосредственного измерения температуры подшипников. Решением данной проблемы является измерение бесконтактным методом температуры корпуса в месте опоры подшипника. Для повышения точности измерений используется цифровой метод обработки данных с термодатчиков с помощью модуля аналого-цифрового преобразователя термоЭДС.

Для эксперимента была использована сталь, толщина которой соответствовала требованиям технической документации по применению плунжерных насосов. Исследования проводилось путем нагрева стали электрическим нагревательным элементом со стабилизацией и контролем температуры.

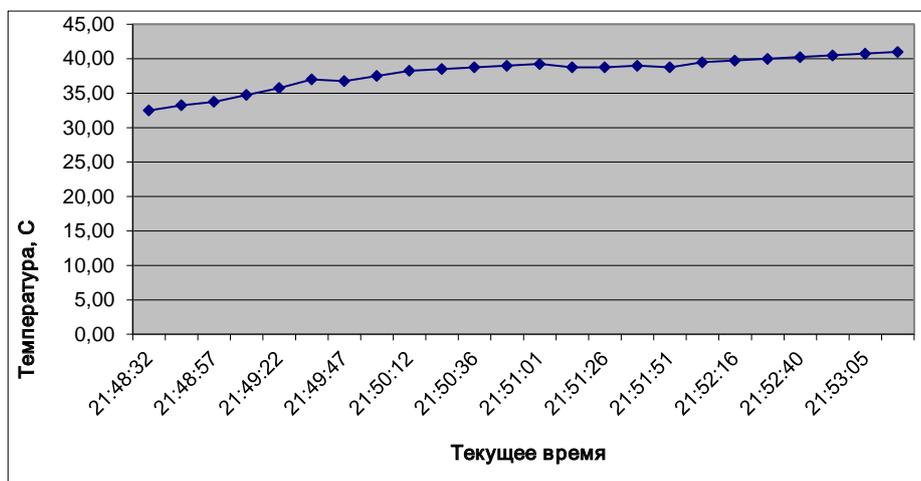


Рис. 1. Выход на рабочий режим насосного оборудования

Получены температурные характеристики в режиме реального времени, показывающие три функциональные позиции насоса: включение, выход на рабочий режим и работу при максимально допустимой нагрузке. Был экспериментально подтвержден факт зависимости температуры подшипников от производительности насоса в результате повышения нагрузки основной продукции. На основе ряда экспериментов получены следующие графики (рис. 1, 2, 3).

Анализируя полученные результаты, наблюдается зависимость температуры подшипников от производительности насоса и количества оборотов в минуту.

Для уточнения тесноты взаимосвязи между температурой подшипников Q и частотой оборотов n необходимо рассчитать парный показатель корреляции:

$$r = \frac{2542.374 - 65.618 \cdot 38.69}{2.4603 \cdot 1.5696} = 0.9215$$

По шкале Чеддока [9, с. 10] связь между признаками  $0.9 < r_{xy} < 1$  весьма высокая и прямо пропорциональная, при этом ковариация будет равна:

$$cov(x, y) = 2542.374 - 65.618 \cdot 38.69 = 3.5587$$

Линейное уравнение регрессии имеет вид:  $y = 0.588x + 0.114$ . Определим коэффициент эластичности, отображающий процентное соотношение изменения результата Y при изменении X на 1% от среднего своего значения:

$$E = 0.588 \cdot \frac{65.618}{38.69} = 0.9972$$

Коэффициент эластичности почти равен 1. Из этого следует, что при изменении X на 1%, Y

