



УДК 550.361:553.982

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕРНИСТЫХ НЕФТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА И МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

И.Г.Яшенко, Т.О.Перемитина, С.В.Лучкова (ФГБУ "Институт химии нефти СО РАН")

Мировые запасы легкоизвлекаемых, легких и маловязких нефтей практически исчерпаны. Необходимый прирост добычи нефти возможен в основном только за счет трудноизвлекаемых запасов, к которым относятся сернистые нефти. В связи с этим актуальны исследования особенностей распространения, геологических условий залегания и физико-химических свойств сернистых нефтей на территориях нефтегазоносных бассейнов и в планетарном масштабе. С использованием мировой базы данных по физико-химическим свойствам нефтей Института химии нефти СО РАН проведен пространственно-распределенный и статистический анализы свойств сернистых нефтей и выявлены их особенности в бассейнах различного геотектонического типа.

Ключевые слова: трудноизвлекаемые нефти; сернистые нефти; физико-химические свойства нефти; нефтегазоносный бассейн; статистический анализ.

В условиях роста объемов добычи УВ-сырья во всем мире, при существенном истощении запасов нефти средней и малой плотности, вязкости в относительно неглубоко залегающих горизонтах, становятся актуальными вопросы освоения трудноизвлекаемых запасов нефти [1]. Речь идет о сложных геологических условиях залегания (большие глубины, сложное строение залежи и др.) и характеристиках самих нефтей с аномальными физико-химическими свойствами, в частности сернистых нефтей. Именно сернистые нефти, являясь одним из видов трудноизвлекаемых нефтей, кроме негативных признаков – высокая плотность и вязкость – обладают еще одним параметром, существенно усложняющим процессы освоения их запасов. В связи с высочайшей коррозионной способностью сероводорода сернистых нефтей затрудняется реализация всех этапов освоения, особенно разработки залежей и переработки сернистой нефти на нефтехимических предприятиях. Убедительным свидетельством важности и актуальности этой проблемы являются многолетние зарубежные и отечественные научно-практические исследования [2-4].

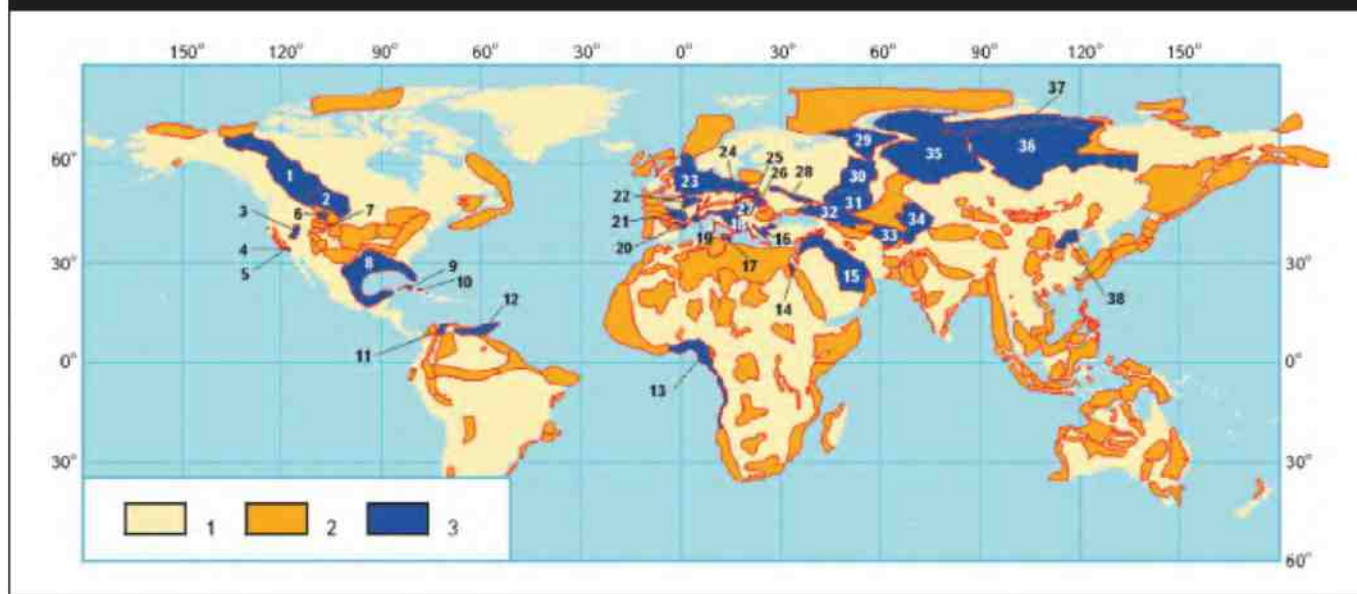
Известно, что высокое содержание серы в нефти влияет не только на технологию ее освоения, транспортировки, переработки и утилизации, но и на степень неблагоприятного воздействия на окружающую среду. Эти проблемы актуальны в настоящее время, в связи с чем проведем исследование особенностей физико-химических свойств и условий залегания на основе методов кластеризации и главных компонент.

