

Нейросетевое моделирование и оптимизация эксплуатационных параметров теплового воздействия на битуминозный пласт

А.Р. Мухутдинов, М.Г. Ефимов✉, Ю.В. Яковлева

Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Российская Федерация

✉jero07@bk.ru

Резюме

Известно, что извлечение запасов нефти из битуминозных песчаников с помощью открытых горных выработок из-за большой глубины залегания продуктивного пласта является нерентабельным. Поэтому особое внимание уделяется разработке способов внутрипластовой добычи нефти из битуминозных песчаников. Одним из перспективных способов является прогрев пласта в «нагнетательной» скважине до температуры самовоспламенения нефти. За счет химической реакции взаимодействия окислителя с горючим в сгораемых материалах поддерживается фронт горения и осуществляется продвижение и последующее извлечение нефти через эксплуатационную скважину. При этом воздействие на пласт может проходить при различных эксплуатационных параметрах технологии влияния смазочных материалов. На сегодняшний день один из наиболее эффективных методов изучения сложных систем – компьютерное математическое моделирование. Поэтому перспективным способом решения трудных задач является использование универсальных вычислительных возможностей современных программных средств, основывающихся на искусственных нейронных сетях, обладающих широчайшими возможностями. Они позволяют, исходя из одного только эмпирического опыта, строить нейросетевые модели, которые способствуют извлечению знаний из данных и выявлять ранее неизвестные закономерности, а также использовать их для решения конкретных практических задач. В данной работе с использованием современных компьютерных технологий разработан прикладной программный модуль, позволяющий на основе разработанного алгоритма с использованием нейросетевой модели определить оптимальные эксплуатационные параметры тепловой технологии воздействия на битуминозный пласт.

Ключевые слова

нейросетевая модель, битуминозный пласт, сгораемый материал, программный модуль, база знаний, современные информационные технологии

Для цитирования

Мухутдинов А.Р. Нейросетевое моделирование и оптимизация эксплуатационных параметров теплового воздействия на битуминозный пласт / А.Р. Мухутдинов, М.Г. Ефимов, Ю.В. Яковлева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 176–184. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).176-184.

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.05.2023 г.; поступила после рецензирования: 06.06.2023 г.; принята к публикации: 07.06.2023 г.

Neural network modeling and optimization of operational parameters for thermal impact on a bituminous reservoir

A.R. Mukhutdinov, M.G. Efimov✉, Yu.V. Yakovleva

Kazan National Research Technological University, Kazan, the Russian Federation

✉jero07@bk.ru

Abstract

It is known that the extraction of oil reserves from bituminous sandstones using open-pit mine workings is unprofitable due to the large depth of the productive formation. Therefore, special attention is paid to the development of methods for in-situ oil production from tar sands. One of the promising methods of in-situ production of bituminous oil is the heating of the reservoir in the «injection» well to the temperature of oil self-ignition. Due to the chemical reaction of the interaction of the oxidizer with the fuel in combustible materials, the combustion front is maintained and the advancement and subsequent extraction of oil through the production well is carried out. In this case, the stimulation of the formation can take place at various operational parameters of the lubricants influence technology. To date, one of the most effective methods for studying complex systems is computer mathematical modeling. Therefore, a promising way to solve difficult problems is to use the universal computing potentialities of modern software tools based on artificial neural networks, which have the widest capabilities. They allow, based on empirical experience alone, to build neural network models that help extract knowledge from data and identify previously unknown patterns, as well as use them to solve specific practical problems. In this work, using modern computer technologies, an application software module has been developed that allows, based on the developed algorithm using a neural network model, to determine the optimal operating parameters of the thermal technology for influencing a bituminous reservoir.

Keywords

neural network model, bituminous reservoir, combustible material, software module, knowledge base, modern information technologies

For citation

Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Yakovleva Yu.V. Neurosetevoe modelirovanie i optimizatsiya ekspluatatsionnykh parametrov teplovogo vozdeistviya na bituminoznyi plast [Neural network modeling and optimization of operational parameters for thermal impact on a bituminous reservoir]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 176–174. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).176-184.

Article info

Received: May 12, 2023; Revised: June 6, 2023; Accepted: June 7, 2023.