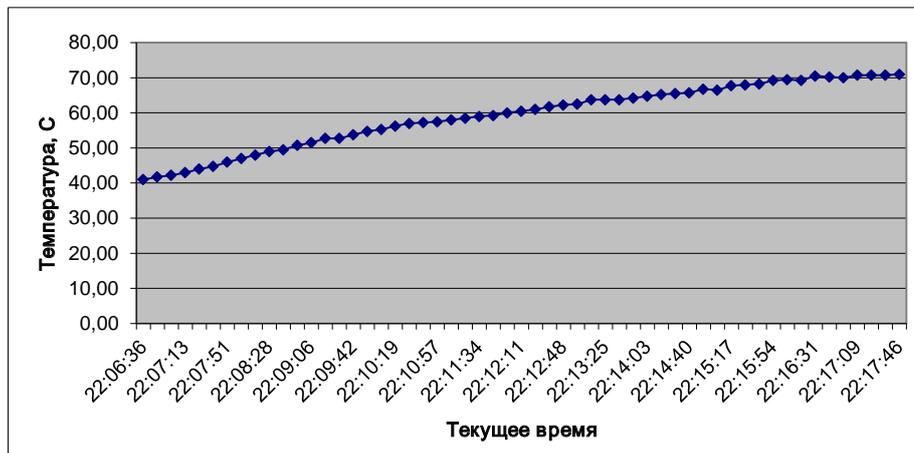


Рис. 2. Состояние подшипников при максимальной нагрузочной способности насоса

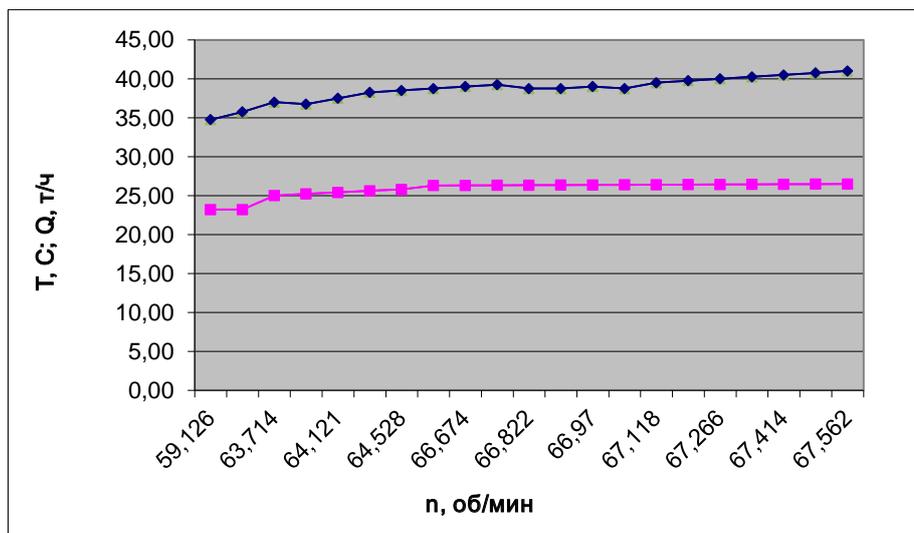


Рис. 3. График зависимости температуры подшипников и производительности насоса от количества оборотов

изменится на 1%. То есть связь неразрывная и равнопропорциональная.

Найдем коэффициент детерминации, показывающий варьирование результирующего признака:

$$R^2 = 0.9972^2 = 0.8491$$

Исходя из расчета, в 84,9% случаев изменение X приводит к изменению Y. Точность подбора уравнения регрессии высокая.

Средняя ошибка аппроксимации будет равна:

$$\bar{A} = 0.01367 * 100\% = 1.367\%$$

Ошибка аппроксимации показывает, насколько расчетные значения отличаются от фактических. Поскольку ошибка составляет меньше 7%, уравнение регрессии считается справедливым.

Для определения статической значимости коэффициента корреляции найдем величину случайной ошибки:

$$t_{набл} = 0.9215 * \frac{\sqrt{21-2}}{\sqrt{1-0.8491}} = 10.34$$

По таблице Стьюдента с уровнем значимости  $\alpha=0.025$  и степенями свободы  $k=19$  находим  $t_{крит}$ :

$$t_{крит} = (19; 0.025) = 2.093$$

Так как  $|t_{набл}| > t_{крит}$ , то гипотеза о нулевом коэффициенте регрессии отклоняется. Коэффициент статически значим, связь между переменными линейна.

Доверительный интервал находится в диапазоне:

$$\left( 0.9215 - 2.093 * \sqrt{\frac{1-0.8491}{21-2}}; 0.9215 + 2.093 * \sqrt{\frac{1-0.8491}{21-2}} \right) = (0.735; 1)$$

Коэффициент парной корреляции входит в доверительный интервал и рассчитан верно.

Для определения точности оценки коэффициентов уравнения регрессии необходимо найти необъясненную дисперсию и стандартную ошибку отклонения:

$$S^2 = \frac{7.8034}{19} = 0.4107$$

$$S = \sqrt{0.4107} = 0.6408$$

Тогда стандартное отклонение случайной величины а:

$$S_a = 0.6408 * \frac{\sqrt{90548.99}}{21 * 2.4603} = 3.7323$$

Стандартное отклонение случайной величины b будет равно:

$$S_b = \frac{0.6408}{\sqrt{21} * 2.4603} = 0.057$$

$$t_a = \frac{0.114}{3.7323} = 0.177$$

$$t_b = \frac{0.588}{0.0568} = 10.34$$

Равенство  $t_b^2 = t_{набл}^2$  подтверждает парность линейной регрессии и сущность линейного уравнения регрессии.

Проверка значимости модели регрессии в целом выполняется на основе дисперсионного анализа с помощью критерия Фишера (F – критерия) [10, с. 17].

$$R^2 = 1 - \frac{51.73}{7.8034} = 0.8491$$

Определение фактического значения F-критерия:

$$F_{факт} = \frac{0.8491}{1-0.8491} * \frac{(21-1-1)}{1} = 106.99$$

F табл – это максимально возможное значение критерия под влиянием случайных факторов при данных степенях свободы и уровне значимости  $\alpha$  [10, с. 18].

Табличное значение критерия со степенями свободы  $k_1=1, k_2=19, \alpha=0.01$ :

$$F_{табл} = 4.38$$

Исходя из того, что фактическое значение  $F > F_{табл}$ , то найденная оценка уравнения регрессии статистически надежна.

Для проверки взаимосвязи между  $t_b = \sqrt{F}$ ;  $10.34 = 10.34$ , а значит связь доказана, равенство коэффициентов.