Авторы статьи полагают, что выделение основных особенностей распространения, условий залегания и физико-химических свойств сернистых нефтей будет полезным на стадиях активного освоения их ресурсов. Во всем мире запасы сернистых нефтей очень велики. Для Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна (НГБ) проблема сернистых нефтей имеет особое значение. Здесь имеются миллиарды тонн разведанных запасов сернистых нефтей, что требует особого отношения к их производству и существенному изменению политики в подготовке запасов рассматриваемых нефтей как в этом бассейне, так и новых центрах нефтедобычи [5-8].

Общая характеристика сернистых нефтей

Для проведения исследований путем анализа многочисленных литературных источников в Институте химии нефти СО РАН собран обширный фактический материал как по физическим свойствам и химическому составу нефтей мира, так и геологическим характеристикам залежей. На основе этого материала была сформирована база данных (БД) по физико-химическим свойствам нефтей мира, при формировании которой в качестве источников информации используются практически все доступные справочники, монографии, научные статьи и др. В настоящее время в БД представлено описание более 31600 образцов нефти из 200 нефтегазоносных бассейнов мира. Для исследования особенностей физико-химических свойств сернистой нефти на основе информации из БД был сформирован массив

Рис. 1. КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НГБ С СЕРНИСТЫМИ НЕФТЯМИ



1 – территория континентов; 2 – НГБ; 3 – НГБ с сернистыми нефтями; **НГБ Северной и Южной Америки:** 1 – Западно-Канадский, 2 – Уиллистонский, 3 – Юта-Невадинский, 4 – Санта-Мария, 5 – Вентура-Санта-Барбара, 6 – Биг-Хорн, 7 – Ханна-Парамби, 8 – Мексиканского залива, 9 – Северо-Кубинский, 10 – Центрально-Кубинский, 11 – Маракаибский, 12 – Оринокский, **Африки:** 13 – Гвинейского залива, 14 – Суэцкого залива, **Евразии:** 15 – Персидского залива, 16 – Северо-Эгейский, 17 – Сицилийский, 18 – Адриатический, 19 – Ронский, 20 – Эбро, 21 – Аквитанский, 22 – Англо-Парижский, 23 – Центрально-Европейский, 24 – Венский, 25 – Северо-Предкарпатский, 26 – Карпатский, 27 – Паннонский, 28 – Днепровско-Припятский, 29 – Тимано-Печорский, 30 – Волго-Уральский, 31 – Прикаспийский, 32 – Северо-Кавказский, 33 – Амударьинский, 34 – Афгано-Таджикский, 35 – Западно-Сибирский, 36 – Лено-Тунгусский, 37 – Енисейско-Анабарский, 38 – Бохайский

данных. К сернистой нефти, в соответствии с классификацией [1, 8, 9], отнесены образцы нефти с содержанием серы 3 % и выше.