Введение

В настоящий момент особое внимание уделяется разработке способов внутрипластовой добычи нефти из битуминозных песчаников [1–5]. Одним из перспективных способов внутрипластовой добычи битуминозной нефти является прогрев пласта в «нагнетательной» скважине до температуры самовоспламенения нефти [5]. За счет химической реакции взаимодействия окислителя с горючим в сгораемых материалах (СМ) поддерживается фронт горения и осуществляется продвижение и последующее извлечение нефти через эксплуатационную скважину. При этом воздействие на пласт может проходить при различных эксплуатационных параметрах, таких как масса заряда СМ, расстояние породы от заряда СМ, интервал

времени ввода зарядов СМ и т.д. [6–17]. Так, в Казанском национальном исследовательском технологическом университете на кафедре технологии твердых химических веществ много лет проводятся комплексные исследования и накоплены экспериментальные данные, которые можно применить для определения оптимальных показателей тепловой технологии, позволяющих влиять на агрегатное состояние битуминозного пласта за счет повышения эффективности его нагрева [7]. Для проведения испытаний был изготовлен специальный лабораторный стенд, схема которого представлена на рис. 1.

Стенд состоит из стального сосуда с теплоизоляцией 4, в котором располагаются исследуемые образцы монолитной битуминозной породы 3, окруженные насыпным битуминоз-

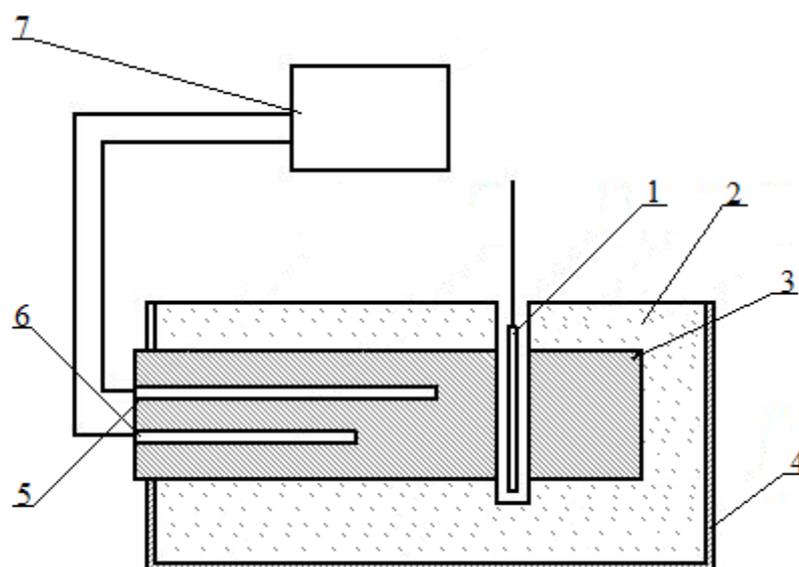


Рис. 1. Стенд для изучения нагрева битуминозной породы:

1 – заряд сгораемых материалов; 2 – насыпной битуминозный грунт; 3 – монолитная битуминозная порода; 4 – теплоизоляция асбестовая; 5 – первая термопара; 6 – вторая термопара; 7 – электронный потенциометр ЭПП-09

Fig. 1. Stand for studying the heating of bituminous rock:

1 – combustible materials charge; 2 – bulk bituminous soil; 3 – monolithic bituminous rock; 4 – asbestos thermal insulation; 5 – first thermocouple; 6 – second thermocouple; 7 – electronic potentiometer EPP-09

ным грунтом 2. В пространство между образцами монолитной породы, имитирующего скважину шириной 35 мм, последовательно вводились заряды СМ для испытаний 1. Измерения температуры нагрева битуминозной породы проводились термопарами 5, 6, установленными на различных расстояниях от сжигаемого заряда СМ. Непосредственная запись значений температур осуществлялась через определенные промежутки времени трехточечным электронным потенциометром ЭПП-09 7.

Общий вид изделия для прогрева породы в лабораторных условиях на рис. 2.

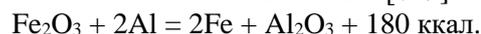
Корпус изготовлен из листового материала марки АДМ толщиной 1 мм. Крышка, закрывающая корпус, имеет гнездо под электровоспламенитель марки МБ-2Н. Крепление крышки к корпусу и электровоспламенителя в гнездо осуществляется с помощью эпоксидного клея.

Электровоспламенитель МБ-2Н приводится в действие от электрического тока напряжением, которое может находиться в пределах 12–27 В. Под действием электрического импульса происходит срабатывание электровоспламенителя МБ-2Н, в свободном объеме узла запала создается избыточное давление, обеспечивающее воспламенение воспламенительного состава.

Объектом в данной работе является энергонасыщенный материал на основе термита для инициирования внутрипластового горения.

