

УДК 33:004:421:622

DOI 10.21661/r-465524

*Ф.Н. Абу-Абед*

## **ЭКОНОМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА СИСТЕМ СНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Аннотация:* предотвращение возможных отказов объектов нефтегазодобывающей промышленности является важной задачей при разработке новых месторождений и требует проведения ряда мероприятий по обеспечению их надёжности и отказоустойчивости. Применяя нейростетевые технологии, разработаны классификатор, выявляющий возможные отклонения и аномалии при бурении нефтяных и газовых скважин, алгоритм определения структуры и состава набора запасных имуществ и принадлежностей для возобновления работоспособности установки для бурения нефтяных и газовых скважин после отказа отдельных комплектующих.

*Ключевые слова:* предаварийные ситуации, искусственные нейронные сети, запасные части и комплектующие, безаварийность.

*F.N. Abu-Abed*

## **ECONOMIC METHODS OF OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION SUPPLYING SYSTEMS OF THE OBJECTS OF OIL AND GAS INDUSTRY**

*Abstract:* preventing possible refusals of oil and gas production facilities is an important task in the development of new fields and requires a number of measures to ensure their reliability and resiliency. Applying neural technology, the author has developed the classifier revealing possible deviations and anomalies at drilling of oil and gas wells, algorithm for determining the structure and composition of a set of spare assets and supplies for the restoration of the operability of the rig for drilling oil and gas wells after the failure of individual components.

**Keywords:** *tear misses, artificial neural network, spare parts – a set of spare parts and accessories, trouble-free.*

### *Введение*

Осложнения при бурении и эксплуатации скважин, к сожалению, неизбежны. Большинство из них – результат нарушения технологической дисциплины (технологии), часть объясняется недостаточным знанием геолого-физических условий (особенно в разведочном бурении), непониманием причин явлений, предшествующих осложнению. Иногда исполнители при выполнении сложных технологических операций идут на так называемый «обоснованный» риск, в результате чего возникают осложнения и аварии [1; 2].

### *Теоретический анализ*

Если принять во внимание, что основной и самый длительный жизненный этап скважины – период её эксплуатации, то следует считаться с тем, что выход из строя скважины даже на короткое время – потеря объёма добычи нефти или газа. Поэтому необходимо знать причины осложнений, способы их предупреждения (профилактики) и методы борьбы с их последствиями [2; 3; 7]. В связи с этим актуальна задача своевременной диагностики осложнений, ликвидации их последствий и обеспечения минимального времени восстановления работоспособности скважин.

Поскольку при обнаружении предаварийных ситуаций возникающих в процессе бурения, размерность пространства признаков достаточно велика и границы между классами предаварийных ситуаций являются нечёткими, применение байесовской классификации и кластерного анализа для решения задачи распознавания предаварийных ситуаций в процессе проводки скважины представляется нецелесообразным, поэтому в качестве математического аппарата решения задачи распознавания предаварийных ситуаций предложено использовать искусственные нейронные сети прямого распространения, обучаемые с помощью алгоритма обратного распространения ошибки [2; 3].

Математически процесс обучения нейросети описывается следующим образом: в процессе функционирования нейронная сеть формирует выходной сигнал

2 <https://interactive-plus.ru>

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Y в соответствии с входным сигналом X, реализуя некоторую функцию  $Y = G(X)$ . Если архитектура сети задана, то вид функции G определяется значениями синаптических весов и смещений сети. Для решения этой задачи могут быть использованы следующие алгоритмы: алгоритмы локальной оптимизации с вычислением частных производных первого порядка; алгоритмы локальной оптимизации с вычислением частных производных первого и второго порядка; стохастические алгоритмы оптимизации; алгоритмы глобальной оптимизации.

В этих условиях целесообразно применение метода искусственных нейронных сетей, обладающих двумя существенными преимуществами по сравнению с классическими алгоритмами:

- универсальный тип архитектуры и единый универсальный алгоритм обучения (отсутствие необходимости их разработки для каждого типа задач);
- наличие примеров (предыстории, фиксированного опыта), на основании которых производится обучение нейронных сетей.

Алгоритм обратного распространения ошибки применяется для обучения многослойных нейронных сетей с последовательными связями, на основе которых построен классификатор предварийных ситуаций. Это итеративный градиентный алгоритм, который используется с целью минимизации среднеквадратичного отклонения текущего выхода многослойного персептрона и желаемого выхода [2–5].

Существующие методы улучшения качества обучения с помощью данного алгоритма связаны с использованием различных функций ошибки, процедур определения направления и величины шага, процедур составления расписания обучения и других.