Сформированный массив данных о свойствах сернистых нефтей составил 966 записей из 381 месторождения 38 НГБ на нефтегазоносных территориях Азии, Европы, Северной и Южной Америки и Африки. На территории Евразии находятся 24 НГБ с сернистой нефтью, Америки – 12 бассейнов, Африки – 2 бассейна (рис. 1).

Для апробации МГК-анализа при исследовании особенностей сернистых нефтей из БД был выбран массив данных Волго-Уральского НГБ, обладающего на территории России наибольшим количеством (более 66 % среднемировых) сернистых нефтей. Сформирован массив данных о свойствах волго-уральских сернистых нефтей, объем которого составил 639 образцов из 219 месторождений (более 57 % всех месторождений сернистых нефтей). Уникальными и крупными по запасам являются месторождения: Ромашкинское, Туймазинское, Мухановское, Юсуповское, Шкаповское, Аксубаево-Мокшинское, Гремихинское, Чутырско-Киенгопсинское, Манчарское, Бавлинское, Радаевское и Степноозерское. Нефти залегают в основном на глубине до 2000 м (97 % волго-уральских

сернистых нефтей), и только нефти 9 месторождений (Елпачихинское, Матросовское, Рассветное, Рельевское, Родинское, Сергеевское, Султангулов-Заглядинское, Тананыкское и Шафрановское) – ниже 2000 м. Сернистые нефти являются палеозойскими и в основном находятся в каменноугольных (75,3 % образцов), пермских и девонских отложениях – 13,3 и 11,4 % соответственно.

Рассмотрим кратко основные характеристики сернистых нефтей Волго-Уральского НГБ и сравним их свойства со свойствами остальных мировых сернистых нефтей (без волго-уральских). В табл. 1 представлена информация о средних значениях физико-химических характеристик сернистых нефтей, пластовых температур и давления. По сравнению со свойствами мировых сернистых нефтей, волго-уральские менее тяжелые и вязкие (значение вязкости в 5 раз меньше), с меньшим содержанием серы (меньше на 22 %), парафинов (меньше на 33 %), смол и асфальтенов (меньше на 35 %). Очень обеднены нефтяным газом (меньше в 2,5 раза) и залегают в пластах с более низкой температурой (меньше в 2 раза). Как видно из табл. 1, сернистые нефти (как волго-уральские, так и остальные) обладают очень большой вязкостью и относятся в среднем к классу «сверхвязкая нефть» [9].

Физико-химические свойства и условия залегания сернистых нефтей

Показатели нефти	Сернистые нефти Волго-Уральской НГБ			Мировые сернистые нефти		
	объем выборки	среднее значение	пределы изменения	объем выборки	среднее значение	пределы изменения
Плотность, г/см ³	604	0,9233	0,8245-1,0300	318	0,9487	0,7971-1,0800
Вязкость при 20 °С, мм ² /с	383	5955,36	6,30-204081	50	31779,56	0,92-495098
Содержание серы, %	639	3,78	3,00-7,80	326	4,83	3,00-28,80
Содержание парафинов, %	422	3,57	0,04-15,60	75	5,32	0,21-70,00
Содержание смол, %	441	23,67	2,00-78,00	90	25,15	1,50-67,11
Содержание асфальтенов, %	473	7,41	0,55-60,70	124	11,42	0,15-45,20
Газосодержание в нефти, м ³ /т	194	16,78	0,05-127,00	44	44,93	2,00-198,00
Температура пласта, °С	171	27,54	8,00-55,00	54	55,66	7,21-106,00
Пластовое давление, МПа	175	14,51	0,44-78,00	46	15,39	3,10-58,10

Месторождения с сернистой нефтью размещены на территории бассейна повсеместно, особенно высока их концентрация в республиках Татарстан и Башкортостан (рис. 2).

