

DOI 10.25689/NP.2019.2.113-124

УДК 550.8.072

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ ЗАПАСОВ НЕФТИ НА ОСНОВЕ ПРОКСИ-МОДЕЛИ

¹Денисов О.В., ²Насыбуллин А.В.

¹ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина

²Альметьевский государственный нефтяной институт

THE EXPRESS METHOD FOR RESIDUAL OIL RESERVES LOCALIZATION ON THE BASIS OF PROXY MODEL

¹Denisov O.V., ²Nasybullin A.V.

¹PJSC TATNEFT

²Almetyevsk State Oil Institute

E-mail: denisovov@tatneft.ru

Аннотация. В статье представлены и обобщены результаты исследований в решении задач идентификации взаимовлияния скважин, выявления зон некомпенсированных отборов на основе анализа объемов отборов и нагнетания, косвенным результатом которых стала возможность, на основе полученных прокси-моделей, локализации остаточных запасов нефти на примере 3-го блока Березовской площади Ромашкинского месторождения. Приведены сведения об использовании нейросетевых алгоритмов и идентификации параметров систем дифференциальных уравнений материального баланса для оценки проводимостей в межскважинных интервалах, представлена блок-схема реализованной методики расчета сопротивлений на основе введенных понятий потенциала блока и сопротивлений между блоками, указаны преимущества и недостатки каждой из предложенных методик. По аналогии с физическим процессом перераспределения электростатического потенциала введено понятие потенциала блока разбиения Вороного координат забоев скважин, за потенциал принята величина отношения отбора/нагнетания к поровому объему блока за заданный период. Для идентификации сопротивлений в межскважинных интервалах решается задача минимизации суммы абсолютных значений потенциалов в соседних блоках на основе использования оптимизационного метода перекрестной энтропии. Полученное множество сопротивлений между блоками позволяет отразить сложившуюся структуру движения жидкости по пласту за исследуемый период. В

результате анализа построенных карт поля сопротивлений между блоками по участкам Березовской площади было установлено, что основные остаточные запасы сосредоточены вдоль границ изменения поля идентифицированных сопротивлений, а некомпенсированные отборы частично коррелируют с объемами остаточных запасов по блокам.

Ключевые слова: *взаимовлияние скважин, алгоритм идентификации, кросс-энтропия, прокси-модель, локализация остаточных запасов.*

Abstract. The article presents and summarizes the results of the research of solving issue of mutual well influence identification and detecting areas of the uncompensated production based on the analysis of production and injection volumes. The possibility of the residual oil reserves localization on the example of the 3rd block of Berezhovskaya area on Romashkino field, based on the obtained proxy models is the indirect result of the conducted research. The information about the neural network algorithms being used and identification of the parameters of differential mass balances system of equations for estimating conductance in the interwell intervals is included. The flowchart of the implemented method for calculating resistance based on the introduced notion of block potential and resistance between blocks is presented, advantages and disadvantages of each of the proposed methods are indicated. The notion of the potential of the Voronoi block partitioning of the well's bottom hole coordinates was introduced by analogy with the physical process of redistributing electrostatic potential; the ratio value of extraction/injection to the pore volume of the block is used as the potential. The sum of the absolute potentials in neighboring blocks minimizing issue is solved using the cross-entropy optimization method to identify resistances in the interwell intervals. The resulting set of resistances between blocks allows to reflect the existing structure of the fluid movement through the reservoir during the study period. The maps of the resistance between the blocks by sections of Berezhovskaya area has been constructed. As a result of the maps analysis it was found that the main residual reserves are concentrated along the change boundary of the identified resistance field, and uncompensated selections partially correlate with the residual reserves by blocks.

Key words: *mutual well influence, identification algorithm, cross-entropy, proxy model, residual reserves localization.*

В 2013 году, ввиду реализации стратегии компании «Татнефть» по интеллектуализации нефтяных месторождений и достигнутой высокой степени телемеханизации скважинного фонда 3-го блока Березовской площади НГДУ «Альметьевнефть», перед коллективом исследователей был поставлен ряд задач, связанных с использованием накопленных и

постоянно пополняемых объемов высокодискретных замеров режимных параметров в решении проблем процессов эксплуатации и разработки месторождений.