В качестве основного недостатка этих методов можно отметить отсутствие в них эффективной процедуры определения глобальности минимума целевой функции. В работе [2; 3; 7] предложена модификация базового алгоритма обучения, ориентированная на нахождение этого глобального минимума.

Для распознавания состояний буровой установки возможно использование способа классификации с учителем, так как при бурении любой скважины все

технологические параметры фиксируются и сохраняются для дальнейшей обработки. Таким образом, в данной отрасли накоплен богатейший фактический материал для реализации обучения нейросети распознаванию штатных и предаварийных ситуаций.

Для обеспечения достаточных вычислительных возможностей необходимо использовать многослойные нейросети с числом слоев скрытого слоя, равным количеству входов нейросети [2–5]. Классическим методом обучения подобных нейросетей является метод обратного распространения ошибки. Для повышения эффективности этого метода обучения ранее была предложена эффективная модификация с двумя параметрами: количеством достижения локального минимума и увеличения радиуса поиска [2–4; 7].

Исследования проводились с применением нейросетевого анализатора аномальных ситуаций, построенного на базе полносвязной многослойной нейросети. Последняя была обучена по модифицированному алгоритму обратного распространения с использованием объектно-ориентированного подхода [2–5; 7].

Цель работы заключается в повышении эффективности функционирования буровых установок за счёт сокращения времени отказовых состояний и затрат на систему запасов элементов, обеспечивающую устранение отказов [3; 7].

Для достижения поставленной цели, с учётом ранее разработанного анализатора предаварийных ситуаций [2; 3; 5; 6], необходимо создать методику оптимизации системы запасов элементов для обеспечения текущего ремонта буровых установок. Для решения поставленной задачи в качестве методов исследования приняты методы статистического анализа данных – с целью определения спроса на запасные части и комплектующие буровых установок и методы имитационного моделирования – для решения задачи минимизации приведенных затрат на систему запасов элементов, обеспечивающих своевременное устранение отказов буровых установок.

Для определения оптимального состава запасов имущества и принадлежностей (ЗИП) выполнена классификация осложнений и отказов, возникающих в

процессе бурения и влияющих на ресурс комплектующих [1–8]. В качестве основных типов осложнений выделены:

- разрушение стенок скважины;
- поглощение бурового промывочного и тампонажного растворов;
- пластовые флюидопроявления;
- прихваты колонны труб и бурового инструмента в стволе скважины.

Контроль процесса бурения осуществляется с помощью множества технологических параметров, определяемых с помощью датчиков.

Все контролируемые параметры можно классифицировать на две большие группы:

- режимные параметры – параметры, которыми можно управлять в процессе проводки скважины;
- реагирующие параметры – параметры, на изменение которых влияют изменения режимных параметров и условия в скважине.

В результате анализа задач обработки геолого-технологической информации рассматриваемая нами задача была отнесена к классу диагностических задач, включающих следующие группы.

1. Раннее обнаружение газонефтеводопроявлений и поглощений при бурении.
2. Определение степени дегазации жидкости в циркуляционной системе в связи с возможностью продолжения бурения при проявлении.
3. Диагностику предаварийных ситуаций в реальном времени.
4. Диагностику работы бурового оборудования.

Проведённый анализ показал, что повышение эффективности функционирования каждой буровой установки в отдельности возможно за счёт решения задач третьей и четвертой группы.

Вопросы обоснования системы запасов элементов для обеспечения текущего ремонта буровой установки являются ключевыми. Обеспечение восстановления работоспособности буровой установки рассматривается как необходимая

составляющая её эффективной эксплуатации. Поставлена задача оптимизации состава ЗИП по критерию его минимальной стоимости [1; 3; 8].

Прямая задача оптимизации при ограничениях ПД ( $L_1, \dots, L_N$ )  $\geq \Pi\Delta^0$ :

$$C_{\sum \text{ЗИП}}^0 = \sum_{i=1}^N C_i L_i^{\text{opt}} = \min_{\{L_1, \dots, L_N\}} \sum_{i=1}^N C_i L_i \quad (1)$$

где  $N$  – количество номенклатур (типов) запасных частей; ( $C_1, \dots, C_N$ ) – вектор стоимостей запасных частей; ( $L_1^{\text{opt}}, \dots, L_N^{\text{opt}}$ ) – оптимальный комплект ЗИП;  $\Pi\Delta^0$  – нормативное значение показателя достаточности.