Термит представляет собой механическую смесь алюминиевого порошка (ГОСТ 5494-95) и железных окислов (ГОСТ 4173-77), при зажигании которых происходит восстановление металла из окислов с выделением при

этом значительного количества тепла [6–9]:



В состав термита входят порошок алюминиевый – 20 %; оксид железа – 71,7 %; обсечка – 8,3 %.

Характерными особенностями, отличающими процесс горения термитов от горения других составов, являются:

– отсутствие при реакции горения газообразных продуктов реакции, что обуславливает беспламенность горения;

– высокая температура реакции горения (2 000–2 800°C);

– образование при горении огненно-жидких шлаков.

Температура самовоспламенения всех алюминиевых термитов выше 800°C, а температура самовоспламенения железоалюминиевого термита составляет 1 300°C. Порошкообразный железоалюминиевый термит имеет гравиметрическую плотность $\rho_0 = 1,8\text{--}2 \text{ г/см}^3$. Спрессованный (с добавкой нескольких процентов цементатора) $\rho = 3\text{--}3,4 \text{ г/см}^3$.

Образцы термита, обычного измельчения без запрессовки, массой 1 кг сгорают за 15–20 с; те же образцы, но спрессованные под давлением 200 кг/см² – за 35–50 с.

Технологический процесс изготовления состава в лабораторных условиях заключается в механическом смешении компонентов и состоит из двух фаз:

1. Фаза подготовки компонентов: сушка; просейка; взятие навесок.

2. Фаза смешения компонентов:

2.1. Подготовка железоалюминиевого термита: железоалюминиевый термит сушат в

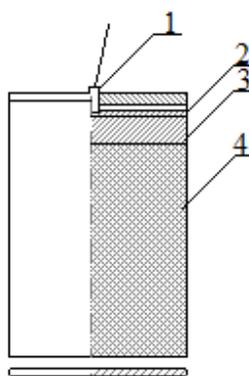


Рис. 2. Общий вид изделия для прогрева породы:

1 – электровоспламенитель МБ-2Н; 2 – воспламенительный состав; 3 – переходной состав; 4 – основной состав

Fig. 2. General view of the product for heating the rock:

1 – electric igniter MB-2N; 2 – igniter composition; 3 – transition composition; 4 – main composition

сушильном шкафу при температуре 105–110°C в течение 5–6 ч, просеивают через сито любого вида с латунной сеткой № 2–2,8 ГОСТ 3826-47. Навески берут на технических весах с точностью $\pm 0,1$ г.

2.2. Подготовка азотнокислого бария, $Ba(NO_3)_2$: нитрат бария сушат в сушильном шкафу при температуре 80–85°C в течение 5–6 ч. Затем просеивают через сито любого вида с латунной сеткой № 25 ГОСТ 3826-47. Навески берут на технических весах с точностью $\pm 0,1$ г.

2.3. Подготовка горючей связки: смоле ЭД-5, предварительно разогретую в термошкафу до температуры 50–60°C, отweighивают в емкость для горючей связки. Затем к эпоксидной смоле ЭД-5 добавляют отвердитель (полиэтиленполиамин) в количестве 10 % к взятой навеске и тщательно перемешивают вручную шпателем или стеклянной палочкой до получения однородной массы.

2.4. Подготовка полиэфира НПС-609 и силиконового каучука СКТН аналогична подготовке эпоксидной смолы ЭД-5.

Смешение компонентов осуществляют вручную под вытяжным шкафом. Сначала смешивают горячую связку с азотнокислым барием, а затем с термитом до получения однородной массы и полного исчезновения пыли твердых компонентов. Продолжительность смешения массы до 1 кг составляет около 5 мин., до 10 кг – 15–20 мин. Экспериментально найдено [1], что оптимальным соотношением компонентов обладает основной состав: железозалюминиевый термит – 67 %, эпоксидная смола – 5 %, азотнокислый барий – 28 %.

Одним из наиболее прогрессивных методов изучения сложных систем является компьютерное математическое моделирование. Поэтому перспективным способом решения таких задач является использование универсальных вычислительных возможностей современных программных средств, основывающихся на искусственных нейронных сетях (ИНС), обладающих широчайшими возможностями моделирования таких систем. Они позволяют, исходя из одного только эмпирического опыта, строить нейросетевые модели, которые способствуют извлечению знаний из данных и позволяют выявлять ранее неизвестные и никогда не исследованные зависимости и закономерности, активно использовать их для решения конкретных практических задач. Поэтому изучение

возможности использования компьютерного моделирования процесса горения разработанного сгораемого материала на основе современных информационных технологий для извлечения новых знаний является актуальной задачей, имеющей практический интерес.

