

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ПЛАСТОВЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМАХ В НЕДРАХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ БАССЕЙНОВ (ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)

Д.Ю. Бунин¹, В.А. Мирская², Ю.А. Савина¹, А.Н. Степанов¹
1 – ООО «ЛУКОЙЛ-ВолгоградНИПИморнефть», Волгоград, e-mail:
Astepanov@lukoilvmn.ru; 2 – Институт физики ДагНЦ РАН, Махачкала, e-mail:
I.Kamilov@iwt.ru

Многолетние исследования закономерностей формирования углеводородных (УВ) скоплений в различных регионах (А.Н. Степанов и др., 1977–2008 гг.) показывают, что формирование критических явлений в осадочном чехле нефтегазоносных бассейнов (НГБ) происходит преимущественно за счет процессов миграции и разгрузки газовых растворов (фазово-ретроградная конденсация) в пустотном пространстве структурных ловушек, изначально водонасыщенных.

Обобщение и анализ экспериментальных данных, а также результаты проведенных термодинамических расчетов моделирования термического крекинга углеводородов указывают на отсутствие образования значительных масс углеводородных газов в условиях осадочного чехла НГБ.

Математическое исследование уравнения газонасыщенности в пористой среде на основе закона Дарси для потоков нефти и газа позволяет на количественном уровне обосновать влияние процессов, происходящих в пустотном пространстве подземного резервуара, на фазовое состояние формирующихся УВ-скоплений.

Анализ результатов геологоразведочных работ, проведенных в условиях сверхглубин (6–11 км) в Предкавказье, Прикаспии, Галф-Коста, во впадине Анадарко и в других регионах земного шара, указывает на высокую термическую устойчивость нефти, что подтверждается термодинамическими расчетами для полной системы нефть – газ – порода – органическое вещество – пластовые воды. Таким образом, в условиях земной коры и верхней мантии нефть остается метастабильно устойчивой. При этом устойчивость УВ-скоплений в недрах НГБ (а не просто термическая устойчивость нефти или ее отдельных компонентов, что далеко не равнозначно) рассматривается нами на основе суммы трех основных составляющих: механической (флюидодинамической), термической и химической (диффузионной), что, в свою очередь, только частично и статистически позволяет объяснить исчезновение (перемещение) крупных запасов УВ-скоплений в условиях относительно невысоких температур недр (~200 °С), в отсутствие термодинамических запретов

на деструкцию нефти при значительно больших температурах (250–300 °С) и высоких давлениях (более 100 МПа).

Как показывают экспериментальные данные, полученные нами в результате исследования фильтрации жидкостей и газов в пористой среде, при геостатических и термобарических условиях недр в значительном диапазоне значений динамической вязкости (0,1–500 $\mu\text{Па}\cdot\text{с}$) в условиях высоких температур сверхглубин подвижности пластовых флюидов (функции их фазовых проницаемостей и динамических вязкостей) значительно возрастают, если автомодельно выполняются критерии подобия π_1 и π_2 (Д.А. Эфрос, 1963), которые представляют собой отношение перепадов капиллярного и гидродинамического давлений и соотношение их градиентов при фильтрации пластовых флюидов в пористой среде.

На основании проведенных исследований во всем диапазоне глубин залегания НГБ выделены область метастабильной устойчивости УВ-скоплений, глубинные зоны разделения (расслоения) флюидов, распространения критических явлений и различных по степени насыщенности газовой и жидкой фазой пластовых флюидов при определенном соотношении пластовых и геостатических давлений и температур.

Следует отметить, что для технических систем (отдельные фракции нефти и конденсата, бинарные системы) при расчете критических параметров получаются вполне удовлетворительные результаты. Для нефтяных систем переходного состояния и высоконасыщенных газоконденсатных систем использование широко распространенных кубических уравнений не дает положительных результатов.

Важнейшей проблемой остается представление тяжелой фракции нефтяных систем и учет условий устойчивости для полной системы нефть – газ – пористая среда. Экспериментальные исследования, посвященные определению критических свойств рассматриваемых систем и влиянию пористой среды на параметры пластовых флюидов, проводятся пока еще в недостаточном объеме. Для двух-, трех- и четырехкомпонентных систем положение заметно лучше: здесь накоплен определенный комплекс экспериментальных данных.

В расчетах сложных систем (и технических, и природных) используются в основном устаревшие, малоэффективные алгоритмы. В настоящее время уже разработаны универсальные термодинамические методы изучения полных минеральных систем вода – нефть – порода – органические вещества – газ (и в большей мере вода – порода), реализованные в известных программных средствах.

Теория стабильных стационарных мегасистем, разработанная в трудах И.К. Карпова (1981), позволяет в некоторой степени преодолевать указанные выше трудности. В работе приводятся результаты современного термодинамического моделирования сложных пластовых УВ-систем, в том числе с учетом пористой среды, на основе минимизации свободной энергии Гиббса. Задача расчета полного и ограниченного химического равновесия в многокомпонентных, многофазных и многоагрегатных системах сводится к задаче выпуклого программирования с использованием теоремы Куна – Таккера.

На основе сравнительного анализа методов моделирования по реакциям (константы равновесия) и минимизации термодинамических потенциалов показаны существенные преимущества метода минимизации.

Термодинамическое состояние системы, помимо мольных количеств независимых компонентов, определяется шестью каноническими парами параметров: температура – давление, температура – объем, энтропия – объем, энтальпия – давление, внутренняя энергия – объем, давление – энтропия.

Учитывая значительную сложность моделирования природных геологических систем и процессов, происходящих в них (тензорный характер ряда параметров), для построения адекватных моделей в режиме оптимального согласования необходимо использование строгой системы ограничений (в особенности в условиях неопределенности входной информации), развитой базы данных, современных и выверенных методов оценки критериев подобия экспериментальных моделей природным объектам, современных математических методов термодинамики и статистической физики, флюидодинамики и физики пористых сред и всего того, что способствует созданию имитационных моделей, максимально сопоставимых по сложности с природой.