Применение компонентного и кластерного анализов для исследования особенностей сернистых нефтей

Большой объем информации о размещении, условиях залегания, геологических, геотермических и временных характеристиках залежей и неоднородности свойств нефти (в том числе и сернистой) затрудняет аналитический процесс получения новых знаний о закономерностях размещения, особенностях и взаимосвязях физико-химических свойств нефти. Таким образом, существенными особенностями данных о нефтях, представленных большой совокупностью показателей, являются их разнородность и многомерность. Многомерный характер данных требует для проведения их анализа использовать методы многомерной классификации (кластеризации) [10] в сочетании с методом главных компонент (МГК) (рис. 3).

На первом этапе анализа производится автоматическое разбиение (кластеризация) всего множества объектов на однородные классы в многомерном пространстве признаков. На втором этапе осуществляется анализ полученных результатов кластеризации с помощью МГК, направленный на оценку качества классификации и выявление существенных показателей в каждом из классов. МГК позволяет описывать объекты меньшим числом обобщенных показателей — главными компонентами [11]. Последние являются удобными интегральными показателями, так как они отражают внутренние закономерности, которые не поддаются непо-

средственному наблюдению. При использовании МГК корреляционная матрица является исходной ступенью для дальнейшего анализа и появляется возможность извлечения дополнительной информации об исследуемом объекте, проведения причинного анализа взаимосвязей характеристик и определения их стохастической связи с главными компонентами.

К особенности собранных данных о свойствах нефти относится наличие пропущенных значений в таблицах данных. Стандартные алгоритмы статистического анализа не пригодны для обработки многомерных данных с пропусками. Поэтому при подготовке к анализу массивов данных была проведена процедура начальной обработки массива. Суть данной процедуры состояла в исключении из массива тех образцов, у которых отсутствуют значения некоторых параметров. В результате был сформирован многомерный массив из 75 образцов сернистых нефтей Волго-Уральского НГБ, описанных 8 характеристиками. Полученная выборка удовлетворяет условиям нормальности распределения, что является основанием для применения МГК-анализа.

На первом этапе анализа была проведена классификация данных с использованием программы комплексного анализа многомерных данных [10] на основе метода кластерного анализа (см. рис. 2). При этом использован алгоритм кластеризации, реализующий метод К-среднего, что позволило разделить все объекты исследования на два однородных класса в исходном 8-мерном пространстве (рис. 4). В первый класс вошло 11 образцов (Шагиртско-Гожанское, Ново-Суксинское, Быркинское, 6 образцов Ножовского и 2 образца Альняшского месторождений), во второй класс — оставшиеся 64 образца нефти.

Рассмотрим свойства нефтей обоих классов. Месторождения 1-го класса географически расположены

Рис. 2. РАЗМЕЩЕНИЕ ОСНОВНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С СЕРНИСТЫМИ НЕФТЯМИ НА ТЕРРИТОРИИ ВОЛГО-УРАЛЬСКОГО НГБ



1 – граница России; 2 – НГБ; 3 – месторождения; 4 – месторождения с сернистыми нефтями

близко друг от друга на севере Волго-Уральского НГБ, в Пермском крае, исключение составило Ново-Суксинское, которое находится на севере Республики Татарстан. Месторождения 2-го класса распространены по всей территории бассейна.

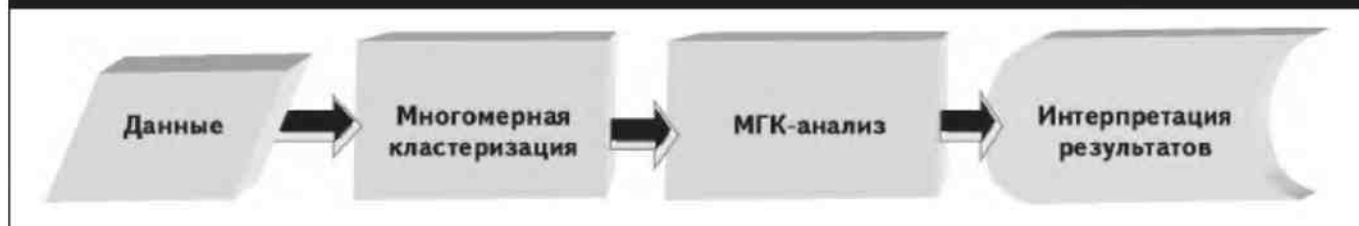
Стратиграфическое распределение также имеет отличительные особенности между классами. Нефти 1-го класса находятся в отложениях нижнего отдела каменноугольной системы, в визейском и турнейском пластах (31,2 и 68,8 % соответственно). Нефти 2-го класса относятся к девонским, каменноугольным и пермским отложениям (12,5; 72,5 и 15,0 % соответственно).

