

При недостаточности такого уточнения коэффициента K аппроксимирование зависимостей $K = f(Q_{np})$ для каждого значения \bar{n}_{np} может проводиться полиномами различной степени, соответствующей индивидуальному виду зависимостей.

Определение K по (9) и (11) и последующие расчеты ε_n по (5) с использованием полученных значений K показывают, что за счет коррекции исходного выражения (1) погрешность перевода зависимостей $\varepsilon_n = f(Q_{np}; \bar{n}_{np})$ из их графического вида в аналитический может быть снижена: при упрощенном определении K — до 0,9 % для неполнонапорных нагнетателей и до 1,5 % для полнонапорных машин; при уточненном, на основе (11) — до нескольких десятых процента.

Аналитические характеристики $\varepsilon_n = f(Q_{np}; \bar{n}_{np})$ адаптируются к техническому состоянию нагнетателей, что необходимо в первую очередь при использовании характеристик в АСУ ТП, посредством присутствующего в них политропического КПД нагнетателей $\eta_{пол}$. Достаточно в (1) или (5) использовать фактические значения $\eta_{пол}$, полученные по результатам параметрической диагностики машин в соответствии с работами [2, 3].

Трудоемкость уточнения характеристик $\varepsilon_n = f(Q_{np}; \bar{n}_{np})$ в их аналитическом виде компенсируется удобством и эффективностью использования характеристик в последующем. При этом такое уточнение для каждого типоразмера нагнетателей требуется только один раз, так как получаемые характеристики, как и исходные приведенные характеристики нагнетателей, универсальны.

Библиографический список

1. Перовощиков С. И. Адаптация приведенных характеристик нагнетателей природного газа к техническому состоянию машин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. – № 1. – С. 100–105.
2. Перовощиков С. И. Параметрическая диагностика технического состояния центробежных нагнетателей природного газа // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – № 3. – С. 97–104.
3. Перовощиков С. И. Коррекция приведенных характеристик центробежных нагнетателей по результатам параметрической диагностики машин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 6. – С. 78–83.

Сведения об авторе

Перовощиков Сергей Иванович, д. т. н., консультант кафедры прикладной механики, Тюменский промышленный университет, г. Тюмень, тел: 8(3452)467480, e-mail: perevoschikovsi@tyuiu.ru

Information about the author

Perevoschikov S. I., Doctor of Engineering, Consultant at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)467480, e-mail: perevoschikovsi@tyuiu.ru

УДК 621.317.353.018.3:621.67

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА И ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ SIMULATION OF FAULT CONDITION OF CENTRIFUGAL PUMPING UNIT AND EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC DIAGNOSTIC SIGNS

П. С. Шичёв

P. S. Shichev

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта

Ключевые слова: функциональная диагностика; техническое состояние; механическая неисправность; электромагнитный метод; информативные гармоники; спектр тока
Key words: functional diagnostics; technical condition; mechanical failure; electromagnetic method; informative harmonics; current spectrum

Современная стратегия повышения эффективности и обеспечения надежности функционирования наиболее ответственного оборудования предприятий топливно-энергетического комплекса, в том числе насосных агрегатов, предусматривает

создание систем оценки технического состояния установок в процессе их эксплуатации. Необходимость проведения и алгоритмы реализации процедур функциональной диагностики регламентируются нормативно-технической документацией, в том числе и технологическими регламентами предприятий [1–4]. Требования стандартов [1, 2] к технико-экономической эффективности, функциональности, обеспечению методов диагностики наряду с технологическим совершенствованием важных производственных процессов предприятий определяют актуальность исследований и разработок в части развития методов и средств функциональной диагностики.