Для решения задачи автоматической идентификации взаимовлияния скважин был предложен запатентованный впоследствии способ анализа данных телеметрии, который основан на способности самоорганизующихся карт Кохонена [1], представляющих собой одну из разновидностей нейросетевых алгоритмов, кластеризовать сходные «по почерку» сигналы в близлежащие узлы карты [2, 3]. Задачей идентификации является нахождение наиболее схожих объектов по наборам сигналов-факторов, кластеризация их на самоорганизующейся карте Кохонена в группы по схожим признакам, выявленным путем статистической обработки результатов замеров. Чем дальше по метрике на карте одна группа отстоит от другой, тем меньше схожесть, а в проекции на технологический процесс – меньше взаимовлияние.

С целью подтверждения сходимости результатов оценки взаимовлияния использовалось решение, основанное на идентификации гидропроводностей в межскважинном пространстве на упрощенных системах дифференциальных уравнений материального баланса [4], где для рассматриваемой задачи базовым является уравнение материального баланса:

$$\beta V_i \frac{\partial p_i(t)}{\partial t} = w_{ij_1}(p_{j_1} - p_i) + w_{ij_2}(p_{j_2} - p_i) + \dots + w_{ij_n}(p_{j_n} - p_i) - q_i, \quad (1)$$

где i – номер прискважинной зоны; j_k , $k = \overline{0, n}$ – номера зон соседних с i ; β – упругоёмкость пласта (МПа^{-1}); $V_i = V * m = h * l * l * m$ – пористый объем i -ого блока пласта (м^3); h – толщина пласта (м); l – расстояние между скважинами (м); m – пористость пласта; w_{ij_n} – гидропроводность между скважинами i и j_n ($\frac{\text{м}^3}{\text{МПа} \cdot \text{сут}}$).

В конечном итоге к 2016 году на основе разработанных методик [5] была реализована аналитическая система мониторинга и управления эксплуатационным фондом скважин НГДУ «Альметьевнефть» [6].

В результате опытно-промышленного внедрения [7] системы были отмечены следующие достоинства и недостатки реализованных расчетных методик и алгоритмов:

- использование нейросетевых моделей для идентификации взаимовлияния, ввиду высокой скорости счета, позволяет производить «ковровый» расчет степени гидродинамической связи между скважинами соседками по большому фонду, но из-за отсутствия внутренней модели взаимодействия групп реагирующих скважин не позволяет производить количественную оценку с высокой степенью достоверности;
- использование упрощенных систем дифференциальных уравнений материального баланса позволяет достичь количественной оценки гидропроводностей в межскважинных интервалах, но является весьма затратной вычислительной процедурой, так как даже для небольшого фонда скважин вычислительные затраты превышают допустимые нормы для внедрения их в интерактивные автоматизированные рабочие места.

С целью преодоления выявленных недостатков при реализации методик в виде вычислительных процедур был предложен альтернативный способ оценки сопротивлений между соседними блоками разбиения Вороного в центрах которых расположены забои скважин. Для оценки сопротивлений было введено понятие потенциала блока (по аналогии с электростатическим потенциалом), в качестве которого принята величина отношения объема отбора/нагнетания по блоку к поровому объему этого блока [8], отличающийся от коэффициента промывки тем, что

коэффициент рассчитывается для накопленных объемов отборов/нагнетаний на заданном промежутке времени, для добывающих скважин имеет отрицательное значение, а для нагнетательных – положительное. Тогда, если обозначить через $\alpha_1(t_0)$, $\alpha_2(t_0)$ потенциалы двух соседних блоков в момент времени t_0 , а через $\alpha_1(t_1)$, $\alpha_2(t_1)$ потенциалы в момент времени t_1 , то обмен потенциалами, зависящий от сопротивления между блоками λ , может быть описан следующим образом:

$$\begin{aligned}\alpha_1(t_1) &= \frac{1+\lambda}{2} \cdot \alpha_1(t_0) + \frac{1-\lambda}{2} \cdot \alpha_2(t_0), \\ \alpha_2(t_1) &= \frac{1+\lambda}{2} \cdot \alpha_2(t_0) + \frac{1-\lambda}{2} \cdot \alpha_1(t_0).\end{aligned}\quad (2)$$