В данной работе рассматривается возможность перспективного использования универсальных вычислительных возможностей программных средств на основе нейросетей для аппроксимирования функций, полученных по экспериментальным данным. В работе использовалась программа NeuroShell.

NeuroShell – это универсальный пакет, предназначенный для нейросетевого анализа данных. С его помощью можно решать широкий спектр задач, начиная с самых распространенных.

Основными преимуществами NeuroShell при создании исполняемых модулей по сравнению с аналогичными средами разработок являются:

- простота в обращении за счет жесткой последовательности действий по созданию и обучению ИНС;
- простота формирования обучающей выборки;
- возможность отображать и контролировать многие параметры;
- создавать собственные архитектуры ИНС;
- выявлять наиболее значимые входные параметры;
- быстрота разработки программного модуля;
- высокая производительность разработанного программного модуля;
- наращиваемость за счет встраивания новых компонентов и инструментов в среду NeuroShell;
- удачная проработка иерархии объектов;
- низкие требования разработанного программного модуля к ресурсам компьютера.

Применение данного программного продукта возможно в тех областях, где нейронные сети традиционно и с успехом применяются, а именно, в медицине, экологии / климатологии / метеорологии, при построении моделей технических объектов и их идентификации, в экономике (прогнозирование курсов валют, акций и т.д.) и вообще для решения любой задачи классификации или прогноза. Кроме того, он позво-

ляет решать задачи при наличии выборки данных с требуемой точностью, которую не позволяли ранее достичь традиционные математические методы (регрессионный анализ, непараметрическая статистика и др.). Поскольку на основе одной таблицы данных может быть получено несколько полуэмпирических теорий (несколько нейронных сетей минимальной структуры, правильно решающих одну и ту же задачу), то возможно решение некоторых задач когнитологии и планирования оптимизируемого эксперимента.

Именно нейросетевая обработка данных в настоящее время и сформировала новую волну в развитии искусственного интеллекта. Работы по вербализации структуры нейронных сетей приближают нейросетевое направление искусственного интеллекта к классическим экспертным системам, делая возможным понимание и объяснение процесса принятия решения нейронной сетью.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Нахождение оптимальных эксплуатационных параметров тепловой технологии воздействия на битуминозный пласт осуществлялось с помощью ИНС, созданной универсальным вычислительным экспресс-методом [18] по базе знаний (табл.) из экспериментальных данных комплексных исследований с учетом управления входными характеристиками, позволяющими при горении влиять на агрегатное состояние битуминозного пласта [6–17]. База знаний создавалась в среде MS Excel, где вход-

ными характеристиками являлись: время нагрева x_1 ; количество зарядов x_2 ; общее время горения x_3 , мин.; интервал ввода зарядов x_4 ; расстояние от источника нагрева x_5 . Выходным параметром является температура нагрева битуминозного пласта y . Этот параметр зависит от входных данных x_1 – x_5 .

С помощью отработанного экспресс-метода выбрана архитектура ИНС (рис. 3): нейронная сеть с общей регрессией, общее число блоков – три, в соответствии с количеством входных и выходных данных, количество нейронов в первом слое – пять, в последнем – один.

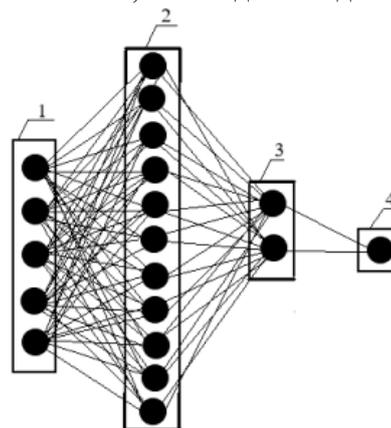


Рис. 3. Схема искусственной нейронной сети, включающая блоки:

1 – входной; 2 – слой шаблонов;
3 – слой суммирования; 4 – выходной

Fig. 3. Scheme of an artificial neural network, including blocks:

1 – input; 2 – template layer; 3 – summation layer;
4 – output

База знаний

№ опыта Number of experiment	Время нагрева, мин. Heating time, min.	Количество зарядов, шт. Number of charges, PCS	Общее вре- мя горения, мин. Total burning time, min.	Интервал ввода заря- дов, мин. Input interval, min.	Расстояние от источни- ка нагрева, мм Distance from the heating source, mm	Температура нагрева битуминозного пласта, °С Bituminous formation heating temperature, °С
	Входные характеристики Input characteristics					Выходные параметры Output parameters
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
1	31,5	6	6,8	1	20	170
2	62,58	6	6,8	1	55	82
3	88,2	6	6,8	1	20	76
4	5,04	5	5,2	1	20	260
...
11	122,4	4	13,2	4	100	72

Далее база знаний импортировалась в программную среду разработки NeuroShell, происходило обучение и тестирование нейронной сети. После тестирования оптимизированная сеть показала относительную ошибку – 5,56 %. Разработанная нейросетевая модель учитывает влияние всех входных параметров. Достоинством данной среды разработки является возможность вычисления показателей значимости входных параметров. Наибольшее влияние на температуру нагрева битуминозного

пласта оказывает расстояние породы от источника нагрева.