Конструкция значительной части насосного оборудования предприятий в качестве привода предусматривает использование электродвигателей ввиду надежности и экономичности эксплуатации. При этом особенностью работы электродвигателей является то, что с возникновением и развитием механических неисправностей насосного агрегата, среди которых наиболее частые дефекты подшипников и повышенная вибрация из-за расцентровки и дисбаланса [5], сопровождающихся колебанием крутящего момента на валу ротора, происходит модуляция частотных составляющих спектра тока статора [6, 7]. Информативная гармоника спектра определяется частотой колебаний крутящего момента, зависящей от характера неисправности, а амплитуда гармоник связана со степенью развития дефекта. При этом использование амплитуд информативных гармоник спектра тока, а также производных величин, таких как коэффициент гармоник и коэффициент гармонических искажений спектра, в качестве диагностических параметров при оценке технического состояния насосов и электродвигателей рассматривается в ряде работ и отмечается перспективным, однако малоизученность количественных зависимостей рассматриваемых диагностических параметров от характера и значения неисправности определяет целесообразность исследований в данном направлении [5, 8].

В рамках работы выполняется моделирование неисправного состояния центробежного насосного агрегата посредством построения имитационной модели агрегата и задания гармонических колебаний крутящего момента сопротивления на валу различных амплитуды $A_{m(dm)}$ и частоты f_{dm} с последующим определением относительных значений амплитуд информативных гармоник спектра сигнала тока статора $A'_{i(f)}$. Функциональные зависимости $A'_{i(f)} = f[A_{m(dm)}]$ определяются для машин различной мощности. Значения задаваемых частот колебаний определяются частотами гармонических составляющих спектра тока, являющихся диагностическими параметрами для наиболее часто встречающихся дефектов насосных агрегатов типа неисправности подшипников ($f_c \pm f_{ep} / 2$, где f_c — частота тока сети, f_{ep} — частота вращения ротора) и расцентровки валов ($f_c + k \cdot f_{ep}$, где k — целое число). Частоты параметров изучены ранее и представлены в работе [9].

На первом этапе построена имитационная модель насосного агрегата (рис. 1) в программном комплексе MatlabR2015a (8.5.0.197613) Simulink [8].

В основу модели легли система дифференциальных уравнений (1), составленных для потокосцеплений обмотки статора асинхронной электрической машины [10] и уравнения в относительных единицах (2)–(6), описывающие работу центробежного насоса, базирующиеся на принципе электрогидравлических аналогий [11]. Величины активных сопротивлений, индуктивностей статора и ротора и взаимной индуктивности определены согласно методике расчета параметров схемы замещения асинхронной машины [12]. Величины расчетного угла нагрузки и относительного напора холостого хода рассчитываются согласно методике [11]. В качестве исходных параметров для моделирования приняты паспортные данные консольных насосных агрегатов К20/30, К80-65-160, К80-50-200, К100-65-200 с

асинхронным электроприводом мощностей 4; 7,5; 15; 30 кВт соответственно и синхронной частотой вращения 3 000 об/мин.

