

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МЕРТВОГО ПРОСТРАНСТВА В ЦИЛИНДРЕ ШТАНГОВОГО ГЛУБИННОГО НАСОСА

А. Г. РЗАЕВ • С. Р. РАСУЛОВ • Р. Ш. АСАДОВА • З. Г. КУРБАНОВ • Д. Р. БОГДАНОВА

Аннотация. Статья посвящена технологии диагностики оборудования нефтяной промышленности, и полученные результаты можно использовать в мониторинговой процедуре состояния глубинных насосов нефтяной скважины и для контроля их работы. Разработан метод определения коэффициента мертвого пространства цилиндра штангового глубинного насоса. Метод предусматривает измерение давления в устье насосно-компрессорной трубы (НКТ) с помощью датчиков, расположенных в двух разных точках устья НКТ; определение внутреннего диаметра НКТ на основе паспортных данных, диаметра плунжера насоса и штанги; измерение давления в устье эксплуатационной колонны и динамического уровня жидкости; вычисление значения давления, нагнетания, всасывания и плотности пластового флюида в НКТ. С целью определения коэффициента наполнения насоса в указанном методе учитываются конструктивные параметры НКТ, цилиндра насоса и штанги. Измеряют перепад давления между двумя датчиками давления, установленными в устье НКТ на расстоянии половины длины цилиндра насоса. На основании определяемых данных внутреннего диаметра НКТ, цилиндра и штанги насоса рассчитываются площади поперечных сечений указанных конструкций и определяется объем жидкости в цилиндре насоса при нижнем положении плунжера. При этом наблюдается, что, чем больше значения коэффициента мертвого пространства, тем меньше значения коэффициента наполнения цилиндра насоса. На основе полученных данных рассчитывается коэффициент мертвого пространства в цилиндре глубинного насоса.

Ключевые слова: насосно-компрессорная труба; глубинный штанговый насос; нефтяная скважина; мертвая зона; цилиндр насоса.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1–7], что эксплуатация нефтяной скважины с использованием глубинных штанговых насосов считается одним из основных методов добычи нефти, что для малодебитной скважины имеет особое преимущество. Однако изнашивание плунжерной пары, насосно-компрессорных труб и штанг в результате трения способствует снижению работоспособности оборудования. Кроме этого, трудоемкость проведения ремонта и замены глубинных насосов свидетельствует об актуальности разработки методов диагностики технического состояния глубинно-насосной установки. Одним из основных факторов технического состояния глубинно-насосной установки для оперативного управления работой скважины и, следовательно, повышения эффективности нефтедобычи является коэффициент наполнения цилиндра насоса. Коэффициент наполнения в основном зависит от трех параметров: дебита пластового флюида, его газосодержащей способности, относительного объема мертвого пространства насоса [1, 2, 4]. Мертвое пространство в существенной степени оказывает отрицательное влияние на коэффициент наполнения цилиндра насоса, то есть оно является не желаемым пространством даже при откачке любых жидкостей без содержания газа. Поэтому в реальных условиях невозможно получение коэффициента наполнения, равного единице ($\beta = 1$).

Известен метод [2] автоматического определения коэффициента наполнения, сущность которого заключается в измерении давления в двух разных точках НКТ. Одна из этих точек измерения находится в устье НКТ, а вторая располагается ниже на расстоянии, соответствующем $\frac{1}{2}$ длины цилиндра эксплуатируемого насоса. По результатам измерения определяют коэффициент наполнения цилиндра насоса. Однако данный метод не позволяет определить значение объема (коэффициента) мертвого пространства.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ современного состояния вопроса диагностики штангового глубинного насоса показал, что определение численного значения относительного объема (коэффициента) мертвого пространства считается актуальной задачей. Статья посвящена решению этого вопроса.

