

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

PREDICTING THE STABILITY OF WATER-IN-OIL EMULSIONS BASED ON FUZZY LOGIC METHODS

**О. Kochueva
V. Itkin**

Summary. The dependence of the stability of water-in-oil emulsions on various factors was investigated. In the research [6], a stability index is introduced, and various mathematical models are proposed for its prediction. Our study provides the examination of the shortcomings of these models and offers two more reliable methods for predicting the emulsion stability index: based on the regression analysis and based on the fuzzy logic methods.

Keywords: water-in-oil emulsions, stability index, regression analysis, fuzzy logic, neuro fuzzy systems.

Кочуева Ольга Николаевна

*К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И. М. Губкина
olgakoch@mail.ru*

Иткин Виктор Юрьевич

*К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И. М. Губкина
itkin.v@gubkin.ru*

Аннотация. Исследуется зависимость стабильности водонефтяных эмульсий от различных факторов. В работе [6] вводится индекс стабильности и предлагаются различные математические модели для его прогнозирования. В нашей статье мы исследуем недостатки этих моделей и предлагаем два более надежных метода для прогнозирования индекса стабильности эмульсий: на основе регрессионного анализа и на основе методов нечеткой логики.

Ключевые слова: водонефтяная эмульсия, индекс стабильности, регрессионный анализ, нечеткая логика, нейро-нечеткие сети.

Изучение свойств нефтяных, топливных и битумных эмульсий важно для совершенствования многих технологических процессов добычи, переработки и утилизации нефти и нефтепродуктов. Математические модели для прогнозирования стабильности водонефтяных эмульсий еще недостаточно разработаны исследователями.

Образование водонефтяных эмульсий происходит под влиянием различных факторов [1,2,3]. Добываемая сырая нефть обычно содержит значительные примеси воды, и первичный продукт представляет собой водонефтяную эмульсию. Водонефтяные эмульсии могут образовываться при нагнетании воды в пласт (по разным источникам более 80% пластов подвергаются заводнению). Причем, эмульсия может образоваться не только в призабойной зоне, но и на некотором отдалении от нее, определяемом зоной проникновения воды в пласт. Образование в пористой среде стойких водонефтяных эмульсий является одной из основных причин снижения естественной проницаемости призабойной зоны.

При фонтанном способе добычи наибольшее перемешивание нефти и воды происходит в подъемных трубах и при прохождении нефтегазовой смеси через штуцеры. При механизированных способах добычи наиболее устойчивые водонефтяные эмульсии образуются при использовании электроцентробежных насосов (перемешивание продукции в рабочих колесах). При использовании штанговых и винтовых насосов образуются

менее стойкие эмульсии. При компрессорном способе добычи получают эмульсии крайне высокой стойкости из-за того, что происходит окисление нафтеновых кислот с образованием соединений, которые являются эффективными эмульгаторами. При движении газированных обводненных нефтей в системе сбора также возможно образование эмульсий. Основной причиной здесь является энергия турбулентного потока.

Кроме того, эмульсии образуются при разливах нефтепродуктов.

Традиционно исследователи выделяют эмульсии двух видов: гидрофобные В-Н (вода в нефти) и гидрофильные Н-В (нефть в воде). Кроме того, в последнее время рассматривают третий вид — «множественные эмульсии», для которых характерно повышенное содержание различных механических примесей. Известно, что чем меньше поверхностное натяжение на границе нефть — вода, тем лучше будут диспергироваться вода в нефти и нефть в воде. Низкое поверхностное натяжение в свою очередь зависит от наличия поверхностно-активных компонентов в нефти и воде. Наиболее поверхностно-активными компонентами нефти являются нафтеновые кислоты, асфальтены, смолы и парафины [6]. Кроме того, устойчивость нефтяных эмульсий зависит от величины глобул воды (ее дисперсности), плотности и вязкости нефти, содержания в ней легких фракций углеводородов, а также от состава и свойств эмульгированной воды [3,4].

В работе [6] автор предлагает две регрессионные модели для прогнозирования показателя стабильности нефтяной эмульсии. В первую модель включены 15 эффектов (нелинейных слагаемых), зависящих от 5 измеряемых параметров (D – плотность, г/мл, V — вязкость, мПа/с, S — парафины,%, R — смолы,%, A — асфальтены,%). Автор проверил значимость коэффициентов по критерию Стьюдента и оказалось, что только 4 из них значимы, т.е. существенно влияют на результат. Во вторую модель включены 16 эффектов, из которых лишь один значим. Несмотря на это, все незначимые эффекты были сохранены в моделях.

Нелинейные слагаемые имеют сильно отличающиеся масштабы и скорости роста, например e^{e^D} или $\ln(\ln V)$. Коэффициенты имеют разный масштаб, от 2.88×10^{-10} до 9520. Такие модели обычно оказываются плохо обусловленными.

В статье приведены некоторые статистические данные, позволяющие оценить качество этих моделей: значения входных параметров (плотность, вязкость, смолы, асфальтены — т.е. все, кроме парафинов), измеренный индекс стабильности и его прогнозируемые значения по двум моделям. Модель 1 равномерно описывает приведенные данные с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.45$, а модель 2 — неравномерно: для одной части выборки (83 наблюдения) коэффициент детерминации равен $R^2 = 0.54$, а для другой (41 наблюдение) он отрицателен и равен $R^2 = -6.2$. Для всей выборки в целом он тоже отрицателен и равен $R^2 = -0.75$.