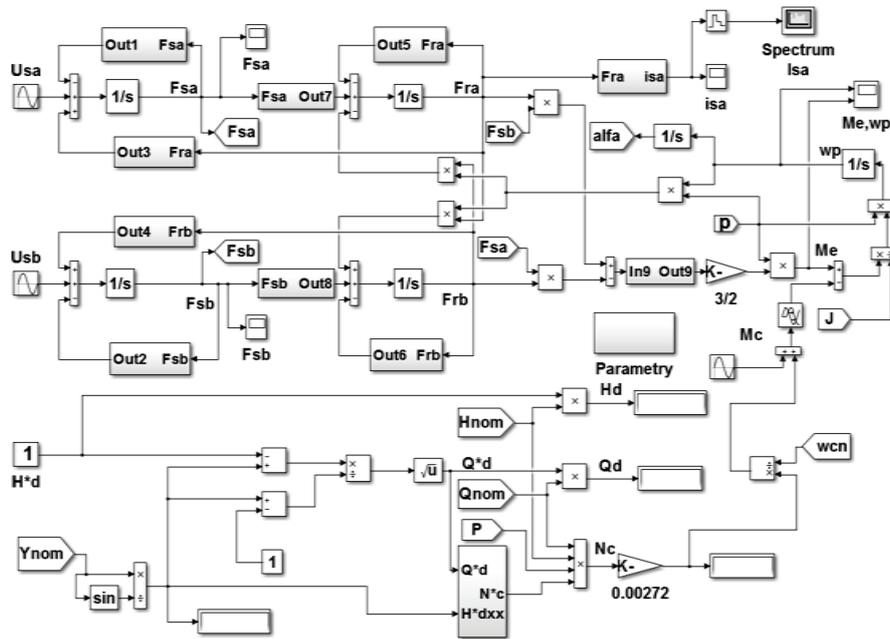


Рис. 1. Полная имитационная модель насосного агрегата

Для создания возмущающих воздействий в форме колебаний крутящего момента сопротивления определенных амплитуд и частот используется блок SineWave, подключаемый через сумматор на соответствующий «механический» ввод модели асинхронного двигателя со стороны насоса (см. рис. 1).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \psi_{s\alpha} = [u_{s\alpha} - \psi_{s\alpha} \cdot (\frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2(\alpha)}) + \psi_{r\alpha} \cdot (\frac{R_s \cdot L_m(\alpha)}{L_s \cdot L_r - L_m^2(\alpha)})] \cdot \frac{1}{s}, \\
 \psi_{s\beta} = [u_{s\beta} - \psi_{s\beta} \cdot (\frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2(\alpha)}) + \psi_{r\beta} \cdot (\frac{R_s \cdot L_m(\alpha)}{L_s \cdot L_r - L_m^2(\alpha)})] \cdot \frac{1}{s}, \\
 \psi_{r\alpha} = [-\psi_{r\alpha} \cdot (\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2(\alpha)}) + \psi_{r\alpha} \cdot (\frac{R_r \cdot L_m(\alpha)}{L_s \cdot L_r - L_m^2(\alpha)}) - \\
 \quad - p \cdot \omega_p \cdot \psi_{r\beta}] \cdot \frac{1}{s}, \\
 \psi_{r\beta} = [-\psi_{r\beta} \cdot (\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2(\alpha)}) + \psi_{r\beta} \cdot (\frac{R_r \cdot L_m(\alpha)}{L_s \cdot L_r - L_m^2(\alpha)}) + \\
 \quad + p \cdot \omega_p \cdot \psi_{r\alpha}] \cdot \frac{1}{s}, \\
 M_g = 1,5 \cdot p \cdot (\frac{L_m(\alpha)}{L_s \cdot L_r - L_m^2(\alpha)}) \cdot (\psi_{s\beta} \cdot \psi_{r\alpha} - \psi_{s\alpha} \cdot \psi_{r\beta}), \\
 \omega_p = p \cdot \frac{M_g - M_c}{J} \cdot \frac{1}{s},
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ — потокосцепления статора и ротора по осям α, β ; $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ — напряжения статора по осям; R_s, R_r — активные сопротивления статора и ротора; L_s, L_r — собственные индуктивности статора и ротора;

$L_{m(\alpha)}$ — взаимная индуктивность между статором и ротором; p — число пар полюсов; ω_p — угловая скорость ротора; $s = \frac{d}{dt}$ — оператор Лапласа; J — момент инерции ротора двигателя; M_s, M_c — электромагнитный момент и момент сопротивления.

Модель центробежного насоса основана на следующих выражениях:

$$Q_D^* = \sqrt{\left[\frac{\gamma_p^{\text{НОМ}}}{\sin \gamma_p^{\text{НОМ}}} - H_D^* \right] \left(\frac{\gamma_p^{\text{НОМ}}}{\sin \gamma_p^{\text{НОМ}}} - 1 \right)}, \quad (2)$$

$$N_C^* = \frac{1}{\eta_{\text{НОМ}}} \cdot [1 + (3 - 2 \cdot H_{\text{ДХХ}}^*) \cdot (Q_D^* - 1)], \quad (3)$$

$$N_{\text{гид}} = \frac{Q_{\text{НОМ}} \cdot H_{\text{НОМ}} \cdot \rho}{102}, \quad (4)$$

$$Q_D = Q_D^* \cdot Q_{\text{НОМ}} \cdot H_D = H_D^* \cdot H_{\text{НОМ}} \cdot N_C = N_C^* \cdot N_{\text{гид}}, \quad (5)$$

