

УДК 62-503.57

АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Шигина А.А., Ступина А.А.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск, e-mail: shigina_a@mail.ru, h677hm@gmail.com

Статья посвящена исследованию особенностей управления процессом шарошечного бурения в условиях неопределенности, вызванной случайным изменением свойств буримой породы. Предложена оптимизационная модель управления параметрами процесса шарошечного бурения, использующая корректирующие величины осевого усилия и частоты вращения долота. Разработан метод оптимизации режимных параметров процесса шарошечного бурения, основанный на корректировке значений осевого усилия и частоты вращения в зависимости от технических характеристик бурового агрегата и физико-механических свойств породы. Предложенная методика позволяет определять максимальные значения ресурса долота, скорости бурения и их соотношения, соответствующие оптимальным условиям протекания процесса шарошечного бурения, необходимые для адаптивного управления параметрами процесса. Разработана структура интеллектуальной автоматизированной системы управления процессом шарошечного бурения с адаптивным элементом, способная подстраивать и поддерживать значения режимных параметров соответственно актуальным свойствам породы для эффективного управления процессом.

Ключевые слова: адаптивное управление, шарошечное бурение, условия неопределенности, оптимизационная модель, эффективность функционирования

ADAPTIVE MODEL OF PROCESS CONTROL UNDER INCOMPLETE INFORMATION

Shigina A.A., Stupina A.A.

Reshetnev Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk, e-mail: shigina_a@mail.ru, h677hm@gmail.com

This article is devoted to research of roller-bit drilling process control features under incomplete information caused by random variation of the drilled rocks properties. It is proposed optimization control model of the roller-bit drilling process parameters that uses the correction values of axial force and drill bit rotational speed. The operating parameters optimization method of roller-bit drilling process is developed and based on the correcting values of axial force and bit rotational speed depending on the technical characteristics of the drilling unit and physico-mechanical rocks properties. The proposed method allows to determine the maximum headway per drill bit, drilling speed and its ratio corresponding to the optimum efficiency of the roller-bit drilling process, required for adaptive control of process parameters. The structure of intelligent automated control system of roller-bit drilling process with an adaptive element is developed and this system can adjust and maintaining the values of operating parameters correspondingly actual rocks properties for effective process control.

Keywords: adaptive control, roller-bit drilling, conditions of uncertainty, optimization model, efficiency of functioning

Проблемы оптимизации, регулирования параметров технологического процесса и учета неконтролируемых факторов зачастую связаны с информационной неопределенностью. Особенно остро данная проблема стоит при бурении скважин различного назначения, когда нет возможности заранее предвидеть изменение структуры и прочности пород. Для исследования влияния режимных параметров на процесс бурения и определения наиболее значимых контролируемых факторов зарубежные авторы предлагают использовать методы дисперсионного анализа, нейросетевые методы [8], алгоритмы оптимизации скорости проходки [4].

Выбор принципа управления режимами – сложнейшая задача, возникающая при автоматизации процесса бурения. Известны различные принципы управления и оптимизации режимов бурения [1, 2]: с использованием модели бурения и поиском экстремума; с идентификацией пород; с беспойсковой экстремальной настройкой;

с управлением по параметрам вибрации и др. Согласно современному состоянию исследований по данной научной проблеме, не учтено влияние многих режимных параметров и неконтролируемых факторов на технологический процесс. Нерациональный и несвоевременный выбор режимных параметров бурения, не адаптирующихся к оптимальным значениям, является причиной низкого ресурса, непредвиденного отказа долот и существенно заниженной производительности. Существующие системы управления данным процессом, во избежание частого отказа бурового долота, оперируют не критическими значениями режимных параметров, обеспечивающих значительно заниженную производительность.

Ориентиром для настройки режимных параметров являются их оптимальные значения, актуальные для текущих характеристик породы, определяемых с помощью оптимизационной модели. Оптимизация процесса шарошечного бурения возможна только при наличии математической моде-

ли, в основе которой лежит единый универсальный критерий, содержащий условие оптимального протекания процесса разрушения породы зубьями шарошек, которое обеспечивает соотношение производительности и ресурса долота, соответствующее минимальной себестоимости.