С использованием современных информационных технологий в среде разработки на основе полученного алгоритма (рис. 4) и нейросетевой модели создан прикладной программный модуль, позволяющий определить оптимальные эксплуатационные параметры тепловой технологии воздействия на битуминозный пласт.

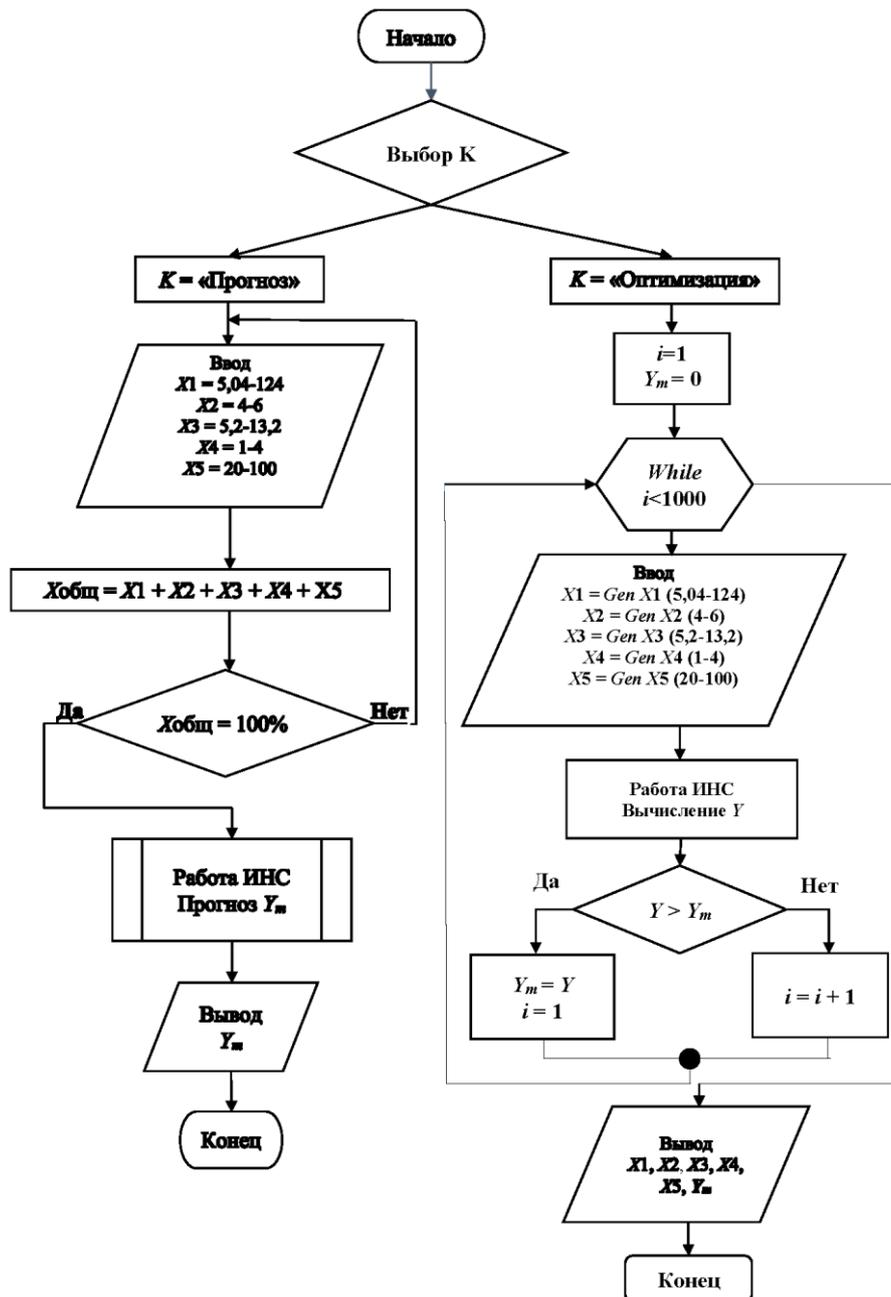


Рис. 4. Блок-схема алгоритма программы
Fig. 4. Block diagram of the program algorithm