Основные характеристики сернистых нефтей обоих классов представлены в табл. 2. Следует отметить,

что больших различий в данных для нефтей 1-го и 2-го классов не наблюдается, за исключением значения вязкости – вязкость нефтей 2-го класса очень высока и превышает вязкость нефтей 1-го класса в 49 раз. Скорее всего, вязкость является решающим показателем при разделении нефтей на классы с использованием программы комплексного анализа многомерных данных на основе метода кластерного анализа.

На втором этапе был проведен МГК-анализ данных с применением программы «Комплексный анализ многомерных данных на основе метода главных компонент» [12]. Вклады первой и второй главных компонент (principal component, PC) составили PC1 = 91,81 % и PC2 = 6,13 %, т.е. первая и вторая главные компоненты

Рис. 3. СХЕМА АНАЛИЗА МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ О НЕФТИ



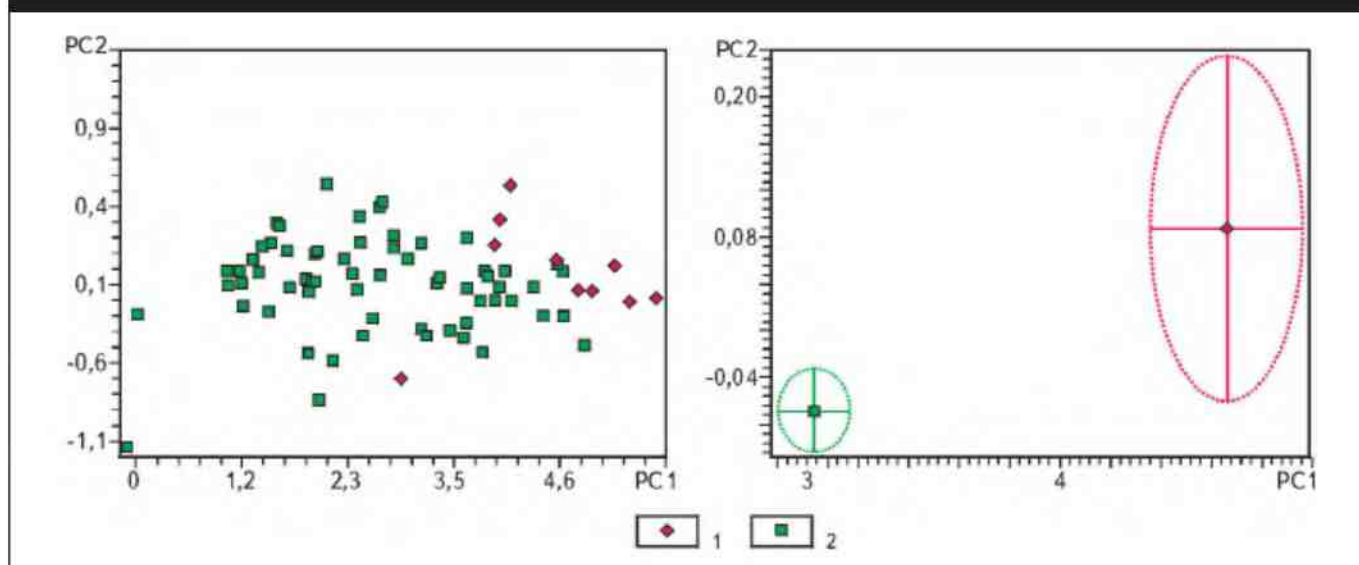
описывают в сумме 97,94 % исходной информации об исследуемых объектах, что позволяет произвести переход из 8-мерного пространства признаков в пространство двух первых главных компонент PC1 и PC2 с потерей всего 2,06 % исходной информации.