Решение задачи. Сущность работы заключается в определении коэффициента мертвого пространства цилиндра штангового глубинного насоса. Метод включает измерение давления в устье НКТ с помощью датчиков, находящихся в двух разных точках насосно-компрессорной трубы, одна из этих точек находится в устье НКТ, а вторая – расположена ниже на расстоянии соответствующей $\frac{1}{2}$ высоты цилиндра эксплуатируемого насоса. На основе нормативных данных определяется внутренний диаметр НКТ, диаметр плунжера насоса и штанги, измеряются давление в устье и динамический уровень жидкости в эксплуатационной колонне, определяется текущее значение давления нагнетания и всасывания пластового флюида. Автоматически определяется плотность пластовой жидкости в устье НКТ и вычисляется коэффициент мертвой зоны цилиндра по формуле:

$$K = \frac{1 - \beta(1 + R_{\text{ц}})}{\frac{1 + R_{\text{ц}}}{1 + R_{\text{м}}} [1 + b_{\text{ж}}(P_{\text{наг}} - P_{\text{вс}})] - 1}, \quad (1)$$

где β – коэффициент наполнения насоса; $R_{\text{ц}}, R_{\text{м}}$ – соответственно газовые факторы в цилиндре и мертвой области цилиндра насоса; $b_{\text{ж}}$ – коэффициент сжатия жидкости; $P_{\text{наг}}, P_{\text{вс}}$ – давление нагнетания и высасывания в цилиндре глубинного насоса, мПа.

$$\beta = \frac{\left(\frac{1}{2}l + \Delta h \cdot \frac{F_{\text{т}} - F_{\text{ш}}}{F_{\text{ц}}}\right)}{l} \times 100\%, \quad (2)$$

где l – длина цилиндра насоса, см; Δh – уровень жидкости между двумя датчиками давления в случае нижнего положения плунжера насоса, см; $F_{\text{т}}, F_{\text{ц}}$ и $F_{\text{ш}}$ – соответствующие площади поперечного сечения НКТ, цилиндра насоса и штанги, см².

$$\Delta h = \frac{\Delta P_{\text{н}}}{\rho_{\text{ф}}g}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{н}}$ – перепад давлений между датчиками при нижнем и верхнем положении плунжера, мПа; $\rho_{\text{ф}}$ – плотность флюида (смесь состоит из нефти, воды и газа) в НКТ, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/сек².

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{\Delta P_{\text{в}}}{hg}; \quad (4)$$

$$P_{\text{наг}} = L\rho_{\text{ж}}g; \quad (5)$$

$$P_{\text{вс}} = P_{\text{з}} + (L - H)\rho_{\text{ж}}g, \quad (6)$$

где h – расстояние между датчиками, м; $P_{\text{з}}$ – давление в затрубном (между эксплуатационной колонной и НКТ) пространстве, что создается газовой шапкой, мПа; $\Delta P_{\text{в}}$ – перепад давлений между датчиками при нижнем и верхнем положении плунжера, мПа; L – глубина спуска штангового глубинного насоса, м; H – динамический уровень жидкости в эксплуатационной колонне скважины, м.

Коэффициент K можно определить также из соотношения

$$K = \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{ц}}}, \quad (7)$$

где $V_{\text{в}}, V_{\text{ц}}$ – объем мертвого не желаемого пространства и объем насоса соответственно, м³.

Данный метод отличается от других существенными факторами: измерением давления нагнетания ($P_{\text{наг}}$), всасывания ($P_{\text{вс}}$) пластового флюида и процедурой определения коэффициента мертвого пространства цилиндра глубинного насоса предложенной формулой (1).

Уровень жидкости Δh , встречающийся в пространстве между двумя точками измерения давления, не оказывается равным уровню жидкости в цилиндре насоса, расположенного ниже внизу НКТ, но их объемы равны, то есть $V = V_{\text{ц}}$. Это характеризуется тем, что поперечное сечение НКТ больше поперечного сечения цилиндра насоса, и плунжер находится в нижней точке НКТ в случае, когда всасывающий клапан закрыт, и межтрубное пространство эксплуатационной колонны заполняется жидкостью. При открывании всасывающего клапана при начале движения плунжера вверх начинается заполнение цилиндра. Поэтому с целью определения коэффициента наполнения насоса в данном методе учитываются конструктивные параметры НКТ, цилиндра насоса и штанги. При этом наблюдается, что, чем больше значения коэффициента мертвого пространства, тем меньше значения коэффициента наполнения цилиндра насоса.