### *Методика*

Для организации комплекта ЗИП использован иерархический принцип:

– одиночный ЗИП (ЗИП-О) предназначен для восстановления работоспособности одного изделия и размещается вблизи места его эксплуатации, чтобы обеспечить малое время замены (несколько десятков минут);

– при эксплуатации одновременно нескольких одинаковых изделий (обычно не менее трех) может быть создан групповой ЗИП (ЗИП-Г), который доступен всем изделиям (буровым установкам); основное отличие ЗИП-Г от ЗИП-О состоит в существенно большем времени доставки запчастей к месту эксплуатации отказавшего изделия;

– если эксплуатируются несколько одинаковых изделий, но не выполняются необходимые условия для создания ЗИП-Г по одному или нескольким типам сменных модулей, то создают двухуровневую систему ЗИП (ЗИП-2У).

Для восстановления работоспособности буровой установки предложено организовать двухуровневую систему ЗИП с пополнением складов верхнего уровня из единого центрального источника. Проведён анализ классических показателей достаточности комплекта ЗИП, используемых при его оптимизации. Показано, что все эти показатели носят надёжностный характер и не соответствуют требованиям к показателям оценки системы ЗИП с точки зрения удовлетворения основных принципов построения критериев оценки эффективности

сложной системы [1; 3; 8]. На рисунках 1.1–1.3 представлены алгоритмы, реализующие метод оптимизации состава ЗИП:

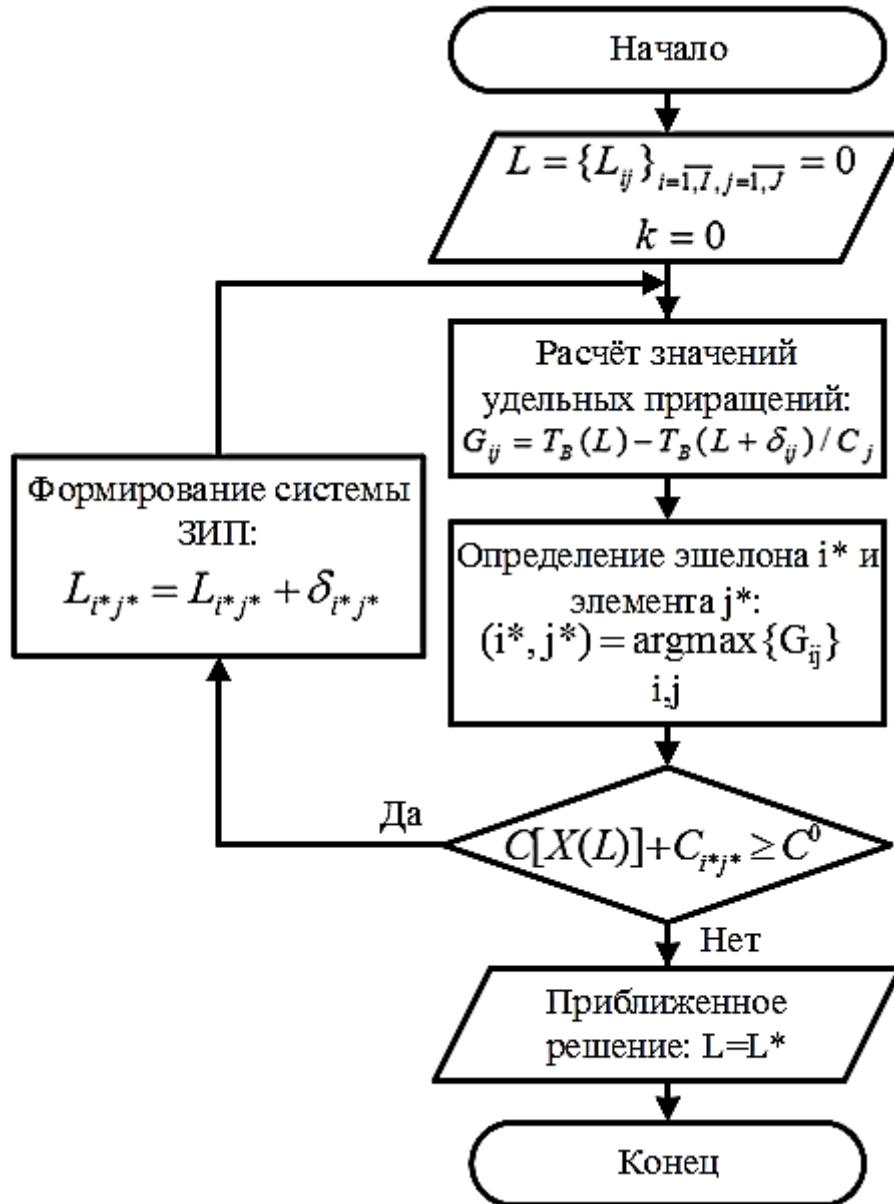


Рисунок 1.1. Блок-схема алгоритма формирования состава ЗИП – А1

Обозначения:  $G_{ij}$  – расчётные значения удельных приращений, изменяющие запас  $i$ -го типа элементов на  $j$ -ом эшелоне;  $m$  – количество элементов заданного типа в период пополнения;  $T_B$  – среднее время восстановления (показатель эффективности системы);  $L$  – количественный состав запасов элементов;  $T_D$  – время доставки элементов из ЗИП;  $T_P$  – время ремонта буровой установки;  $T_i$  – пополнения запасов  $i$ -го типа;  $C_D$  – стоимость доставки элементов в комплект ЗИП при плановых поставках;  $C_0$  – стоимость серийного образца – буровой

установки;  $K$  – показатель полноты;  $i, j$  – уровни эшелонирования и количество элементов каждого эшелона;  $C_j$  – стоимость системы ЗИП в расчёте на один образец;  $X(L)$  – характеристики системы ЗИП;  $opt$  – оптимальное значение для указанного параметра;  $A1$  – алгоритм формирования состава ЗИП;  $A2$  – алгоритм коррекции состава ЗИП.

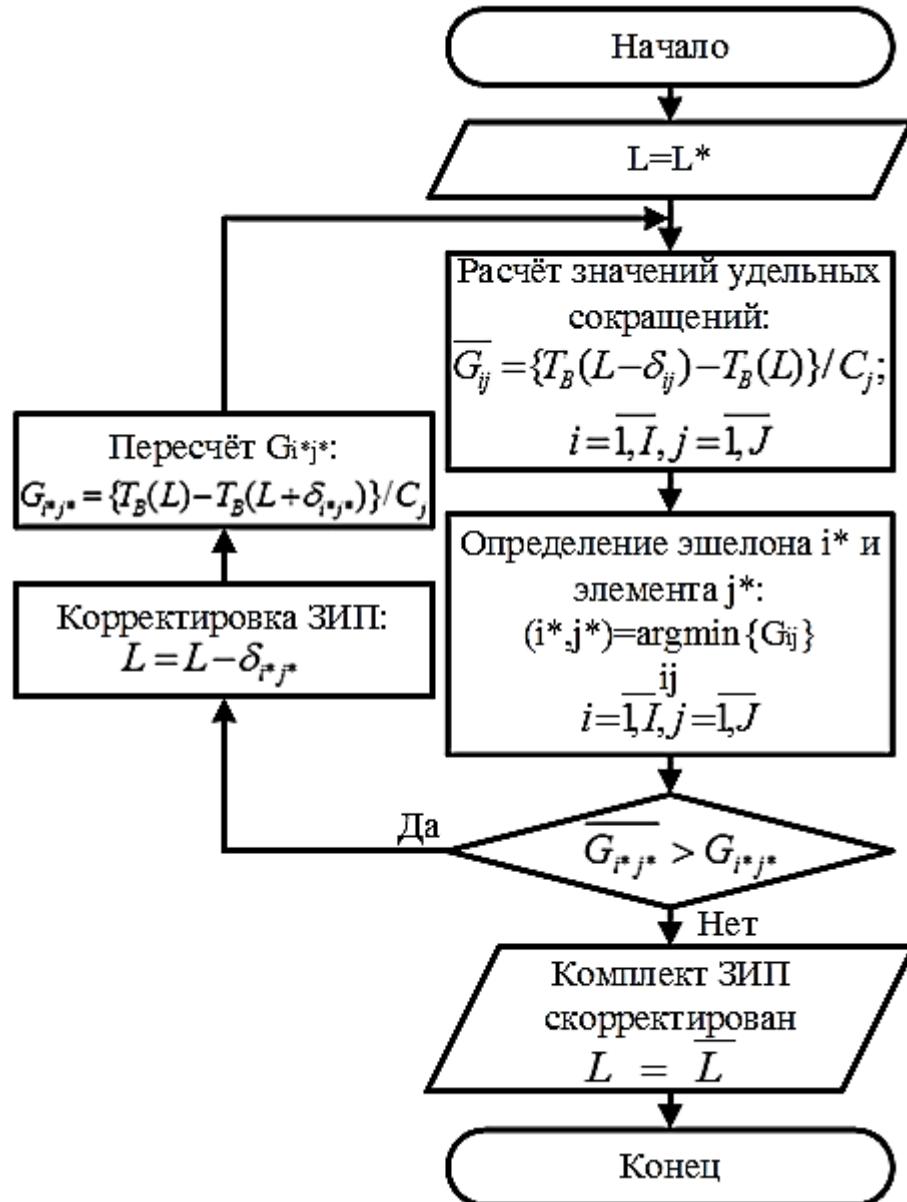


Рисунок 1.2. Блок-схема алгоритма коррекции состава ЗИП – А2

Предложено производить оптимизацию системы ЗИП на основании приведённого вклада каждого её элемента в среднее время восстановления работоспособности буровой после отказа. Разработан итерационный алгоритм оптимизации структуры и состава ЗИП буровой, представленный на рисунке 1.3.