Для проведения анализа качества модели регрессии применяют теорему о разложении дисперсии. Суть ее заключается в том, что общая дисперсия результирующего признака раскладывается на две части – необъясненную и объясненную дисперсии уравнением регрессии.

Определяем дисперсию зависимой переменной:

Таблица 1

Характеристика модели уравнения регрессии

Критерий	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия на 1 степень свободы	F-критерий
Модель (объясненная)	0	1	0	106.99
Остаточная	43.9	19	7.8	1
Общая	51.8	21-1		

$$\sum (y_i - y_{cp})^2 = \sum (y(x) - y_{cp})^2 + \sum (y - y(x))^2,$$

где  $\sum (y_i - y_{cp})^2$  – общая сумма квадратов отклонений;  
 $\sum (y(x) - y_{cp})^2$  – факторная сумма квадратов отклонений;  
 $\sum (y - y(x))^2$  – остаток суммы квадратов отклонений.

$$51.7 = 7.8 + 43.9$$

Необходимым также считается введение результирующего показателя на основе теории нечеткой логики. Результирующая функция принадлежности будет равна [11, с. 71]:

$$\mu_1^n = \min\{\mu_1(e_{i1}, e_{i2})\} = \min\{\mu_1(e_{i1}, e_{i2}), \mu_{ps}(y)\}$$

**Выводы.** Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

- изменение температуры подшипников зависит от производительности насоса;
- между температурой подшипников и числом оборотов насоса существует тесная и прямо пропорциональная взаимосвязь по шкале Чеддока;
- коэффициент детерминации  $R^2 = 0.8491$ , корреляции  $r = 0.9215$ , эластичности, показывающий процентное изменение результирующего параметра от факторного  $E = 0.9972$ , средняя ошибка аппроксимации  $\bar{A} = 1.367\%$ ;
- выведены графические зависимости изменения температуры подшипников с течением времени;
- введен результирующий показатель системы диагностирования.

**Список литературы:**

1. Винокуров Б.Б. Современная уровнеметрия жидких сред. Томск : Томский политехнический университет, 2014. С. 118.
2. Вильнина А.В. Вильнин А.Д., Ефремов Е.В., Современные методы и средства измерения уровня в химической промышленности. Томск : Томский политехнический университет, 2011. С. 207.
3. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. 3-е изд. перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1983. 424 с.
4. Промышленные приборы и средства автоматизации: справочник В.Я. Баранов Ленинград : Машиностроение, 1987. 840 с.
5. Винокуров Б.Б. Метрология и измерительная техника. Уровнеметрия жидких сред : учеб. пособие для академического бакалавриата. Москва : Издательство Юрайт, 2016. 187 с.
6. Павленко В.А. Газоанализаторы. Москва ; Ленинград : Машиностроение, 1965. 58–60 с.
7. Емельянов А.И. Практические расчеты в автоматике Москва : Машиностроение, 1967. 154 с.
8. Баратов А.Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность. Москва, 2003.
9. Ишханян М.В., Карпенко Н.В. Эконометрика. Часть 1. Парная регрессия : учебное пособие. Москва : МГУПС (МИИТ), 2016. 117 с.
10. Козина А.Т. Практикум по эконометрике : учебное пособие. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2011. 96 с.
11. Чернов В.Г. Основы теории нечетких множеств : учеб. пособие Владим. гос. ун-та. Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 96 с.

**Hupalo Yu.Yu. IMPROVING RELIABILITY OF PLUNGER PUMP**

*The article considered the bearing temperature as a fundamental parameter for assessing the current state of pumping equipment, informed about the condition of the bearings at full or partial load of the unit. It is possible to reduce the time for repair due to a new method of measuring, processing and obtaining current information. The new method involves the use of digital processing of data from a thermocouple using the module of the analog - digital thermoelectric converter, helping to increase the speed and accuracy of*

*measurements. The temperature measuring point is located in the bearing support on the housing surface, since a direct measurement method is not possible. For the experiment, steel was used, the thickness of which corresponded to the requirements of technical documentation for the use of plunger pumps. The research was carried out by heating steel with an electric heating element with stabilization and temperature control. During the experiment, temperature characteristics were obtained that determined the three functional positions of the pump: switching on, reaching the operating mode and working at the maximum allowable load. It is proved that during partial or full load of the unit by mechanical friction of the leading elements, the temperature of the bearings increases, which leads to cracks in the bearing material itself and further wear. Analyzing the results obtained, the dependence of the bearing temperature on the pump performance and the number of revolutions per minute is observed.*

*The nature of the relationship between the temperature of the bearings and the number of revolutions of the pump on the Cheddock scale is determined, the linear regression equation is calculated, the elasticity coefficient expressing the continuity of the relationship between the parameters and equal proportionality. The approximation error calculated shows how much the calculated values differ from the actual ones. The hypothesis of a zero regression coefficient and a static relationship between the parameters has been tested.*

*Graphical dependencies of temperature on the current operating time are derived, which contribute to improving the speed, quality and information content of the equipment condition.*

**Key words:** *plunger pump, bearing temperature, correlation analysis, pump speed, regression equations, Cheddock scale, measurement accuracy.*