Для повышения качества управления процессом бурения в условиях непрогнозируемого изменения свойств породы предлагается оптимизационная модель, использующая корректирующие величины осевого усилия P_{oc} и частоты вращения $n_{вр}$. Задача оптимизации процесса шарошечного бурения сводится к нахождению экстремума целевой функции, который позволяет определить наилучшие значения параметров исследуемого процесса в условиях неполной информации об изменении свойств породы. При условии, что входными управляющими параметрами для процесса шарошечного бурения являются скорректированные величины $P_{oc,к}$ и $n_{вр,к}$ [7], то многомерная функция будет выглядеть следующим образом:

$$y = f(P_{oc,к}, n_{вр,к}) \rightarrow \text{extr},$$

где $P_{oc,к}$ – скорректированное значение осевого усилия, $P_{oc,к} = P_{oc} + \Delta P_{oc}$; $n_{вр,к}$ – скорректированное значение частоты вращения, $n_{вр,к} = n_{вр} + \Delta n_{вр}$. Здесь ΔP_{oc} , $\Delta n_{вр}$ – корректирующие величины осевого усилия, частоты вращения. Эти величины получаются в регуляторе при помощи расчетных методов, оценивающих ресурс бурового долота и экономическую эффективность процесса бурения и методики определения расчетного ресурса долот при комплексе нагрузок, зависящих от свойств породы и режимов бурения.

$$[P_{oc}] = 6 \cdot z \cdot D_p \cdot L_p \cdot \left(\frac{[\sigma_{p,ш}]}{600 \cdot \frac{v_6 + 0,5v_s}{v_6 + 0,25v_s} \cdot \frac{\Pi_6^1 + \Delta\Pi_6}{\Pi_6^1 + 0,5\Delta\Pi_6} \cdot k_{инд}} \right)^3, \quad (2)$$

где D_p – диаметр ролика, мм; L_p – длина ролика, мм; $[\sigma_{p,ш}]$ – допустимое напряжение для материала тел качения подшипников шарошечных долот; v_s – скорость опускания зубца на забой, м/с.

Из анализа выражения (2) следует, что критерий оптимизации максимального осевого усилия зависит от прочности материала подшипников, прочностных и структурных свойств породы. Максимальное значение осевого усилия как режимного параметра при любых условиях не должно превышать

Экстремальной целью является максимизация производительности при существующих условиях процесса шарошечного бурения (критерий оптимальности – производительность) и минимизация себестоимости при известной производительности (критерий оптимальности – себестоимость). Максимизация производительности возможна путем максимизации осевого усилия и оптимизации частоты вращения в сочетании с максимизацией ресурса.

Оптимальное значение частоты вращения долота при бурении породного массива [3] предлагается определять по формуле

$$[n_{вр}] = \frac{0,94 \cdot N}{10^8 \cdot \pi \cdot D_1^3 \cdot \Pi_6 \cdot h} \cdot \frac{\Pi_6^1 + \Delta\Pi_6}{\Pi_6^1 + 0,5\Delta\Pi_6} \cdot k_{инд}, \quad (1)$$

где D_1 – диаметр шарошечного долота, м; h – высота зубца, выступающая за профиль зубчатого венца, м; Π_6^1 – значение показателя буримости до изменения свойства породы; $\Delta\Pi_6$ – изменение показателя буримости; $k_{инд}$ – коэффициент формы индентора.

Как видно из выражения (1), частота вращения долота $n_{вр}$ зависит от изменения прочностных характеристик, нарушения сплошности и однородности породного массива. При этом с увеличением перепада прочностных характеристик, трещиноватости, слоистости, оптимальная частота вращения увеличивается, снижая общую нагрузку на отдельные тела качения шарошечного долота.

Максимально допустимое осевое усилие определяется из допустимых нагрузок на тела качения шарошечных долот. Допустимое максимальное осевое усилие $[P_{oc}]$ рабочего органа бурового агрегата определяется из допустимых нагрузок на тела качения шарошечных долот:

значение критерия по выражению (2). Минимизация себестоимости возможна при соблюдении критериев оптимизации – частоты вращения и осевого усилия согласно выражениям (1) и (2), что приведет к получению оптимального соотношения производительности и ресурса.

На основе предложенной модели реализуется адаптивное управление процессом бурения в условиях неопределенности. На рис. 1 представлена разработанная структурная схема интеллектуальной АСУ процесса бурения.