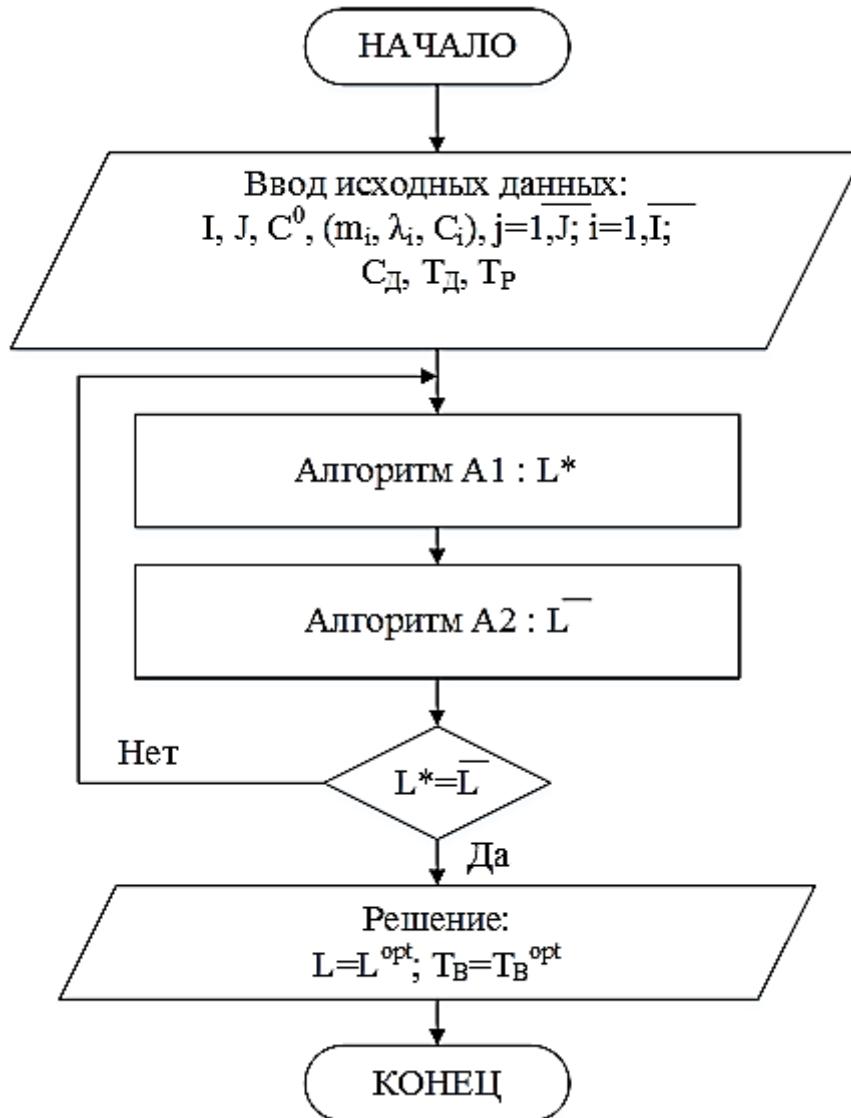


Рис. 1.3. Блок-схема алгоритма реализации метода оптимизации состава ЗИП

Алгоритм состоит из трёх под алгоритмов, первый из которых находит приближенное решение задачи для заданных ограничений по стоимости ЗИП.

На рисунке 2 представлены результаты расчётов стоимости ЗИП буровой установки с использованием разработанного алгоритма. Применение процедуры корректировки состава ЗИП указанной на рисунке 1.2., позволило сократить затраты на создание системы ЗИП на 15–18%.