$$M_c = \frac{N_C}{\omega_p}, \quad (6)$$

где Q_D^*, H_D^*, N_C^* — относительные подача, напор и мощность насоса; $Q_{\text{НОМ}}, H_{\text{НОМ}}$ — номинальные подача и напор насоса; $\gamma_p^{\text{НОМ}}$ — расчетный угол нагрузки насоса; ρ — плотность жидкости; Q_D, H_D, N_C — действительные подача, напор и мощность насоса; $\eta_{\text{НОМ}}$ — номинальный полный КПД насоса; $H_{\text{ДХХ}}^*$ — относительный напор насоса в режиме холостого хода; $N_{\text{гид}}$ — гидравлическая мощность насоса; ω_p — угловая скорость ротора; M_c — момент сопротивления на валу насоса.

В процессе моделирования значение относительного напора насоса H_D^* остается неизменным и задается равным единице, что соответствует работе насоса в номинальном режиме.

Спектры тока статора двигателя, отображаемые с помощью блока Spectrum Analyzer при частотах колебаний крутящего момента $f_{dM} = f_{ep}$ (нарушение центровки валов) и $f_{dM} = f_{ep} / 2$ (износ подшипников качения) представлены на рисунке 2. Тип весового окна — Hann.

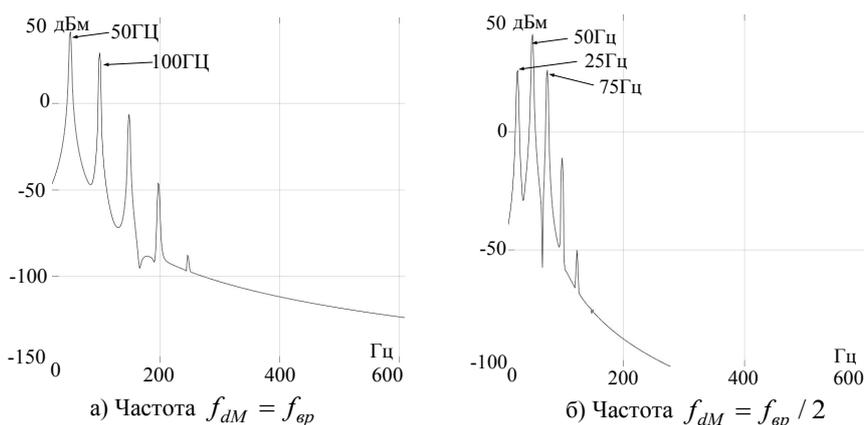


Рис. 2. Спектры тока статора двигателя при наличии колебаний крутящего момента на валу различной частоты

В качестве диагностического параметра при наличии колебаний крутящего момента $f_{dM} = f_{ep}$ принято относительное значение амплитуды гармоники на частоте 100 Гц ($A'_{i(100)}$), а при наличии колебаний $f_{dM} = f_{ep} / 2$ принимается наибольшее из относительных значений амплитуд гармоник на частотах 25 и 75 Гц ($A'_{i(25,75)}$) [9]. Относительное значение

$$A'_{i(f)} = \frac{A_{i(f)}}{A_{i(50)}}$$

где $A_{i(50)}$ — амплитуда гармоники основной частоты 50 Гц.

Функциональные зависимости между относительными амплитудами информативных гармоник тока и амплитудами колебаний крутящего момента сопротивлений для агрегатов разных мощностей представлены на рисунке 3. Отдельные выборки, определенные для конкретных агрегатов, аппроксимируются линейными функциями с достаточно высоким коэффициентом достоверности аппроксимации. При этом отмечается возможное наличие существенных дисперсий между выборками для агрегатов различной мощности.