Из формул (2) следует, что: при отсутствии проводимости между блоками ($\lambda=1$), обмена потенциалами между блоками не происходит; при нулевом сопротивлении ($\lambda=0$) потенциалы сравниваются, для каждого из блоков будут равняться их начальной полусумме. Теперь может быть поставлена следующая оптимизационная задача. Требуется найти такие сопротивления между соседними блоками λ_{ij} , $i=1, N$ и $j=1, K_i$, где N – количество блоков, K_i – количество соседних блоков к блоку i , которые минимизируют сумму абсолютных значений потенциалов (по аналогии с электростатическим перераспределением потенциала):

$$\sum abs(\alpha_i(T)) \rightarrow min. \quad (3)$$

Потенциал в этом определении является аналогом давления – чем больше закачка в блок и меньше его пористый объем, то давление в блоке будет больше, чем больше отбор из блока и меньше его объем – тем давление будет меньше. А сам обмен потенциалами является аналогом процесса фильтрации – фильтрация идет в направлении от блока с большим давлением к блоку с меньшим.

Минимизация суммы абсолютных значений потенциалов всех блоков обеспечивает отражение следующего физического процесса: при заданных накопленных объемах отборов/нагнетания потенциалы по

блокам стремятся распределиться таким образом, чтобы обеспечить перетоки из блоков с большим потенциалом в блоки с меньшим, т.е. физический процесс перераспределения давления в пласте идет в направлении минимизации потенциальных «вершин» и «впадин» по блокам, что математически может быть записано выражением (3).

Для решения оптимизационной задачи минимизации функционала (3) использовался высокоэффективный оптимизационный метод перекрестной энтропии [9], который можно охарактеризовать следующим:

- это метод глобальной оптимизации, который очень полезен, когда оптимизируемый функционал имеет множество локальных оптимумов;
- метод может быть использован для решения непрерывных, дискретных и смешанных задач оптимизации, которые могут включать множество ограничений;
- основан на строгих математических и статистических принципах.

Предложенная вычислительная методика может быть описана следующими шагами:

1. Весь период эксплуатации наблюдаемого участка месторождения разбивается на отрезки $[t_i, t_{i+1}]$ по следующим событиям: бурение новой скважины на эксплуатируемый объект разработки, зарезка бокового ствола, бурение новой скважины на другой объект разработки (уточняется геологическое строение эксплуатируемого объекта), перевод скважины из состояния «добыча» в состояние «нагнетание» и наоборот.
2. Подсчет за каждый период накопленных объемов отборов и нагнетания по каждой скважине.

3. Построение для каждого отрезка $[t_i, t_{i+1}]$ разбиения объекта по Воронову и расчет потенциала блока в момент времени t_i .
4. Решение оптимизационной задачи минимизации суммы абсолютных значений потенциалов по группам блоков с целью идентификации сопротивлений λ_{ij} , т.е. производится поиск таких значений сопротивлений, которые доставляют минимум функционалу рассчитываемых по формулам (2) потенциалов:

$$\sum abs(\alpha_i(T)) \rightarrow min.$$

5. Построение карты распределения сопротивлений, для этого вычисленные сопротивления между блоками накладываются на середину ребра разбиения Вороного соседних блоков, между которыми рассчитано сопротивление, далее производится интерполяция значений сопротивлений по всему полю карты.

Для каждого выбранного периода T процедура может быть представлена следующей блок-схемой (Рис. 1).