Параметр	Значение	Единица измерения
Время нагрева (5,04...124)	5,39	Мин
Количество зарядов (4-6)	4,03	Шт
Общее время горения (5,2...13,2)	6,26	Мин
Интервалы ввода (1...4)	2,32	Мин
Расстояние от источника (20...100)	20,07	мм

Y 259,957 °C

Кнопки: Прогноз, Оптимизация

Рис. 5. Окно определения оптимальных значений

Fig. 5. Window for determining optimal values

Интерфейс программы (см. рис. 4) представляет собой главное окно, в котором находятся поля для ввода входных параметров (пять полей) и поле для вывода результата – значения выходного параметра. Нажатие кнопки «Оптимизация» позволяет определить оптимальные значения входных данных, проходит по следующему алгоритму:

1. В начале каждого цикла программа проводит генерацию значений входных параметров.

2. Выбранные значения обрабатываются нейронной сетью, прогнозируется величина температуры нагрева битуминозного пласта, которая сравнивается с максимальным значением температуры нагрева битуминозного пласта (на первом цикле оно равно нулю).

3. Цикл продолжается пока программа автоматически не переберет все возможные варианты соотношения компонентов в заданном диапазоне.

Результатом стало максимальное значение температуры нагрева битуминозного пласта – 259,96 °C, которое обеспечивается следующими эксплуатационными характеристиками:

время нагрева – 5,39 мин.; количество зарядов – 4 шт.; общее время горения – 6,26 мин.; интервал ввода зарядов – 2,32 мин.; расстояние от источника нагрева – 20 мм.

Относительная ошибка прогноза модуля составила 5,56 %, т.е. не превышает ошибок нейросетевых моделей, что свидетельствует об исправности работы программного модуля.

На основе анализа структурированной информации разработана база знаний, создана и продемонстрирована ИНС, способная определить оптимальные входные характеристики тепловой технологии для максимального нагрева битуминозного пласта.

Заключение

Разработана база знаний для создания ИНС с целью нахождения оптимальных эксплуатационных параметров теплового воздействия на битуминозный пласт.

Разработан прикладной программный модуль на основе ИНС, способный найти оптимальные эксплуатационные параметры, обеспечивающие максимальную температуру нагрева битуминозного пласта.

Список литературы

1. Каюкова Г.П., Петров С.М., Успенский Б.В. Свойства тяжелых нефтей и битумов пермских отложений Татарстана в природных и техногенных процессах. М. : ГЕОС, 2015. 341 с.
2. Щепалов А.А. Тяжелые нефти, газовые гидраты и другие перспективные источники углеводородного сырья. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. 93 с.