Разработана принципиальная схема устройства (рис.) для реализации метода, где 1 – датчик, который находится в устье насосно-компрессорной трубы; 2 – датчик, находящийся на насосно-компрессорной трубе в нижней части датчика 1 на расстоянии $\frac{1}{2}$ длины цилиндра насоса; 3 – дифманометр; 4 – датчик уровня жидкости; 5 – преобразователь; 6 – блок индикации и расчета; 7 – шток колонны штанги; 8 – выкидная линия скважины; 9 – эксплуатационная колонна; 10 – насосно-компрессорная труба; 11 – датчик давления; 12 – преобразователь.

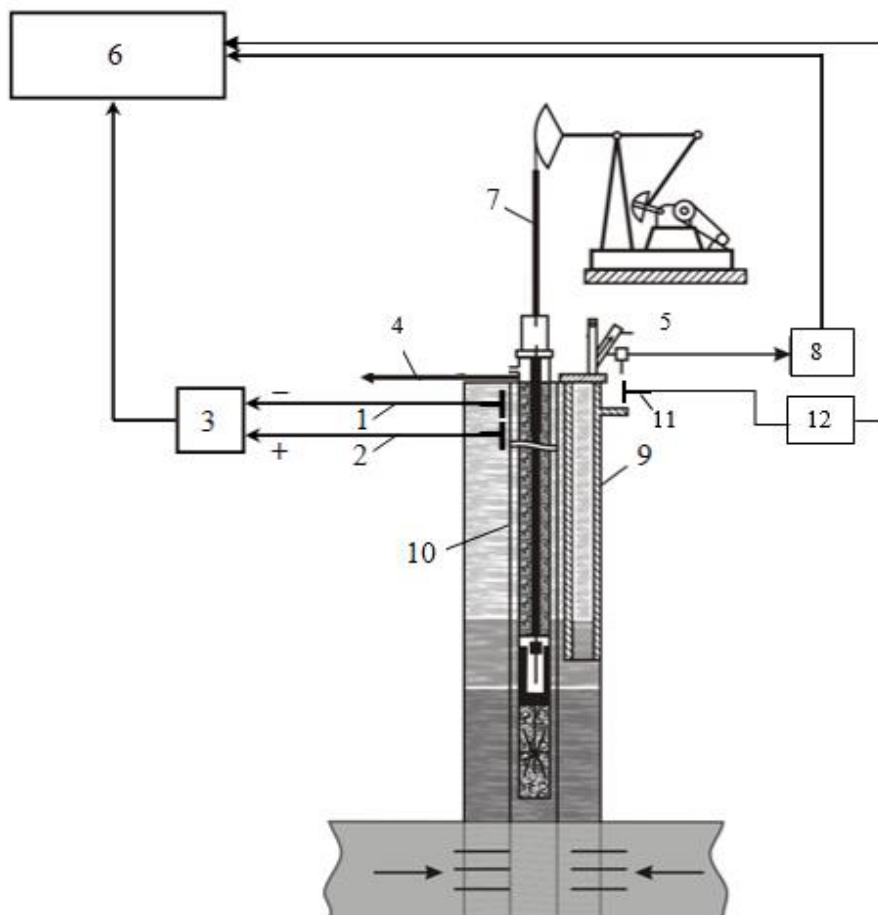


Рис. Принципиальная схема устройства.

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ МЕТОДА

Для осуществления метода, в первую очередь используя данные оборудования, определяют внутренний диаметр НКТ, цилиндра и штанги насоса. На базе указанных данных рассчитывают площади поперечных сечений указанных конструкций и определяют объем жидкости в цилиндре насоса при нижнем положении плунжера.

Измеряется перепад давления между двумя датчиками давления, установленными в устье НКТ на расстоянии половины длины l цилиндра насоса. Выходы датчиков давления соединены с камерами дифференциального манометра типа САПФИР-3, выход которого связан с блоком индикации и расчета β . Датчик, находящийся ниже, связан с положительной камерой, а верхний – с отрицательной. Измеряется ΔP_n при нижнем положении плунжера, исходя из которого в блоке β рассчитывается значение Δh , а при верхнем положении плунжера измеряется ΔP_v , по которому в блоке β вычисляется значение ρ_ϕ .