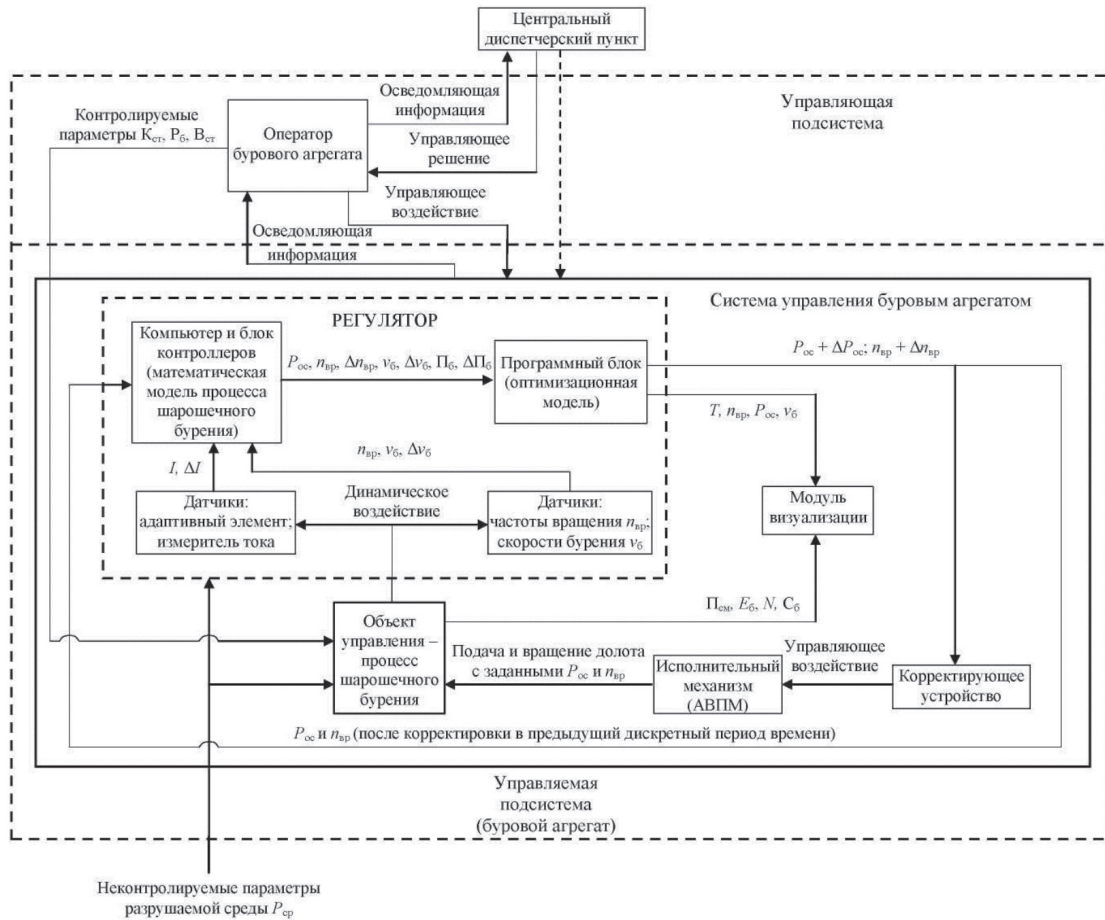


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной АСУ процессом шарошечного бурения

Для формирования управляющего воздействия используется отклонение текущего значения управляемой величины от требуемого значения. В процессе управления имеется возможность измерять основные возмущающие воздействия. Для повышения точности управления интеллектуальная АСУ с нелинейными обратными связями построена на сочетании принципов управления по возмущению и отклонению (комбинированная система управления) [5].

На систему управления и процесс шарошечного бурения (объект управления) оказывают влияние внешние возмущающие воздействия – неконтролируемые параметры разрушаемой среды $P_{ср}$ (свойства буримых пород и их случайное изменение). Данная система содержит регулятор, корректирующее устройство и исполнительный механизм [6]. В роли исполнительного механизма выступает адаптивный вращательно-подающий механизм (АВПМ). Регулятор включает: компьютер, содержащий разработанную математическую модель процесса шарошечного бурения, и блок

контроллеров; программный блок, включающий разработанную оптимизационную модель; датчики: адаптивный элемент, измеритель тока; датчики скорости бурения v_b , частоты вращения $n_{вр}$.