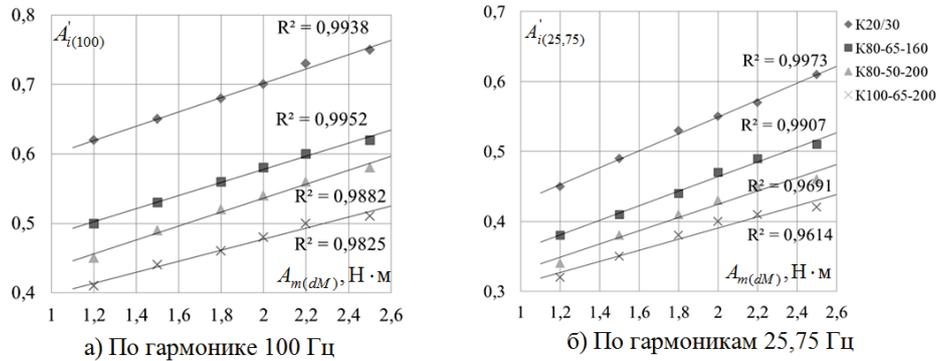


Рис. 3. Зависимости относительных амплитуд гармоник тока от амплитуд колебаний крутящего момента

С целью определения возможности аппроксимации общих выборок для агрегатов в рамках информативных гармоник едиными линейными функциями выполнено построение в программном комплексе MatlabR2015a (8.5.0.197613) средствами CurveFittingTool (рис. 4).

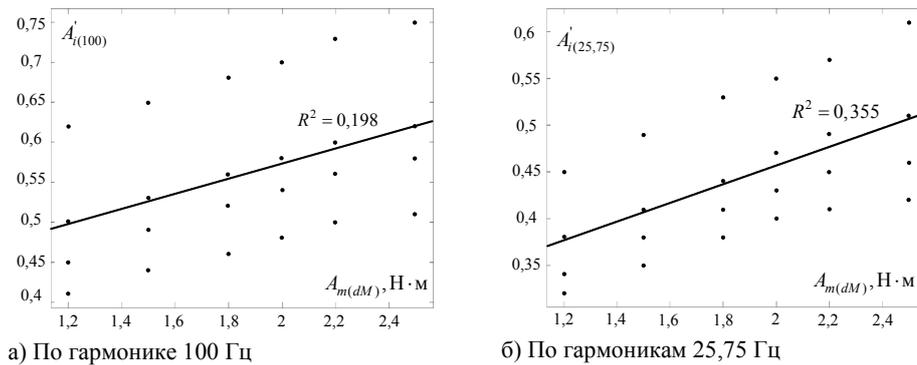


Рис. 4. Попытка аппроксимации общих выборок линейными функциями по гармоникам для разномошных насосных агрегатов

Определено, что аппроксимации выборок, объединенных по насосным агрегатам различной мощности, в рамках отдельных информативных гармоник имеют низкий коэффициент достоверности, что подтверждает наличие существенных дисперсий между частными выборками для разных агрегатов.

В этой связи выполнена проверка значимости коэффициента корреляции для этих выборок по алгоритму, изложенному в работе [13], согласно которому расчетное значение выборочного коэффициента корреляции r должно удовлетворять условию

$$r \geq r_{\ominus}[n] = \frac{A \cdot e^{\frac{2\beta}{\sqrt{n-3}}} - 1}{A \cdot e^{\frac{2\beta}{\sqrt{n-3}}} + 1},$$

где $A = \frac{1+r_{\min}}{1-r_{\min}}$; $r_{\min} = \frac{\sqrt{n+36} - \sqrt{n}}{6}$; n — объем выборки; β — коэффициент доверия (принимается 0,99).

Выборочный коэффициент корреляции определяется следующим образом [14]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i, y_i — элементы двумерной выборки; \bar{x}, \bar{y} — средние статистические значения по выборке.

По результатам вычислений определено, что значения выборочных коэффициентов корреляции по двум выборкам для разных гармоник не удовлетворяют вышеприведенному условию

$$r_{(100)} = 0,45 ; r_{(25,75)} = 0,596 \leq r_{\ominus}[n] = 0,624.$$

Это обуславливает необходимость построения функциональных зависимостей диагностических параметров (относительных значений амплитуд информативных гармоник спектра тока) от параметров порождающих их механических факторов (амплитуд колебаний крутящего момента) отдельно для насосных агрегатов с различными рабочими параметрами (развиваемый напор, подача, расчетный угол нагрузки и др.) и различной мощностью привода.