3. Высоковязкая нефть – новые технологии разработки // Neftegaz.RU : сайт. URL: <https://neftegaz.ru/science/booty/331724-vysokovyazkaya-neft-novye-tehnologii-razrabotki-chast-2/> (Дата обращения 2.05.2023).
4. Николин И.В. Методы разработки тяжелых нефтей и природных битумов // Наука – фундамент решения технологических проблем развития России : сб. ст. II Всерос. семинара. Казань, 2007. С. 54–68.
5. Коноплев Ю.П., Гуляев В.Э. Внедрение методов термощахтной разработки на Ярегском месторождении высоковязкой нефти // Нефтяное хозяйство. 2011. № 2. С. 89–91.
6. Оптимизация процесса «холодной» добычи тяжелой нефти вместе с песком / P.M. Collins, M.B. Dusseault, D. Dorscher et al. // Нефтегазовые технологии. 2009. № 1. С. 36–45.
7. Поисковые исследования по созданию изделий для прогрева битуминозного пласта : отчет о НИР / В.М. Бочков, И.Ф. Садыков, Г.И. Шешуков и др. Казань : КХТИ им. С.М. Кирова, 1970. С. 6–24.
8. Дияшев Р.Н. Новые возможности щелочного заводнения и внутрипластового горения для разработки залежей вязких, высоковязких и тяжелых нефтей (по данным зарубежных публикаций) // Нефтяное хозяйство. 2009. № 9. С. 102–106.
9. Шейман А.Б., Малофеев Г.Е., Сергеев А.И. Воздействие на пласт теплом при добыче нефти. М. : Недра, 1969. 256 с.
10. Симкин Э.М., Сергеев А.И., Шейман А.Б. Экспериментальные исследования рабочих процессов глубинного электродного нагревания // Нефтяное хозяйство. 1967. № 6. URL: https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=5407&art=103049. Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.
11. Кудинов В.И. Новые технологии повышения нефтеотдачи на месторождениях с высоковязкими нефтями // Нефтяное хозяйство. 2002. №5. С. 92–95.
12. In situ stress field in the Athabasca oil sands deposits: Field measurement, stress-field modeling, and engineering implications / J.G. Liu, B. Xu, L. Sun et al. // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 215. Part B. DOI 10.1016/j.petrol.2022.110671.
13. Разработка изделий для прогрева битуминозного пласта : отчет о НИР / рук. В.М. Бочков, И.Ф. Садыков ; отв. исп.: Г.И. Шешуков, Г.П. Фролов ; исп. И.М. Сабитов, И.А. Гайнутдинов. Казань : Казанский химико-технологический институт 1972. 8–10 с.
14. Бочков В.М., Садыков И.Ф. Разработка термических и динамических способов извлечения битуминозной нефти : отчет о НИР. Казань : КХТИ им. С.М. Кирова, 1974.
15. Разработка термических и взрывных способов извлечения битуминозной нефти : отчет о НИР. / Рук. В.М. Бочков, И.Ф. Садыков ; отв. исп. Г.И. Шешуков, Г.П. Фролов ; исп. И.М. Сабитов, И.А. Гайнутдинов. Казань : Казанский химико-технологический институт, 1975. 5 с.
16. Бочков В.М., Садыков И.Ф., Создание и усовершенствование химических прогревателей и веществ для поджога пласта : отчет о НИР. Казань : КХТИ им. С.М. Кирова, 1976.
17. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г., Вахидова З.Р. Нейросетевое моделирование процесса нагрева битуминозного пласта и исследование влияния различных факторов // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2022. № 9 (590). С. 13–17.
18. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г. Универсальные вычислительные экспресс-методы для создания искусственной нейронной сети сложного объекта и инновационного программного модуля на ее основе. Казань : КНИТУ, 2022. 161 с.

References

1. Kayukova G.P., Petrov S.M., Uspenskii B.V. Svoistva tyazhelykh neftei i bitumov permskikh otlozhenii Tatarstana v prirodnykh i tekhnogennykh protsessakh [Properties of heavy oils and bitumen of Permian deposits of Tatarstan in natural and man-made processes]. Moscow : GEOS Publ., 2015. 341 p.
2. Shchepalov A.A. Tyazhelye nefti, gazovye gidraty i drugie perspektivnye istochniki uglevodorodnogo syr'ya [Heavy oils, gas hydrates and other promising sources of hydrocarbon raw materials]. Nizhnii Novgorod : NNGU Publ., 2012. 93 p.
3. Vysokovyazkaya nefť – novye tekhnologii razrabotki (elektronnyi resurs) [High-viscosity oil – new development technologies (electronic resource)]. Available at: <https://neftegaz.ru/science/booty/331724-vysokovyazkaya-neft-novye-tehnologii-razrabotki-chast-2/> (Accessed May 2, 2023).
4. Nikolin I.V. Metody razrabotki tyazhelykh neftei i prirodnykh bitumov [Methods of development of heavy oils and natural bitumen]. *Sbornik statei II Vserossiiskogo seminara «Nauka – fundament resheniya tekhnologicheskikh problem razvitiya Rossii»* [Proceedings of the II All-Russian seminar «Science – the foundation for solving technological problems of development of Russia»]. Kazan', 2007, pp. 54–68.
5. Konoplev Yu.P., Gulyaev V.E. Vnedrenie metodov termoshakhtnoi razrabotki na Yaregskom mestorozhdenii vysokovyazkoi nefti [Introduction of methods of thermoshack development at the Yareg deposit of high-viscosity oil]. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil industry], 2011, no. 2, pp. 89–91.
6. Collins P.M., Dusseault M.B., Dorscher D., Kueber E. Optimizatsiya protsessy «kholodnoi» dobychi tyazheloi nefti vmeste s peskom [Optimization of the process of «cold» production of heavy oil together with sand]. *Neftegazovye tekhnologii* [Oil and gas technologies], 2009, no. 1, pp. 36–45.
7. Bochkov V.M., Sadykov I.F. Poiskovye issledovaniya po sozdaniyu izdelii dlya progreva bituminoznogo plasta (Otchet o NIR) [Exploratory research on the creation of products for heating bituminous formation (Research report)]. Kazan': Kazan Institute of Chemical Technology named after S.M. Kirov, 1970, pp. 6–24.
8. Diyashev R.N. Noveye vozmozhnosti shchelochnogo zavodneniya i vnutriplastovogo goreniya dlya razrabotki zalezhei vyazkikh, vysoko-vyazkikh i tyazhelykh neftei (po dannym zarubezhnykh publikatsii) [New possibilities of alkaline flooding and

intra-formation burning for the development of deposits of viscous, highly viscous and heavy oils (according to foreign publications)]. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil industry], 2009, no. 9, pp. 102–106.