Входная информация об изменении свойств породы, получаемой с объекта управления, поступает в регулятор к датчикам посредством динамического воздействия. В компьютер с датчиков поступают информационные сигналы о значении тока I , его изменениях ΔI в статоре АВПМ и сигналы о значениях скорости бурения v_b , его изменениях Δv_b и частоты вращения $n_{вр}$. Измерителем тока работает трансформатор тока или амперметр. В качестве датчика скорости используется штатный электромеханический счетчик, расположенный в блоке канатно-полиспастного механизма. Датчиком частоты вращения служит тахометр, установленный на вращателе. Величина P_b , характеризующая свойства породного массива, является функцией тока в статоре электродвигателя или муфты АВПМ бурового станка.

Величина $\Delta\Pi_0$ характеризует изменение свойств, наличие структурных неоднородностей в породном массиве и является функцией, зависящей от изменения тока. Измеренная частота вращения, как кинематическая характеристика, в сочетании с показаниями датчиков тока и скорости бурения, позволяет получать численные значения осевого усилия P_{oc} , показателя буримости Π_0 и $\Delta\Pi_0$ в процессе бурения. Затем эти сигналы преобразуются в управляющие при помощи блока контроллеров, обнаруживающих и ликвидирующих отклонение (реализация процесса управления). Далее сигналы поступают в программный блок, в котором рассчитываются оптимальные значения режимных параметров P_{oc} и $n_{вр}$, скорость бурения v_6 , прогнозируемый ресурс долота T (выходные наблюдаемые параметры).

Программный блок содержит оптимизационную модель, использующую корректирующие величины осевого усилия ΔP_{oc} и частоты вращения $\Delta n_{вр}$. Для улучшения качественных характеристик системы действительные значения режимных параметров сравниваются с оптимальными и автоматически изменяются с помощью корректирующего устройства. На процесс шарошечного бурения воздействует исполнительный механизм в соответствии с получаемой командной информацией от регулятора. Далее процесс осуществляется с вновь заданными значениями режимных параметров $P_{oc,к}$ и $n_{вр,к}$. В модуле визуализации отражаются оперативно вычисляемые на выходе значения производительности бурового агрегата в смену $\Pi_{см}$, энергоёмкости процесса шарошечного бурения E_6 , мощности, передаваемой для разрушения породы N , удельных затрат на бурение S .

По обратной связи осуществляется передача информации о текущих значениях режимных параметров P_{oc} и $n_{вр}$, установившихся после корректировки в предыдущий дискретный период времени. Расчетные значения всех выходных параметров выводятся на приборную панель через модуль визуализации для контроля. Осведомляющая информация о значениях этих параметров поступает от системы управления к оператору бурового агрегата и далее – в центральный диспетчерский пункт.

Разработанные методики с учетом зависимостей (1) и (2) позволяют рассчитывать критерии оптимизации, скорость бурения и ресурс шарошечного долота для различных свойств породы. На рис. 2 показаны расчетные зависимости ресурса долота T от скорости бурения v_6 и осевого усилия P_{oc} .

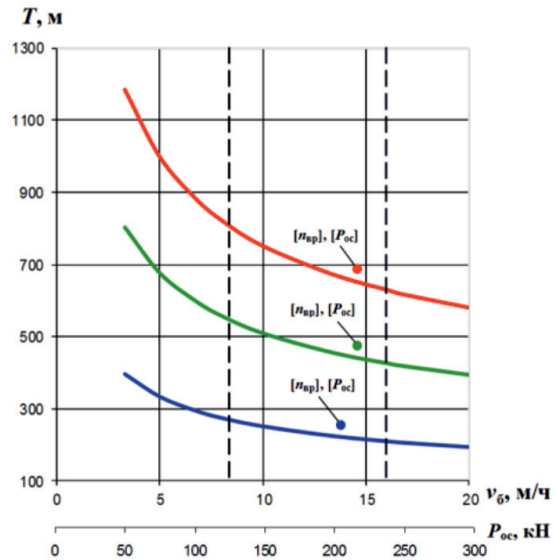


Рис. 2. Зависимости ресурса T шарошечных долот, скорости бурения v_6 и осевого усилия P_{oc} при $n_{вр} = 1,5$ об/с при $\Pi_0 = 15$