Области разброса исследуемых образцов нефтей 1-го и 2-го классов перекрываются, что затрудняет оценку значимости различия между ними (см. рис. 4, А). Поэтому для решения вопроса о существовании или отсутствии значимого различия между свойствами образцов двух классов рассматриваемых месторождений было использовано представление результатов МГК-анализа в виде средних значений и доверительных интервалов [13-15] для каждого класса исследованных образцов в пространстве двух главных компонент (см. рис. 4, Б). Расчет доверительных интервалов для полученных классов проведен для доверительной вероятности 90 %. Такое представление результатов позволяет достоверно определить, имеется ли статистически значимое различие между выявленными группами объектов с доверительной вероятностью 90-95 % (ГОСТ 11.001-73).

С помощью применения МГК можно не только перейти в пространство меньшей размерности, но и исследовать значения параметров объектов путем изучения нагрузок на главные компоненты. Графическое представление нагрузок на главные компоненты позволяет оценить влияние каждого параметра (характеристики) объекта на распределение объектов в пространстве главных компонент и определить набор наиболее информативных параметров [13]. На рис. 5 приведены нагрузки на PC1 для каждого класса объектов исследования.

Анализ нагрузок на PC1 показал, что для данного набора свойств нефти наиболее информативными (вариабельными) являются всего три (вязкость нефти, температура пласта, содержание смол) из 8 характеристик, их значения отвечают за разделение всех объектов на классы. Вязкость нефти в обоих классах имеет наибольшее значение нагрузки на первую главную компоненту, является наиболее информативным показателем и играет решающую роль при классификации нефтей. В дальнейший анализ можно и достаточно включать только три перечисленных показателя нефти, остальные

Рис. 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МГК-АНАЛИЗА ДВУХ КЛАССОВ ОБЪЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ПЕРВЫХ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ



Классы: 1 – 1-й, 2 – 2-й

Таблица 2

Физико-химические свойства и условия залегания сернистых нефтей 1-го и 2-го классов

Показатели нефти	Сернистые нефти 1-го класса		Сернистые нефти 2-го класса	
	объем выборки	среднее значение	объем выборки	среднее значение
Плотность, г/см ³	53	0,9169	553	0,9239
Вязкость при 20 °С, мм ² /с	50	137,93	335	6808,82
Содержание серы, %	53	3,66	588	3,79
Содержание парафинов, %	47	3,79	377	3,54
Содержание смол, %	47	24,74	396	23,55
Содержание асфальтенов, %	47	5,94	428	7,56
Газосодержание в нефти, м ³ /т	40	13,72	156	17,53
Температура пласта, °С	40	26,90	133	27,73
Пластовое давление, МПа	40	15,13	137	14,33

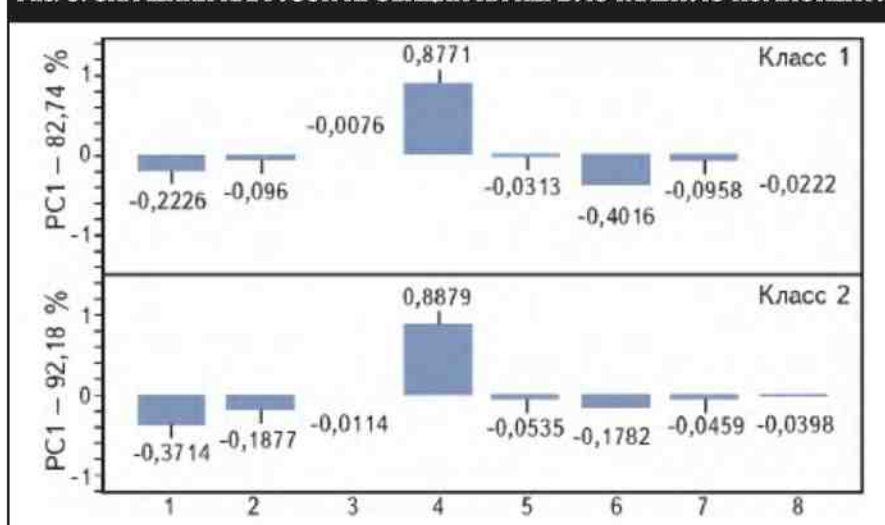
можно не принимать в рассмотрение в силу их малой вариабельности от объекта к объекту. В МГК исходят из представления о том, что свойства, описывающие исследуемые объекты, коррелируют друг с другом и в основе наблюдаемых сложных взаимосвязей между ними лежит относительно более простая структура, отражающая наиболее характерные взаимосвязи и обусловленная влиянием некоторых общих причин-факторов.