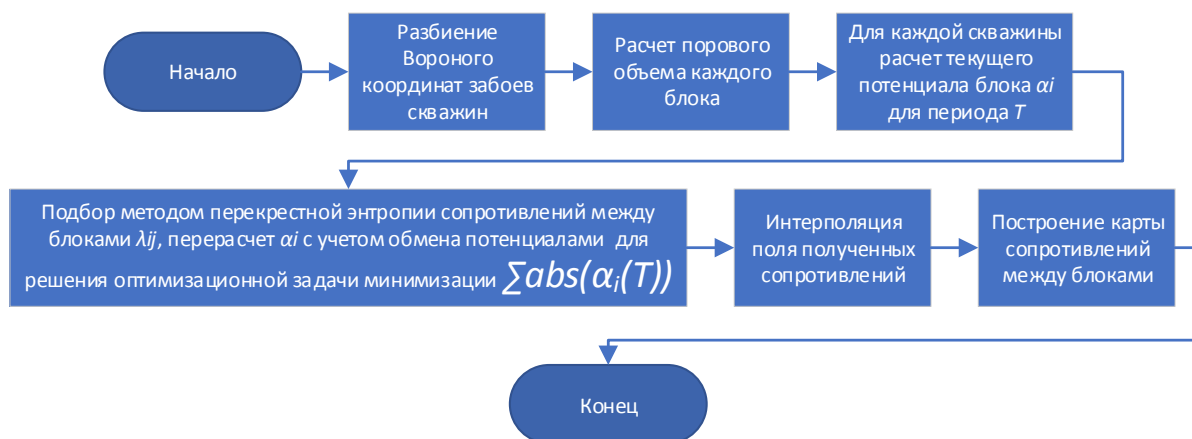
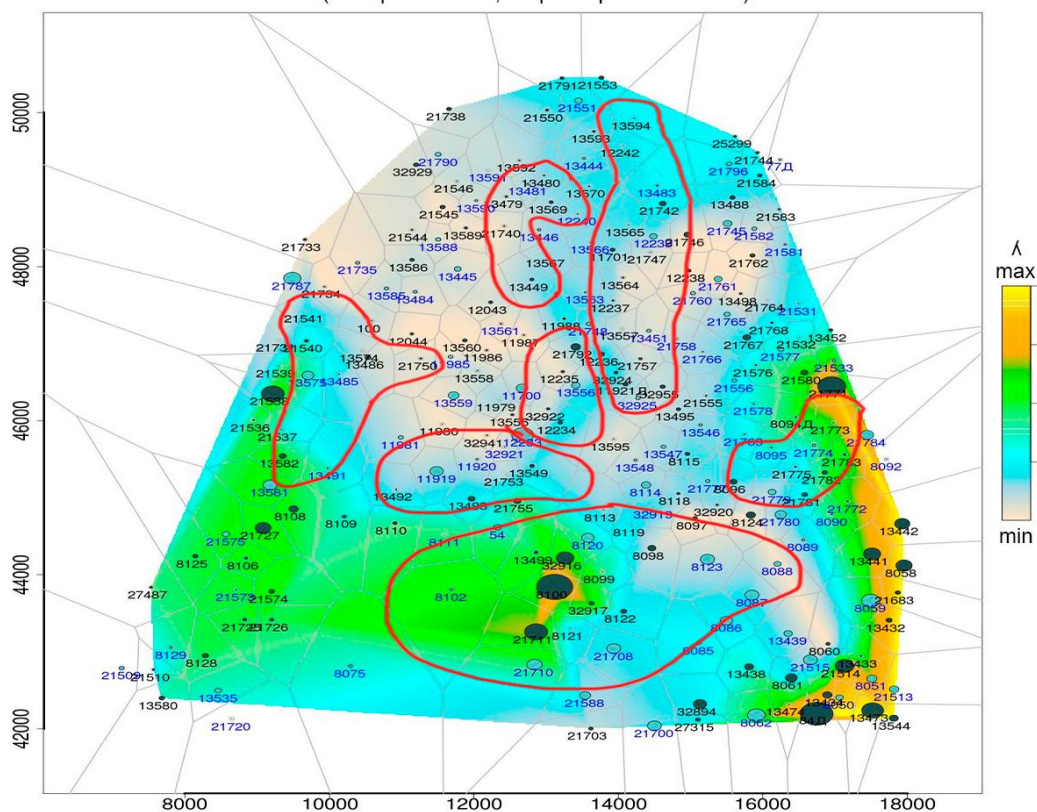


Рис. 1. Блок-схема процедуры идентификации сопротивлений

На рис. 2 представлены карта сопротивлений с расчетными объемами недокомпенсации отборов/нагнетания [8] и карта остаточных запасов.