Высота жидкости между датчиками определяется по следующей формуле:

$$\Delta h = \frac{\Delta P_n}{\rho_{ж} g}, \quad (8)$$

где

$$\rho_\phi = \frac{\Delta P_v}{gh}; \quad (9)$$

h – расстояние между датчиками 1 и 2, м.

После расчета значения β в блоке β на базе данных о показателях L , H , $R_{ц}$, R_m и $b_{жс}$, вводимых вручную, по предложенному алгоритму рассчитываются значения коэффициента мертвого пространства. После расчета коэффициента наполнения насоса по предложенному алгоритму определяют коэффициент мертвого пространства.

Пример расчета β по данному методу:

$$\begin{aligned} \Delta h &= 30 \text{ см}; & l &= 200 \text{ см}; & F_T &= 18.84 \text{ см}^2; & F_{ц} &= 8.4 \text{ см}^2; & F_{ш} &= 3.14 \text{ см}^2; \\ R_{ц} &= 1.13 \text{ м}^3/\text{м}^3; & R_m &= 0.5; & \rho_{ж} &= 1.030 \text{ кг}/\text{м}^3; & g &= 9.81 \text{ м}^2/\text{с}; & L &= 1200 \text{ м}; \\ P_{вс} &= 6.76 \text{ МПА}; & P_{наг} &= 12 \text{ МПА}; & b_{ж} &= 2 \cdot 10^{-4} \text{ МПА}^{-1}; \end{aligned}$$

$$\beta = \frac{\frac{1}{2} 200 + 30 \frac{18.84 - 3.14}{8.4}}{200} \times 100 = \frac{100 + 56.07}{200} \times 100 = 78.03\%; \quad K = 0.105.$$

Основными преимуществами данного метода являются точность измерения, доступность метода и непосредственное автоматическое измерение коэффициента наполнения цилиндра глубинного насоса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В приведенном исследовании рассматриваются технологии диагностики оборудования нефтяной промышленности, и полученные результаты можно использовать в мониторинговой процедуре состояния глубинных насосов нефтяной скважины и для контроля их работы. Разработан метод определения коэффициента мертвого пространства цилиндра штангового глубинного насоса. Метод предусматривает измерение давления в устье насосно-компрессорной трубы (НКТ) с помощью датчиков, расположенных в двух разных точках устья НКТ, определение внутреннего диаметра НКТ на основе паспортных данных, диаметра плунжера насоса и штанги, измерение давления в устье эксплуатационной колонны и динамического уровня жидкости, вычисление значения давления, нагнетания, всасывания и плотности пластового флюида в НКТ. С целью определения коэффициента наполнения насоса в указанном методе учитываются конструктивные параметры НКТ, цилиндра насоса и штанги. Измеряют перепад давления между двумя датчиками давления, установленными в устье НКТ на расстоянии половины длины цилиндра насоса. На основании определяемых данных внутреннего диаметра НКТ, цилиндра и штанги насоса рассчитываются площади поперечных сечений указанных