Значения нагрузок на первую главную компоненту (см. рис. 5) позволили обнаружить следующие зависимости: для образцов нефти 1-го класса можно отметить максимальный вклад таких характеристик, как вязкость нефти при 20 °С и содержание смол. Для образцов 2-го класса – вязкость нефти при 20 °С и температура пласта. Причем связь между значимыми характеристиками как для 1-го, так и 2-го классов обратно пропорциональна.

Полученные результаты имеют практическую значимость. По значениям наиболее значимых нагрузок можно восстановить исходные данные о свойствах сернистых нефтей в каждой точке наблюдений, прогнозировать состав и условия залегания нефтей подобных месторождений, строить карты, отражающие особенности площадного (или по разрезу) распределения схожих нефтей под влиянием отдельно взятого фактора (в нашем случае – вязкость нефти) или сочетания факторов. Знания о вязкости или

прогноз вязкости нефти новых месторождений также очень важны и в процессах проектирования разработки месторождений, так как вязкость существенно влияет на режим работы нефтегазового оборудования, а именно для правильного выбора типоразмеров поверхностного оборудования и внутрипромысловых трубопроводов, определения глубины спуска насосного оборудования и режима его работы, учета потерь при трении в подъемнике и насосных установок и т.д. Помимо этого, необходима информация о сернистости и смолистости нефти, пластовых условиях ее залегания, что также во многом определяет проект разработки месторождений.

Рис. 5. ЗНАЧЕНИЯ НАГРУЗОК-ПРОЕКЦИЙ НА ПЕРВУЮ ГЛАВНУЮ КОМПОНЕНТУ



1 – температура пласта, °С; 2 – давление пласта, МПа; 3 – плотность, г/см³; 4 – вязкость, мм²/с; содержание, %; 5 – твердого парафина, 6 – смол, 7 – асфальтенов, 8 – серы

Заключение

На основе анализа и обобщения литературных данных показано исследование особенностей физико-химических свойств сернистых нефтей с использованием метода главных компонент, что имеет важное научное и практическое значение при современном увеличении и расширении объемов добычи трудноизвлекаемых нефтей, в том числе и сернистых.

Метод главных компонент позволил выявить наиболее информативные характеристики исследуемой нефти (вязкость, температура пласта, содержание смол), а также обнаружить обратно пропорциональную зависимость между вязкостью нефти при 20 °С и содержанием смол пласта и между вязкостью нефти при 20 °С и температурой пласта.

Приведенные результаты могут быть использованы при разработке новых и усовершенствовании существующих методов и технологий добычи и переработки нефтей с аномальными физико-химическими свойствами, а также при решении других задач нефтяной отрасли.