Карта идентифицированных сопротивлений между блоками
(λ -сопротивление, безразмерная величина)



Карта остаточных извлекаемых запасов (АРМ «Лазурит»)

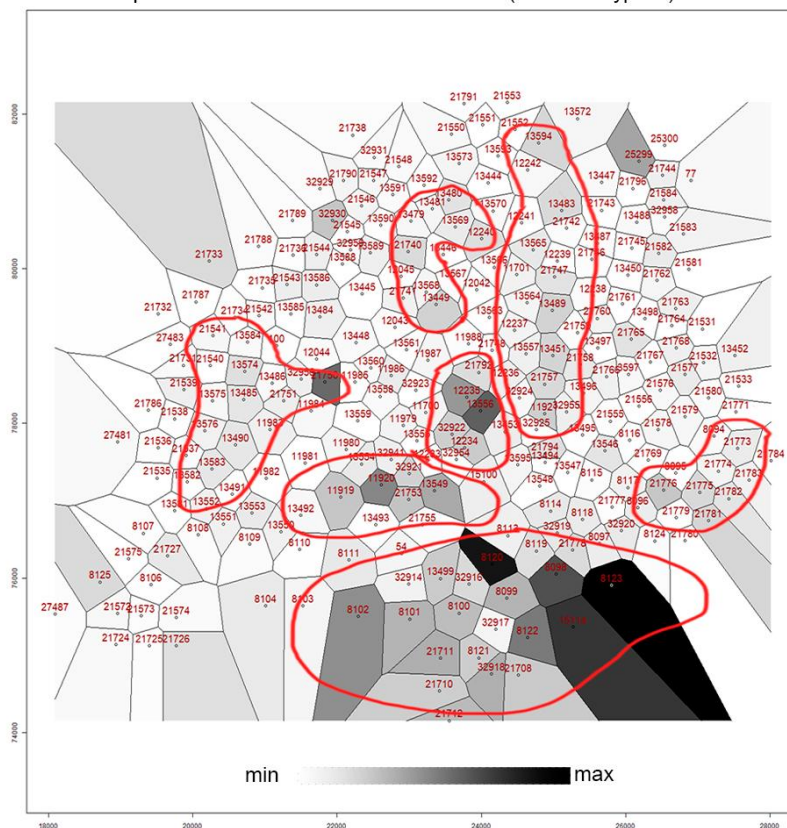


Рис. 2. Карта распределения расчетных сопротивлений между блоками и карта остаточных запасов из АРМ «Лазурит» по 3-му блоку Березовской площади

По расчетным картам был произведен сравнительный анализ с данными по остаточным запасам на различные периоды из корпоративной информационной системы «Лазурит» (автоматизированное рабочее место геолога) [10], разработанной специалистами ТатНИПИнефть, функциональные возможности которой включают: выполнение оценки начальных запасов нефти и распределение отборов и закачки по пластам, расчет структуры остаточных запасов нефти и др.

Изначально предполагалось, что остаточные запасы будут локализованы в блоках с расчетными некомпенсированными отборами, что подтвердилось лишь частично. В результате анализа расчетных карт сопротивлений и карт остаточных запасов за разные периоды было установлено, что основные остаточные запасы сосредоточены вдоль границ изменения интерполированного поля идентифицированных сопротивлений.

Выводы:

1. Предложенная методика расчета сопротивлений между блоками разбиения Вороного фонда скважин, базирующаяся на введенном понятии потенциала блока и решении оптимизационной задачи поиска минимума суммы абсолютных значений потенциалов, позволяет получить количественную оценку сопротивлений между блоками и не обладает недостатками ранее предложенных методик, основанных на нейросетевом подходе и идентификации параметров уравнений материального баланса.
2. На основе анализа полученных расчетных карт и карт остаточных запасов по 3-му блоку Березовской площади установлено, что основные остаточные запасы сосредоточены вдоль границ изменения поля идентифицированных сопротивлений.