Точками показаны режимы при оптимальных значениях параметров $[P_{oc}]$ и $[n_{вр}]$. Характеристики породы для кривых обозначены различными цветами (рис. 2): красным – $n_{сл} = 10$, $\Delta\Pi_0 = 2$, $n_{тр} = 0$; зеленым – $n_{сл} = 20$, $\Delta\Pi_0 = 2$, $n_{тр} = 10$; синим – $n_{сл} = 20$, $\Delta\Pi_0 = 4$, $n_{тр} = 20$. Соответствующими цветами обозначены точки оптимальных режимов для указанных характеристик пород. Для свойств породы, соответствующих красной и зеленой кривым, определены оптимальные значения режимных параметров: $[n_{вр}] = 1,79$ об/с, $[P_{oc}] = 185$ кН; ресурс долота T при этом для красной кривой $T = 692$ м, для зеленой кривой $T = 469$ м. Для свойств породы, соответствующих синей кривой, определены оптимальные значения режимных параметров: $[n_{вр}] = 1,88$ об/с, $[P_{oc}] = 158$ кН; ресурс долота при этом для синей кривой $T = 246$ м. Анализ показывает, что при оптимальном режиме наблюдается существенное увеличение скорости бурения и ресурса долота. При этом оптимальные режимы находятся в области допустимых значений, установленных заводом-изготовителем, что доказывает адекватность оптимизационной модели (участки кривых на рис. 2, разграниченные вертикальными линиями).

С учетом выражений для определения оптимальных значений режимных параметров (2) и (3) скорость бурения при оптимальном управлении $v_{6,н}$ с использованием адаптивного элемента предлагается определять по следующей формуле:

$$v_{6,н} = \frac{40 \cdot [P_{oc}] \cdot [n_{вр}]}{\Pi_0 \cdot D_1^2}$$

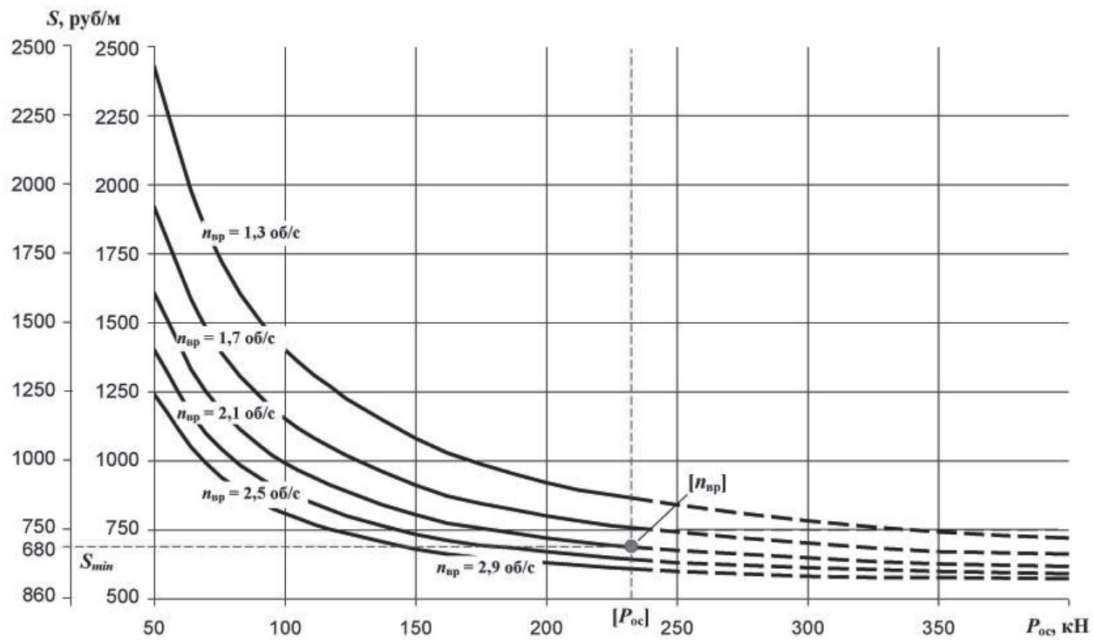


Рис. 3. Зависимости интегрального показателя эффективности S управления процессом шарошечного бурения от режимных параметров P_{oc} и $n_{вр}$ на примере ЗАО «Хакасвзрывпром»