конструкций и определяется объем жидкости в цилиндре насоса при нижнем положении плунжера. При этом наблюдается, что, чем больше значения коэффициента мертвого пространства, тем меньше значения коэффициента наполнения цилиндра насоса. На основе полученных данных рассчитывается коэффициент наполнения цилиндра насоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ковшов В. Д., Сидоров М. Е., Светланава С. Б. Динамометрирование, моделирование и диагностирование состояния глубинной штанговой насосной установки // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2011. № 3(87). С. 25–29. EDN NWBLIJ. [[V. D. Kovshov, M. E. Sidorov, S. B. Svetlanova. "Dynamometer testing, modeling and diagnostics of a deep rod installation" // News of Higher Educational Institutions. Oil and Gas. 2011. No. 3, pp. 25-29. EDN NWBLIJ. (In Russian).]]
2. Адонин А. Н. Добыча нефти штанговыми насосами. М.: Недра, 1970. 213 с. [[A. N. Adonin. Oil Production with Sucker Rod Pumps. Moscow: Nedra, 1970. (In Russian).]]
3. Муравьев В. М. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. М.: Недра, 1978. 448 с. [[V. M. Muravyov. Operation of Oil and Gas Wells. Moscow: Nedra, 1978. (In Russian).]]
4. Мищенко И. Т. Скважинная добыча нефти. М.: Нефть и газ, 2003. 816 с. [[I. T. Mishchenko. Well Oil Production. Moscow: Oil and Gas Publishing House, 2003. (In Russian).]]
5. Абдрафикова Ф. Ф., Муравьева Е. А. Технология FMEA-анализа процесса добычи нефти // СИИТ. 2021. Т. 3. № 2(6). С. 50–57. EDN HUPBIQ. [[Abdrakikova F. F., Muravyova E. A. "FMEA analysis technology for the oil production process" // SIIT. 2021. Vol. 3, No. 2(6), pp. 50-57. EDN HUPBIQ. (In Russian).]]
6. Аушев М. К., Дзармотов С. И. Модернизация и улучшение ресурса насосного оборудования с учетом анализа эксплуатационных условий / М. К. Аушев, С. И. Дзармотов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2022. № 2(128). С. 19-23. EDN GTMCEB. [[M. K. Aushev, S. I. Dzarmotov. "Modernization and improvement of the resource of pumping equipment taking into account the analysis of operating conditions" // Equipment and Technologies for the Oil and Gas Complex. 2022, No. 2 (128), pp. 19-23. DOI 10.33285/1999-6934-2022-2(128)-19-23. EDN GTMCEB. (In Russian).]]
7. Алиев Т. А., Рзаев А. Г., Гулиев Г. А., Расулов С. Р. Способ автоматического измерения степени (коэффициента) заполнения цилиндра глубинного насоса: Евразийский патент EA034703B1. Опубл. 2020-03-10. [[T. A. Aliev, Ab. G. Rzayev, G. A. Guliev, S. R. Rasulov. Method for Automatic Measurement of the Degree (Coefficient) of Filling of a Deep-Well Pump Cylinder: Eurasian Patent No. EA034703B1. Dated 2020-03-10.]]

Поступила в редакцию 16 сентября 2024 г.

МЕТАДААННЫЕ / METADATA

Title: Determination of dead space coefficient in the cylinder of a sucker rod deep well pump.

Abstract: The article is focused on the technology of diagnostics of oil industry equipment and the obtained results can be used in the monitoring procedure of oil well deep well pumps condition and for controlling their operation. A method of determining the dead space coefficient of a cylinder of a rod deep well pump has been developed. The method involves measuring the pressure in the wellhead of the pump compressor tubing (tubing) using sensors located at two different points of the tubing wellhead, determining the internal diameter of the tubing on the basis of passport data, the diameter of the pump plunger and rod, measuring the pressure in the wellhead of the production string and the dynamic fluid level, calculating the value of pressure, injection, suction and density of formation fluid in the pump compressor tubing. In order to determine the filling factor of the pump, the method takes into account the design parameters of the pump compressor tubing, pump cylinder and rod. The pressure drop is measured between two pressure transducers installed at the tubing mouth at a distance of half the length of the pump cylinder. Based on the determined data of tubing, pump cylinder and rod inner diameter, the cross-sectional areas of these structures are calculated and the volume of liquid in the pump cylinder at the bottom position of the plunger is determined. It is observed that the larger the dead space coefficient values, the smaller the pump cylinder fill factor values. On the basis of the obtained data the filling factor of the pump cylinder is calculated.

Key words: tubing, deep well rod pump, oil well, dead zone, pump cylinder

Язык статьи / Language: русский / Russian.

Об авторах / About the authors:

РЗАЕВ Аббас Гейдар оглы

Институт систем управления Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Респ. Азербайджан. Проф., гл. науч. сотр. лаборатории интеллектуальных систем диагностики и управления нефтегазовыми объектами. Дипл. инж.-системотехник (Азерб. ин-т нефти и химии, 1968). Д-р техн. наук по процессам и аппаратам хим. технологии (Ин-т теор. проблем хим. технологии, Баку, 1994). Иссл. в обл. проектирования и управления процессами нефтепереработки. E-mail: abbas_r@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3074-4887>
URL: elibrary.ruu/defaultx.asp?authorid=724563

RZAYEV Abbas Heydar oglu

Institute of Control Systems of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Republic of Azerbaijan. Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Intelligent Systems for Diagnostics and Management of Oil and Gas Facilities. Certified systems engineer (Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry, 1968). Doctor of Technical Sciences in Processes and Apparatus of Chemical Technology (Institute of Theoretical Problems of Chemical Technology, Baku, 1994). E-mail: abbas_r@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3074-4887>
URL: elibrary.ruu/defaultx.asp?authorid=724563

РАСУЛОВ Сакит Рауф оглы

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Респ. Азербайджан.