Список литературы:

1. T. Kohonen, Self-Organizing Maps (Third Extended Edition), New York, 2001, 501 pages. ISBN 3-540-67921-9.
2. Денисов О.В. Разработка автоматизированной системы идентификации явлений интерференции и взаимовлияния скважин по данным телеметрии на основе нейросетевых алгоритмов / Денисов О.В., Желтухин В.С., Лазарева Р.Г. // Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – С. 189-191.
3. Пат. РФ №2571470. Класс G06F 17/00. Способ нейросетевого анализа данных телеметрии по фонду скважин / Беспалов А.П., Ахметзянов Р.Р., Екимцов С.А., Денисов О.В.; заявл. 24.10.2013, публ. заяв. 20.04.2015. Бюл. №12.
4. Пат. РФ №2597229. Класс G06F 17/30. Система идентификации межскважинных проводимостей. / Беспалов А.П., Ахметзянов Р.Р., Екимцов С.А., Гирфанов Р.Г., Денисов О.В., Закиев Б.Ф., Лазарева Р.Г., Калмыкова Е.Н., Кузьмина А.В.; заявл. 09.12.2014, опубл. 10.09.2016. Бюл. №25.
5. Насыбуллин А.В. Исследование интерференции скважин с использованием методов сравнительного анализа / Насыбуллин А.В., Закиев Б.Ф., Денисов О.В., Гирфанов Р.Г. // Нефтяное хозяйство. – 2015. - №5. – С. 84-87.
6. Денисов О.В. Разработка информационно-аналитической системы мониторинга и управления эксплуатационным фондом скважин НГДУ «Альметьевнефть» / О.В. Денисов, Р.Г. Гирфанов, А.В. Кузьмина // Экспозиция нефть газ. – 2016 - №5 – С. 73-77.
7. Закиев Б.Ф. Применение статистических методов анализа оперативных данных телеметрии для выработки решений по управлению закачкой в системе ППД / Закиев Б.Ф., Денисов О.В. // Инженерная практика. – 2015. - 6-7'. – С. 12-17.
8. Денисов О.В. Выявление зон недокомпенсации на основе анализа объемов отборов и нагнетания по эксплуатационному фонду скважин / О.В. Денисов, Р.Г. Гирфанов // Экспозиция нефть газ. – 2019. - №3 (70) – С. 34-36.
9. Benham T., Duan Q., Kroese D.P., Lique B. (2017) CEoptim: Cross-Entropy R package for optimization. Journal of Statistical Software, 76(8), 1-29.
10. Насыбуллин А. В. Создание и промышленное внедрение методов управления разработкой месторождений на основе методов автоматизированного проектирования / А.В. Насыбуллин, Ф.М. Латифуллин, Д.А. Разживин, Р.З. Саттаров, Р.Р. Ахметзянов, А.С. Султанов // Нефтяное хозяйство. – 2007. – № 7. – С. 88-91.

References:

1. T. Kohonen, Self-Organizing Maps (Third Extended Edition), New York, 2001, 501 pages. ISBN 3-540-67921-9.
2. Denisov O.V. *Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy identifikatsii yavlenii interferentsii i vzaimovliyaniya skvazhin po dannym telemetrii na osnove neirosetevykh algoritmov* [Development of an automated system for identifying interference phenomena and well influence using telemetry data based on neural network algorithms] / Denisov O.V., Zheltukhin V.S., Lazareva R.G. // Proceedings of the XVIII International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems. - Moscow: Publishing House of the MAI, 2013. - p. 189-191. (in Russian)