В качестве интегрального критерия оценки эффективности управления процессом шарошечного бурения (включая режимные параметры) принимаются эксплуатационные затраты S на бурение 1 м скважины с учетом повышения производительности и ресурса долота при оптимальном управлении. С экономической точки зрения более оправданным является использование следующего соотношения:

$$S(v_6, T) = \gamma \cdot t_b + \frac{\gamma}{v_6} + \frac{C_d}{T} = \frac{A \cdot t_b}{t_c \cdot \eta} + \frac{A}{t_c \cdot \eta \cdot v_6} + \frac{C_d}{T},$$

где γ – стоимость машино-часа производственной работы бурового станка, выраженная соотношением $\gamma = A/(T \cdot \eta)$; t_b – удельные затраты времени на вспомогательные операции, мин/м; C_d – стоимость долота, руб.; T – ресурс шарошечных долот, м; A – стоимость машино-смены, руб.; t_c – продолжительность смены, ч; η – коэффициент эффективного использования станка в течение смены (обычно составляет $\eta = 0,75 - 0,85$).

На рис. 3 показаны расчетные зависимости удельных затрат на бурение породы с различными режимными параметрами для ЗАО «Хакасвзрывпром» (Черногорский разрез компании СУЭК, Республика Хакасия, г. Черногорск). Расчетные зави-

симости с учетом выражений для определения оптимальных значений режимных параметров (2) и (3) позволяют определить минимальные удельные затраты при условии оптимального управления. На рис. 3 показана точка, соответствующая оптимальным значениям режимных параметров $[P_{oc}]$, $[n_{вр}]$ и максимальной эффективности технологического процесса по интегральному показателю.

Классический метод оценки эффективности процесса шарошечного бурения не связан с оптимизацией режимных параметров, а оперирует апостериорной информацией об имеющихся эксплуатационных показателях. Анализ полученной информации, достаточной для статистической обработки, в этом случае позволяет делать выводы о корректировке значений режимных параметров процесса бурения с целью улучшения показателей надежности, производительности и себестоимости.

Разработанная адаптивная модель управления технологическим процессом позволяет осуществлять корректировку значений режимных параметров в условиях непрогнозируемого изменения свойств породы. Оценка эффективности управления процессом шарошечного бурения по интегральному показателю с учетом критериев оптимизации при использовании предложенной интеллектуальной системы управления позволяет определять минимальную

себестоимость технологического процесса с условием поддержания оптимальных значений режимных параметров.

Список литературы

1. Бродов Г.С. Технологические измерения и автоматизация процесса бурения / Г.С. Бродов, И.Г. Шелковников, Э.К. Егоров. – СПб.: ФГУ НПП «Геологоразведка», 2004. – 105 с.
2. Чистяков В.К. Оптимизация и автоматизация процессов разведочного бурения / В.К. Чистяков, И.Г. Шелковников. – Л.: ЛГИ, 1990. – 102 с.
3. Шигина А.А. Математическое моделирование процесса функционирования системы «буровой станок – шарошечное долото – горная порода» в условиях неопределенности / А.А. Шигина, А.Г. Пимонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – Вып. 5. – С. 131–137.
4. Chapman C.D. Automated closed-loop drilling with ROP optimization algorithm significantly reduces drilling time and improves downhole tool reliability / C.D. Chapman, J.L. Sanchez, R. Perez [et al.] // SPE-151736-MS, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 2012.
5. Stupina A.A. Automated intellectual system with the short-duration nature of feedback / A.A. Stupina, A.A. Shigina, S.N. Ezhemanskaja [et al.] / Life Science Journal. – 2014. – Vol. 11, № 8s. – P. 302–306.
6. Stupina A.A. Control by technological mode parameters with an intellectual automated system / A.A. Stupina, A.A. Shigina, A.O. Shigin [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2016. – Vol. 155, conf. 1.
7. Stupina A.A. Mathematical formulation of technological processes optimization problem / A.A. Stupina, A.A. Shigina, A.O. Shigin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2015. – Vol. 94, conf. 1.
8. Wang Y. Application of real-time field data to optimize drilling hydraulics using neural network approach / Y. Wang, S. Salehi // Journal of Energy Resources Technology-transactions of the ASME. – 2015. – 13 p.