Зав. каф. промышленной безопасности и охраны труда. Дипл. химик-технолог (Азерб. ин-т нефти и химии, 1976). Д-р техн. наук по разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений (Азерб. гос. ун-т нефти и промышленности, 2011). Иссл. в обл. компл. безопасности техн. процессов и окружающей среды в промышленности.

E-mail: rasulovsakit@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1548-3143>

URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=419110

АСАДОВА Рена Шариф кызы

Институт систем управления Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Респ. Азербайджан.

Зав. отд. науч.-техн. информации и патентных исследований. Дипл. инж.-системотехник (Азерб. ин-т нефти и химии, 1985). Канд. техн. наук (PhD) по контрольно-измерительным системам и приборам (Там же, 2001). Исслед. в обл. э/магнитн. индуктивн. преобразователей.

E-mail: Renaasadova2007@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6163-8727>

URL: elibrary.ru/defaultx.asp?authorid=637241

ГУРБАНОВ Зафар Газанфар оглы

Азербайджанский государственный сельскохозяйственный университет, Респ. Азербайджан.

Ректор. Канд. техн. наук (PhD) (2007), доц. Иссл. в обл. оптимального управления многостадийными технологическими процессами нефтепереработки.

E-mail: zafer_adna@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0805-9862>

URL: https://adau.edu.az/haqqimizda_en/rehberlik_en/zafar-gazanfar-oglu-gurbanov-2491/

БОГДАНОВА Диана Радиковна

Уфимский университет науки и технологий, Россия.

Доц. каф. вычислительной математики и кибернетики. Дипл. математики-экономист (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2005). Канд. техн. наук по упр. в соц. экон. системах (Там же, 2008). Иссл. в обл. искусственного интеллекта.

E-mail: dianochka7bog@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9887-2875>

URL: https://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=182812

RASULOV Sakit Rauf oglu

Azerbaijan State Oil and Industry University, Republic of Azerbaijan.

Head of the Department of Industrial Safety and Labor Protection. Certified chemical engineer (Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry, 1976). Doctor of Technical Sciences in Development and Operation of Oil and Gas Fields (Azerbaijan State University of Oil and Industry, 2011). Research in the field of integrated safety of technical processes and the environment in industry.

E-mail: rasulovsakit@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1548-3143>

URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=419110

ASADOVA Rena Sharif kizi

Institute of Control Systems of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Republic of Azerbaijan.

Head of the Department of Scientific and Technical Information and Patent Research. Certified systems engineer (Azerbaijan Institute of Oil and Chemistry, 1985). Cand. of Technical Sciences (PhD) in control and measuring systems and devices (ibid., 2001). Research in the field of electromagnetic inductive converters.

E-mail: Renaasadova2007@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6163-8727>

URL: elibrary.ru/defaultx.asp?authorid=637241

GURBANOV Zafar Gazanfar oglu

Azerbaijan State Agricultural University, Republic of Azerbaijan.

Rector. Candidate of Technical Sciences (PhD) (2007), Assoc. Prof. Research in the field of optimal control of multi-stage technological processes of oil refining.

E-mail: zafer_adna@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0805-9862>

URL: https://adau.edu.az/haqqimizda_en/rehberlik_en/zafar-gazanfar-oglu-gurbanov-2491/

BOGDANOVA Diana Radikovna

Ufa University of Science and Technology, Russia.

Assoc. Prof., Dept of Computational Mathematics and Cybernetics. Diploma in Mathematics and Economics (2005). Candidate of Technical Sciences in Management in Social and Economic Systems (2008). Research in the field of Artificial Intelligence.

E-mail: dianochka7bog@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9887-2875>

URL: https://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=182812