3. Pat. RUS No. 2571470. Class G06F 17/00. Method of neural network analysis of telemetry data from the well stock / Bepalov A.P., Akhmetzyanov R.R., Yekimtsov S.A., Denisov O.V.; declare 10/24/2013, publ. 04/20/2015. Bul №12.
4. Pat. RUS No. 2597229. Class G06F 17/30. Crosswell conduction identification system. / Bepalov A.P., Akhmetzyanov R.R., Yekimtsov S.A., Girfanov R.G., Denisov O.V., Zakiev B.F., Lazareva R.G., Kalmykova E.N., Kuzmina A.V.; declare 09/12/2014, publ. 09/10/2016. Bul №25.
5. Nasybullin A.V. *Issledovanie interferencii skvazhin s ispol'zovaniem metodov sravnitel'nogo analiza* [Investigation of well interference using benchmarking methods] / Nasybullin A.V., Zakiev B.F., Denisov O.V., Girfanov R.G. // Oil industry. - 2015. - №5. - p. 84-87. (in Russian)
6. Denisov O.V. *Razrabotka informacionno-analiticheskoi sistemy monitoringa i upravleniya ekspluatatsionnym fondom skvazhin NGDU «Al'met'evneft'»* [Development of an information and analytical system for monitoring and managing the operating well stock of the Almet'yevneft] / O.V. Denisov, R.G. Girfanov, A.V. Kuzmina // Exposure of oil gas. - 2016 - №5 - p. 73-77. (in Russian)
7. Zakiev B.F. *Primenenie statisticheskikh metodov analiza operativnykh dannykh telemekhaniki dlya vyrabotki reshenii po upravleniyu zakachkoi* [The use of statistical methods for analyzing the operative data of telemetry for the development of solutions for the management of injection] / Zakiev B.F., Denisov O.V. // Engineering practice. –2015. – 6-7 ' . - pp. 12-17. (in Russian)
8. Denisov O.V. *Vyyavlenie zon nedokompensatsii na osnove analiza ob'emov otborov i nagnetaniya po ekspluatatsionnomu fondu skvazhin* [Identification of undercompensation zones on the basis of analysis of volumes of withdrawals and injections in the operating well stock] / O.V. Denisov, R.G. Girfanov // Exposure of oil gas. - 2019. - №3 (70) - p. 34-36. (in Russian)
9. Benham T., Duan Q., Kroese D.P., Lique B. (2017) CEoptim: Cross-Entropy R package for optimization. Journal of Statistical Software, 76 (8), 1-29.
10. Nasybullin A.V. *Sozdanie i promyshlennoe vnedrenie metodov upravleniya razrabotkoĭ mestorozhdeniĭ na osnove metodov avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Development and commercialization of CAD-based reservoir management methods]. A.V. Nasybullin, F.M. Latifullin, D.A. Razzhivin, R.Z. Sattarov, R.R. Ahmetzyanov, A.S. Sultanov. Neftyanoye Khozyaistvo, No. 7, 2007, pp. 88-91. (in Russian)

Сведения об авторах

Денисов Олег Владимирович, заместитель начальника отдела экспертизы и методологического обеспечения бизнес задач центра информационных технологий, Центр обслуживания бизнеса, ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина, г. Альметьевск, Республика Татарстан, Российская Федерация
E-mail: denisovov@tatneft.ru

Насыбуллин Арслан Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Республика Татарстан, Российская Федерация
E-mail: arslan@tatnpi.ru

Authors

Denisov O.V., Deputy Head of Expert Evaluation and Methodological Support of Business Tasks Dpt., IT Centre, Business Service Center, PJSC TATNEFT, Almeteyevsk, Republic of Tatarstan, Russian Federation
E-mail: denisovov@tatneft.ru

Nasybullin A.V., Dr.Sc., Professor, Head of the Department for Development and Operation of Oil and Gas Fields, Almeteyevsk State Oil Institute, Almeteyevsk, Republic of Tatarstan, Russian Federation
E-mail: arslan@tatnpi.ru

Денисов Олег Владимирович
423250, Российская Федерация, Республика Татарстан
г. Лениногорск, ул. Булгакова, д.3
Тел. +7 987 227 22 23
E-mail: denisovov@tatneft.ru