Литература

1. **Лисовский Н.Н.** О классификации трудноизвлекаемых запасов / Н.Н.Лисовский, Э.М.Халимов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2009. – № 6.
2. **Масланов А.А.** Предотвращение осложнений при добыче высокосернистой нефти // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 11.
3. **Гарифуллин Р.Г.** Очистка нефти от сероводорода в промысловых условиях / Р.Г.Гарифуллин, А.М.Мазгаров, И.К.Хрущева и др. // Технологии нефти и газа. – 2007. – № 1.
4. **Oit W.L.** Geochemistry of sulfur in petroleum systems / W.L.Oit, Damste Jaap S.Sinnighe / Geochemistry of Sulfur in Fossil fuels; ACS Symposium Series 429. – 1990.
5. **Пуртова И.П.** Трудноизвлекаемые запасы нефти. Терминология. Проблемы и состояние освоения в России / И.П.Пуртова, А.И.Вариченко, И.В.Шпуров // Наука и ТЭК. – 2011. – № 6.
6. **Якуцени В.П.** Динамика доли относительного содержания трудноизвлекаемых запасов нефти в общем балансе / В.П.Якуцени, Ю.Э.Петрова, А.А.Суханов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2007. – № 2.
7. **Максутов Р.** Освоение запасов высоковязких нефтей в России / Р.Максутов, Г.Орлов, А.Осипова // Технологии ТЭК. – 2005. – № 6.
8. **Рыльков А.В.** Нафтеносы нефти мира (распространение, генезис, применение) / А.В.Рыльков, В.В.Потеряев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 1.
9. **Яценко И.Г.** Трудноизвлекаемые нефти: физико-химические свойства и закономерности размещения / И.Г.Яценко, Ю.М.Полищук / Под ред. А.А.Новикова. – Томск: В-Спектр, 2014.
10. **Полищук Ю.М.** Использование геоинформационных систем для комплексного анализа пространственных данных

на основе многомерной кластеризации / Ю.М.Полищук, Г.А.Кочергин // Геоинформатика. – 2011. – № 2.

11. **Filzmoser P.** Component analysis for compositional data with outliers / P.Filzmoser, K.Hron, C.Reimann // *Environmetrics*. – 2009. – 20 (6).
12. **Перемитина Т.О.** Программный комплекс для анализа многомерных данных на основе сочетания метода главных компонент и геоинформационных технологий / Т.О.Перемитина // Информационные технологии. – 2005. – № 5.
13. **Андрукович П.Ф.** Применение метода главных компонент в практических исследованиях / П.Ф.Андрукович. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – Вып. 36.
14. **Перемитина Т.О.** Алгоритмы статистического прогнозирования состава и свойств нефти / Т.О.Перемитина // Автоматизация и современные технологии. – 2011. – № 9.
15. **Yashchenko I.G.** A study of relations between physicochemical properties of crude oils and microbiological characteristics of reservoir microflora [Электронный ресурс] / I.G.Yashchenko, Yu.M.Polishchuk, T.O.Perevitina // AIP Conference Proceedings, V. 1683: Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2015 (21–25 September 2015, Tomsk, Russia), 020072 (2015). – Режим доступа <http://dx.doi.org/10.1063/1.4932926>.

© И.Г.Яценко, Т.О.Перемитина, С.В.Лучкова

Ирина Германовна Яценко,
заведующая лабораторией,
кандидат геолого-минералогических наук,
sric@ips.tsc.ru;

Татьяна Олеговна Перемитина,
научный сотрудник,
кандидат технических наук,
peremitinat@mail.ru;

Софья Викторовна Лучкова,
аспирантка,
sonetta27@gmail.com.

INVESTIGATION OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SULPHUROUS OILS USING FACTOR ANALYSIS AND PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS

Yashchenko I.G., Perevitina T.O., Luchkova S.V. (FSBI "Institute of Petroleum Chemistry Siberian Division of Russian Academy of Sciences")

The world reserves of easily extracted, light and low-viscosity oil are believed virtually exhausted. Required growth of oil production mainly could be provided only with the hard extracted reserves, which include sulphurous oil. Therefore the research of distribution features, geological conditions of occurrence and physical and chemical properties of sulphurous oil in the oil and gas basins and on a global scale are relevant. Spatially distributed and statistical analysis of the properties of sulphurous oil have been conducted, their features have been identified in basins of different geotectonic types with the help of global databases on physical and chemical oil properties from Institute of Petroleum Chemistry SB RAS. The results of this comprehensive analysis are presented in the article.

Key words: hard-to-extract oil; sulphurous oil; physical and chemical properties of oil; oil and gas basins; statistical analysis.