Воспроизвести эти модели в полной мере оказалось невозможно, так как в статье не приведены данные по содержанию парафинов. Но, даже по имеющимся данным можно оценить качество моделей. Число обусловленности матрицы нормальной системы уравнений (без учета парафинов) для модели 1 равно 6×10^8 , для модели 2 — 2.5×10^{13} . С учетом парафинов этот показатель был бы еще больше, что говорит о большой чувствительности модели к точности входных данных.

Мы предлагаем другие модели, которые, по нашему мнению, лучше подходят для описания зависимости индекса стабильности эмульсии от измеряемых показателей.

Рассмотрим регрессионную модель

$$\text{Stability} = 86.5 - 76.5D - 2.13 \ln V + 545 \frac{A}{R^3}$$

Все коэффициенты значимы, коэффициент детерминации равен 0.68, число обусловленности матрицы нормальной системы уравнений равно 1602, что говорит о хорошей обусловленности модели. Анализ остатков

показал, что они удовлетворяют основным требованиям регрессионного анализа: несмещенностью (математическое ожидание не зависит от факторов и равно нулю), гомоскедастичностью (дисперсия не зависит от факторов), некоррелированностью и нормальным распределением. Переносимость модели мы проверили с помощью теста Чоу: при разбиении выборки на обучающую и тестовую (в соотношении 2:1), коэффициенты, оцененные для каждой части и всей выборки в целом, статистически не различимы. Стандартное отклонение остатков равно 5.7, т.е. 95%-я погрешность модели около 12. Поскольку значения индекса стабильности меняются в диапазоне $[-20;30]$ для имеющихся данных, то относительная погрешность превышает 40%.

Таким образом, предлагаемая модель адекватно описывает данные, ее качество выше моделей [6], но она все же мало пригодна для прогнозирования.

Предлагается опробовать другой подход — построение нечеткой нейронной сети. Для набора входных переменных будет построена система нечеткого вывода, основанная на алгоритме Сугено [7, 8, 9]. Значения констант для выходной переменной системы нечеткого вывода будут определены в процессе обучения нейронной сети. Первый вопрос, который возникает в процессе исследования, — какие показатели следует включить в набор входных переменных? Желание включить максимальное число показателей ограничивается объемом имеющихся данных.

Для построения системы нечеткого вывода необходимо для каждой входной переменной определить термы и функции принадлежности. Следует отметить, что в случае, если выбраны 4 входные переменные и для каждой будет задано по 3 терма, нейронная сеть будет определять значения 81 константы для выходной переменной. Это требует значительного объема исходных данных. Если для одной из переменных сократить число термов до 2, количество констант уменьшится до 54. Для случая двух термов для двух входных переменных и трех для двух других число констант уменьшится до 36. Для представленного объема данных имеет смысл рассматривать именно последний вариант. Таким образом, в число входных переменных предлагается включить плотность (выделяя 2 терма — “средняя” и “высокая”), вязкость с тремя термами (“низкая”, “средняя” и “высокая”), содержание смол с двумя термами и содержание асфальтенов с тремя термами. Из имеющихся данных случайным образом были отобраны 15% для формирования тестовой выборки. Была произведена проверка репрезентативности отбора, так чтобы значения параметров для отобранных точек равномерно охватывали диапазон изменения параметров для данных в целом. Оставшиеся данные были использованы в качестве обучающей вы-

борки. Для обучающей выборки получено стандартное отклонение остатков 5.05, для тестовой выборки — 3.26. Полученная ошибка на тестовой выборке не превышает ошибку на обучающей выборке, из чего можно сделать вывод, что обучение прошло успешно, сеть не является переобученной. Для всего объема данных стандартное отклонение остатков 4.87, что лучше результата для регрессионной модели. Коэффициент детерминации для всей выборки равен $R^2 = 0.76$, что свидетельствует о том, что предлагаемая модель удовлетворительно описывает исходные данные. Кроме того, следует отметить, что исследование в работе [6] было направлено на изучение стабильности водонефтяных эмульсий, которые могут образовываться в результате разливов нефтепродуктов. Для этого применения не столь важно совпадение прогнозируемых и реальных индексов стабильности, сколь-

ко качественное определение будет ли являться образующаяся эмульсия стабильной, мезостабильной или нестабильной. Получаемые значения показали хорошее согласование при проведении качественной оценки стабильности.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что даже при наличии не столь большого объема данных, который требуется для применения нейронных сетей (для анализа были использованы результаты 124 замеров), нечеткие нейронные сети могут давать удовлетворительные результаты для прогнозирования стабильности водонефтяных эмульсий и показали лучший результат в сравнении с результатами, полученными с помощью регрессионных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жумаев К. К., Хабибов Х. Причины образования водонефтяных эмульсий // Молодой ученый. — 2016. — № 2. — С. 153–155.
2. Ю. Г. Фролов. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М., Химия, 1982, 399 с., ил.
3. Р. З. Сафиева, Л. А. Магадова, Л. З. Климова, О. А. Борисова. Физикохимические свойства нефтяных дисперсных систем. Под ред. проф. В. Н. Кошелева — М.: Изд. РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2001. — 60 с.
4. Ф. Шерман. Эмульсии. Л., Химия, 1972. — 448 с.
5. Fingas, M., B. Fieldhouse, and J. Mullin, *Studies of Water- In-Oil Emulsions: Stability and Oil Properties*, AMOP, 1, 1998.
6. Fingas M. *Handbook of Oil Spill Science and Technology* Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015.
7. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. — М.: Бином, 2013, 800 с.
8. Sugeno M., *Industrial applications of fuzzy control*, Elsevier Science Pub. Co., 1985, 269 p.
9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernet.* 15, 1985, 116–132.