9. Sheiman A.B., Malofeev G.E., Sergeev A.I. Vozdeistvie na plast teplom pri dobyche nefi [The effect of heat on the reservoir during oil production]. Moscow: Nedra Publ., 1969. 256 p.

10. Simkin E.M., Sergeev A.I., Sheiman A.B. Eksperimental'nye issledovaniya rabochikh protsessov glubinnogo elektrod-nogo nagrevaniya [Experimental studies of working processes of deep electrode heating]. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil industry], 1967, no. 6.

11. Kudinov V.I. Novye tekhnologii povysheniya nefteotdachi na mestorozhdeniyakh s vysokovyazkimi neftyami [New technologies of enhanced oil recovery at fields with high-viscosity oils]. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil industry], 2002, no. 5, pp. 92–95.

12. Liu J.G., Xu B., Sun L., Li B., Wei G.J. In situ stress field in the Athabasca oil sands deposits: Field measurement, stress-field modeling, and engineering implications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 215, part B. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110671.

13. Bochkov V.M., Sadykov I.F. Razrabotka izdelii dlya progrevva bituminoznogo plasta (Otchet o NIR) [Development of products for heating the bituminous formation (Research report)]. Kazan': Kazan Institute of Chemical Technology named after S.M. Kirov, 1972, pp. 8–10.

14. Bochkov V.M., Sadykov I.F. Razrabotka termicheskikh i dinamicheskikh sposobov izvlecheniya bituminoznoi nefi (Otchet o NIR) [Development of thermal and dynamic methods of extraction of bituminous oil (Research report)]. Kazan': Kazan Institute of Chemical Technology named after S.M. Kirov, 1974.

15. Bochkov V.M., Sadykov I.F. Razrabotka termicheskikh i vzryvnykh sposobov izvlecheniya bituminoznoi nefi (Otchet o NIR) [Development of thermal and explosive methods of extraction of bituminous oil (Research report)]. Kazan': Kazan Institute of Chemical Technology named after S.M. Kirov, 1975, pp. 3–5.

16. Bochkov V.M., Sadykov I.F. Sozdanie i usovershenstvovanie khimicheskikh progrevatelei i veshchestv dlya podzhoga plasta (Otchet o NIR) [Creation and improvement of chemical heaters and substances for igniting the formation (Research report)]. Kazan': Kazan Institute of Chemical Technology named after S.M. Kirov, 1976.

17. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Vakhidova Z.R. Neirosetevoe modelirovanie protsessa nagreva bituminoznogo plasta i issledovanie vliyaniya razlichnykh faktorov [Neural network modeling of the bituminous formation heating process and investigation of the influence of various factors]. *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK* [Automation and informatization of the Fuel and energy complex], 2022, no. 9 (590), pp. 13–17.

18. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G. Universal'nye vychislitel'nye ekspress-metody dlya sozdaniya iskusstvennoi neironnoi seti slozhnogo ob'ekta i innovatsionnogo programmnoogo modulya na ee osnove [Universal computational express methods for creating an artificial neural network of a complex object and an innovative software module based on it]. Kazan': KNITU Publ., 2022. 161 p.

Информация об авторах

Мухутдинов Аглям Рашидович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; e-mail: muhutdinov@rambler.ru.

Ефимов Максим Геннадьевич, ассистент кафедры технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; e-mail: jero07@bk.ru.

Яковлева Юлия Владимировна, кафедра технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; e-mail: ju.yayakovleva@yandex.ru.

Information about the authors

Aglyam R. Mukhutdinov, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the department of Technology of Solid Chemicals, Kazan National Research Technological University, Kazan'; e-mail: muhutdinov@rambler.ru.

Maksim G. Efimov, Assistant of the department of Technology of Solid Chemicals, Kazan National Research Technological University, Kazan'; e-mail: jero07@bk.ru.

Yuliya V. Yakovleva, Department of Technology of Solid Chemicals, Kazan National Research Technological University, Kazan'; e-mail: ju.yayakovleva@yandex.ru.