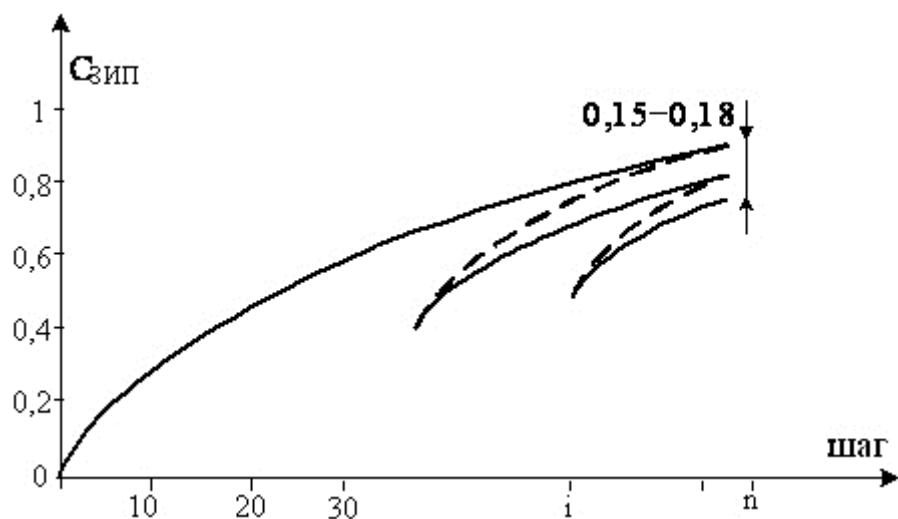


Рис. 2. Результаты расчёта стоимости ЗИП (уточнение состава согласно предложенного на рисунке 1.3):

— верхняя кривая — до проведения процедуры корректировки (в соответствии с ГОСТ), нижние — расчёт по предложенному алгоритму, позволяющий определить стоимость ЗИП на основе оптимизированного состава.

На оси ординат отображено «Стоимость ЗИП», на оси абсцисс «Время восстановления ЗИП на n-ом шаге».

По результатам эксплуатации буровой установки в ходе моделирования требуемого времени восстановления производится исключение из состава группового ЗИП элементов, которые вносят меньший вклад, чем элемент на завершающем шаге моделирования.

#### *Экспериментальная часть*

Исследование модели системы снабжения запасными частями группы буровых установок в пределах одного месторождения производилось для трех стратегий эксплуатации оборудования [1; 3; 7; 8].

1. Эксплуатация по ресурсу (выработка заданного количества часов или метров проходки).
2. Эксплуатация по состоянию (обнаружение критического состояния во время очередного регламентного осмотра).
3. Эксплуатация до выхода из строя в результате отказа или поломки.

При применении любой из вышеприведённых стратегий возможно использование нейросетевого анализатора штатных и предаварийных ситуаций

на буровой, который является источником дополнительной информации для оценки остаточного ресурса используемых комплектующих. Это позволяет усовершенствовать стратегию поставки комплектующих и уменьшить суммарные затраты на эксплуатацию буровой и содержание системы снабжения запасными частями [1; 7; 8].

В качестве критерия оптимизации использовано выражение:

$$S = S_{\text{эк}} + S_{\text{пр}} + S_{\text{xp}} + S_{\text{tp}}. \quad (2)$$

Первые два слагаемых соответствуют затратам на эксплуатацию буровой – стоимости эксплуатации в рабочем состоянии  $S_{\text{эк}}$  и стоимости простоя  $S_{\text{пр}}$  при выходе из строя какой-либо комплектующей:

$$S_{\text{эк}} = \sum_{t=0}^T s_t^{\text{эк}}, \quad s_t^{\text{эк}} = \begin{cases} a_{\text{эк}}(t), & t \in T_{\text{эк}} \\ 0, & t \in T_{\text{пр}} \end{cases}, \quad (3),$$

$$S_{\text{пр}} = \sum_{t=0}^T s_t^{\text{пр}}, \quad s_t^{\text{пр}} = \begin{cases} a_{\text{пр}}(t), & t \in T_{\text{пр}} \\ 0, & t \in T_{\text{эк}} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $S_t^{\text{эк}}$  – затраты на эксплуатацию буровой в момент времени  $t$ ;  $a_{\text{эк}}(t)$  – стоимость эксплуатации буровой за единицу времени;  $S_t^{\text{пр}}$  – затраты на простой буровой в момент времени  $t$ ;  $a_{\text{пр}}(t)$  – стоимость простоя буровой за единицу времени;  $T_{\text{пр}}$  – время простоя;  $T_{\text{эк}}$  – время эксплуатации.