Выводы

С помощью инструментов имитационного моделирования определены функциональные зависимости относительных значений амплитуд информативных гармоник спектра тока от амплитуд колебаний крутящего момента при наличии механических неисправностей центробежного насосного агрегата на частотах, соответствующих дефектам типа несоосности валов и износа подшипников агрегата.

Методами математической статистики обоснована необходимость определения функциональных зависимостей диагностических параметров от параметров механических факторов неисправностей для насосных агрегатов с различными рабочими параметрами и различной мощностью привода.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и корректировке алгоритмов диагностических контролей центробежных насосных агрегатов с электроприводом электромагнитным методом функциональной диагностики.

Библиографический список

1. ГОСТ 27518-87. Диагностирование изделий. Общие требования. — М.: Стандартинформ. — 2009. — 8 с.
2. ГОСТ Р ИСО 17359-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство. — М.: Стандартинформ. — 2016. — 32 с.

3. РД 153-39ТН-009-96. Положение о системе технического обслуживания и ремонта электроустановок магистральных нефтепроводов. – Уфа: ИПТЭР. – 1997. – 414 с.
4. Технологические регламенты (стандарты организации) АК «Транснефть»: в 7 т. Т. 4. Электрооборудование объектов магистральных нефтепроводов / Под общ. ред. С. М. Вайнштока. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». – 2006. – 467 с.
5. Об исследовании процесса обнаружения дефектов насосно-компрессорного оборудования по гармоническому составу тока статора электродвигателя / З. Х. Ягубов [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 4. – С. 473–496.
6. Баширов М. Г., Прахов И. В., Самородов А. В. Определение технического состояния насосно-компрессорного оборудования по значениям параметров высших гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателем электропривода // Фундаментальные исследования. – 2010. – № 12. – С. 62–65.
7. Вахромеев О. С., Каримов Р. Т., Надеев А. И. Современные методы диагностики электромеханических систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2006. – № 2. – С. 51–56.
8. Шичёв П. С., Ягубов З. Х. Определение диагностических признаков неисправного состояния центробежного насосного агрегата в спектре тока электродвигателя // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 6. – С. 50–57.
9. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току. / А. В. Барков [и др.]. – СПб.: НОУ «Севзапучцентр». – 2012. – 68 с.
10. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
11. Костышин В. С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии. – Ивано-Франковск, 2000. – 163 с.
12. Терёхин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1). – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та. – 2010. – 292 с.
13. Толстов А. Г. Техническая диагностика. Принципы принятия решений при обработке опытов. – М.: ООО «Газпром экспо». – 2010. – 232 с.
14. Гусейнзаде М. А., Калинина Э. В., Добкина М. Б. Методы математической статистики в нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1979. – 340 с.

Сведения об авторе

Шичёв Павел Сергеевич, аспирант кафедры электрификации и автоматизации технологических процессов, Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, тел. 89042278222, e-mail: shichev@bk.ru

Information about the author

Shichev P. S., Postgraduate at the Department of Electrification and Automation of Technological Processes, Ukhta State Technical University, phone: 89042278222, e-mail: shichev@bk.ru

Чрезвычайные ситуации и проблемы экологии в нефтегазовой отрасли

УДК 5-502/504

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ГОРОДА ТЮМЕНИ

THE STUDY OF THE PHYSICAL AND CHEMICAL INDICATORS OF THE QUALITY OF DRINKING WATER OF THE CITY OF TYUMEN

А. В. Двойникова, И. А. Яговцева

A. V. Dvoynikova, I. A. Yagovtseva

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: вода; токсические вещества; водородный показатель; окислительно-восстановительный потенциал
Key words: water; toxic substances; pH; redox potential

Вода является одним из важнейших компонентов биосферы и необходимым фактором существования живых организмов, человек на 70–80 % состоит из воды.

В любой биологической системе протекают физико-химические процессы, дающие право на жизнь. Поэтому важно, чтобы биологические системы для своего развития использовали чистую, не загрязненную антропогенными веществами воду.

В настоящее время гидросфера испытывает серьезный антропогенный прессинг, не дающий возможности самоочищения природной воды.