Последние два слагаемых уравнения (2) соответствуют стоимости хранения комплектующих на складах ЗИП  $S_{\text{xp}}$  и стоимости их транспортировки  $S_{\text{tp}}$  со складов на буровые. Для их вычисления используются следующие выражения [3; 6; 7]:

$$S_{\text{xp}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ск}}} \sum_{j=1}^{N_k^i} s_{ij} t_{ij}, \quad (5)$$

$$S_{\text{tp}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{буп}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ск}}} \sum_{k=1}^{N_k^i} \bar{s}_{ij} d_{ij} n_{ik}, \quad (6)$$

где  $N_{\text{ск}}$  – число складов ЗИП;  $N_k^i$  – число комплектующих  $k$ -го типа на  $i$ -ом складе;  $N_{\text{буп}}$  – число буровых установок;  $s_{ij}$  – стоимость хранения  $j$ -ой

комплектующей на  $i$ -ом складе;  $t_{ij}$  – время хранения  $j$ -ой комплектующей на  $i$ -ом складе;  $\bar{s}_{ij}$  – стоимость доставки комплектующих на  $i$ -ю буровую с  $j$ -го склада;  $d_{ij}$  – расстояние между на  $i$ -ой буровой и  $j$ -м складом;  $n_{ik}$  – количество комплектующих  $k$ -го типа, доставляемых на  $i$ -ю буровую.

### Результаты

Исследования совместного функционирования разработанных средств распознавания ситуаций на буровой и системы восстановления её работоспособности после отказов оборудования проводились для трёх вышеуказанных стратегий эксплуатации оборудования и различного количества нейронов выходного слоя нейросетевого распознавателя, обеспечивающего различную степень детализации распознаваемой ситуации на буровой. На рисунке 3 представлены графики значения приведённых затрат на эксплуатацию буровой и её восстановление в случае отказов.

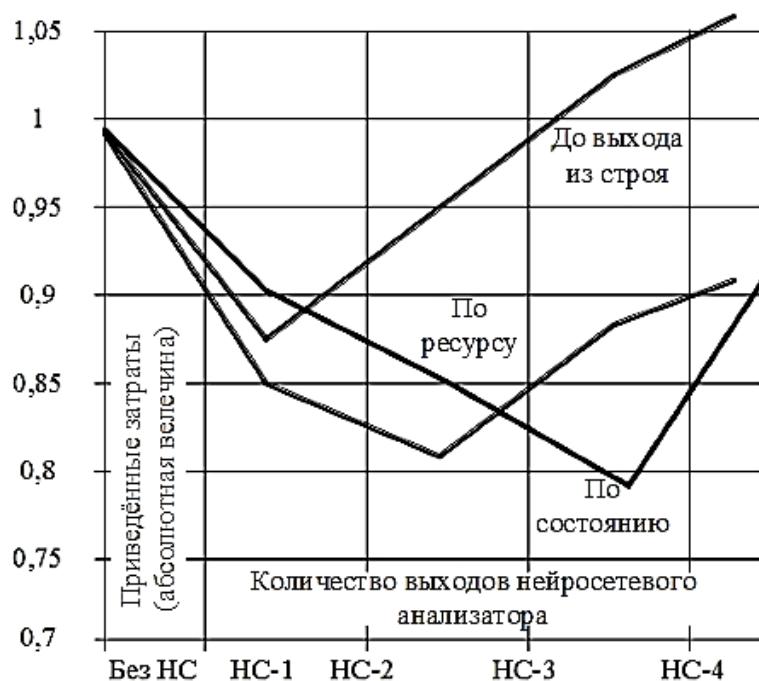


Рис. 3. Зависимость приведённых затрат от количества нейронов выходного слоя для трёх стратегий эксплуатации оборудования

Наибольший эффект при использовании стратегии эксплуатации 1 «По ресурсу» достигается для двух выходов нейросетевого анализатора, а при

использовании стратегии 2 «По состоянию» – для трех выходов. Так как стратегия «По ресурсу» в реальности встречается чаще, то для практического использования можно рекомендовать нейросетевой анализатор с двумя состояниями на выходе [2; 7; 8]. Разработанный комплекс средств может успешно применяться при обеспечении функционирования, ремонта и восстановления работоспособности буровой установки при использовании иерархической организации системы ЗИП не выше второго уровня. После обучения нейросетевого анализатора на основе данных, характеризующих работу конкретной буровой, он может использоваться как для контроля состояния буровой в режиме эксплуатации, так и в режиме тренажера для обучения буровых мастеров [2; 7; 8]. В *заключении* формулируются основные результаты проведённого исследования:

- предложено применять систему показателей достаточности для оценки эффективности организации системы ЗИП и комплексной оптимизации групповых и одиночных комплектов ЗИП;
- разработаны алгоритм и программное обеспечение для оптимизации стоимости одиночных и групповых ЗИП, которые позволили уменьшить затраты на создание состава ЗИП на 15–18% по сравнению с результатами известных методов расчёта;
- проведены исследования влияния количества выходов анализатора на эффективность функционирования системы поставки ЗИП для различных стратегий эксплуатации оборудования; оптимальное число выходов анализатора составило 2–3, при этом приведённые затраты снижаются на 18–22%.

### ***Список литературы***

1. Абу-Абед Ф.Н. Автоматизированная система обнаружения предаварийных ситуаций на объектах нефтегазодобывающей промышленности. Каротажник. – 2015. – 5 (251). – С. 48–61.

2. Абу-Абед Ф.Н. Построение нейросетевого анализатора аномалий для снижения риска при строительстве газовых и нефтяных скважин. Бурение и нефть – 2013. – 7–8. – С. 72–75.
3. Абу-Абед Ф.Н. Построение классификатора для снижения риска при строительстве нефтяных скважин на базе нейросетевой модели. Управление качеством в нефтегазовом комплексе – 2013. – №1 (1). – С. 47–50.
4. Абу-Абед Ф.Н. Имитационное моделирование процессов ремонтно-технического обслуживания нефтяных скважин. Программные продукты и системы. – 2010. – №4. – 43. с.
5. Абу-Абед Ф.Н. Формирование рабочего словаря признаков для распознавания нештатных ситуаций в промышленном бурении скважин. Территория Нефтегаз / Ф.Н. Абу-Абед, Н.А. Борисов. – 2011. – №10. – С. 16–19.
6. Абу-Абед Ф.Н. Определение необходимого набора признаков для распознавания предаварийных ситуаций в процессе проводки скважин. Каротажник / Ф.Н. Абу-Абед, Н.А. Борисов. – 2011. – №10. – С. 64–68.
7. Абу-Абед Ф.Н. Сокращение эксплуатационных затрат в системах оперативного контроля и управления объектами нефтегазодобывающей промышленности. Каротажник / Ф.Н. Абу-Абед, П.В. Быков, Л.Г. Наумова. – 2016. – №5 (263). – С. 100–106.
8. Абу-Абед Ф.Н. Методика расчёта системы запасов элементов и принадлежностей для обеспечения ремонта буровых установок. Каротажник. – 2015. – №9 (255). – С. 73–78.

### ***References***

1. Abu-Abed, F.N. (2015). Avtomatizirovannaia sistema obnaruzheniia predavariiinykh situatsii na obektakh neftegazodobyvaiushchei promyshlennosti. Karotazhnik, 5 (251), 48–61.
2. Abu-Abed, F.N. (2013). Postroenie neirosetevogo analizatora anomalii dlja snizheniia riska pri stroitel'stve gazovykh i neftianykh skvazhin. Burenie i neft, 7–8, 72–75.

- 
3. Abu-Abed F.N. (2013). Postroenie klassifikatora dlia snizheniia riska pri stroitel'stve neftianykh skvazhin na baze neirosetevoi modeli. Upravlenie kachestvom v neftegazovom komplekse, 1 (1), 47–50.
  4. Abu-Abed, F.N. (2010). Imitatsionnoe modelirovaniye protsessov remontno-tehnicheskogo obsluzhivaniia neftianykh skvazhin. Programmnye produkty i sistemy, 4, 43.
  5. Abu-Abed, F.N., & Borisov, N.A. (2011). Formirovaniye rabochego slovaria priznakov dlia raspoznavaniia neshtatnykh situatsii v promyshlennom burenii skvazhin. Territoriia Neftegaz, 10, 16–19.
  6. Abu-Abed, F.N., & Borisov, N.A. (2011). Opredelenie neobkhodimogo nabora priznakov dlia raspoznavaniia predvariinykh situatsii v protsesse provodki skvazhin. Karotazhnik, 10, 64–68.
  7. Abu-Abed, F.N., Bykov, P.V., & Naumova, L.G. (2016) Sokrashchenie ekspluatatsionnykh zatrat v sistemakh operativnogo kontrolii i upravleniia obektami neftegazodobyvaiushchei promyshlennosti. Karotazhnik, 5 (263), 100–106.
  8. Abu-Abed, F.N. (2015) Metodika raschiota sistemy zapasov elementov i prinadlezhnosti dlia obespecheniya remonta burovых установок. Karotazhnik, 9 (255), 73–78.
- 
- 

**Абу-Абед Фарес Надимович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электронных вычислительных машин, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Россия, Тверь.

**Abu-Abed Fares Nadimovich** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Electronic Computing Machines at Tver State Technical University, Russia, Tver.

---