

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ КЕРОГЕНОСОДЕРЖАЩИХ КОЛЛЕКТОРОВ, СТИМУЛИРУЮЩИЕ НЕФТЕГЕНЕРАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

М.Н. Кравченко, Н.М. Дмитриев, А.В. Мурадов, Н.Н. Диева, В.В. Герасимов

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

В последнее время проблеме поиска методов разработки месторождений Баженовской свиты уделяется очень пристальное внимание. Для этого существуют, как минимум, три причины. Первая связана с исчерпыванием добычи легкой нефти. Вторая обусловлена качественным скачком в познании геологических и физических свойств резервуаров трудноизвлекаемых запасов. В-третьих, с развитием инновационных технологий стало возможным разрабатывать месторождения нетрадиционных углеводородов, к которым относят тяжелую нефть, нефти низкопроницаемых сланцевых месторождений. Пласты баженовской свиты характеризуются низкой пористостью и проницаемостью, неоднородностью структуры и состава, наличием керогеносодержащих включений, высокой степенью анизотропии и низким процентом извлекаемых запасов. Все это делает такие пласты объектом исследования в плане поиска новых технологий, которые должны учитывать необходимость изменения структуры коллектора, в том числе его фильтрационно-емкостных свойств, осуществляться в пределах давлений и температур, отвечающих зоне максимальной генерации. Экспериментальное изучение свойств керогена, как основного источника дополнительной генерации подвижных углеводородов, позволяет не только замкнуть математическую модель, но и численно прогнозировать выбор наиболее оптимальных методов разработки, опираясь на опыт сочетания волновых, тепловых и химических методов разработки традиционных месторождений. Авторы статьи провели анализ текущего состояния исследования низкопроницаемых коллекторов, лабораторных экспериментов по разложению керогена и генерации подвижной углеводородной фазы. Была построена математическая модель с учетом физико-химических процессов, происходящих под воздействием тепловых волн и волн высокого давления, возникающих в пласте при применении термохимических методов.

Ключевые слова: нетрадиционные углеводороды, кероген, термохимические методы, кинетика разложения, математическое моделирование

DOI: 10.18599/grs.18.4.12

Для цитирования: Кравченко М.Н., Дмитриев Н.М., Мурадов А.В., Диева Н.Н., Герасимов В.В. Инновационные методы разработки керогеносодержащих коллекторов, стимулирующие нефтегенерационный потенциал. *Георесурсы*. 2016. Т. 18. № 4. Ч. 2. С. 330-336. DOI: 10.18599/grs.18.4.12

Введение

На сегодняшний день актуален, как никогда, поиск новых эффективных методов разработки месторождений трудноизвлекаемых углеводородов. Из множества предложенных технологических решений часть, по сути, повторяет подходы к разработке традиционных коллекторов с небольшими модификациями в последовательности производимых операций. Часть находится в стадии апробации, используется для отдельных видов ресурсов, например тяжелых нефтей, и нет достаточной выборки по результатам воздействия на пласты другого типа, например, слабопроницаемых с керогеновыми включениями.

Для разработки слабопроницаемых пластов опробуются в основном методы множественного гидроразрыва пласта, методы внутрипластового горения и комплексные МУН, сочетающие в себе тепловые и термохимические методы. При этом «современные инновации», предлагаемые для трудноизвлекаемых углеводородов, не направлены на поиск кардинально новых методов воздействия на пласты, но в своей основе используют особые свойства и качества породы и насыщающих флюидов, в том числе учитывающих генерацию дополнительных углеводородов в коллекторах, изначально имеющих малый объем подвижной нефти.

Не исключением из данной тенденции оказывается и другой вид трудноизвлекаемого сырья, которому посвящена настоящая работа, и из которого складывается огромный объем мировых запасов углеводородов, а также потенциальных запасов России, а именно запасов, сосредоточенных в керогеносодержащих коллекторах. В эту группу входят месторождения баженовской и других нефтегазоматеринских свит.

Особенность рассматриваемых залежей состоит в том, что содержащийся в составе их пласта (в твердой фазе) кероген обладает нефтегенерационным потенциалом, за счет которого способен при некоторых определенных условиях преобразовываться в подвижные углеводороды. В природе данный процесс происходит самопроизвольно в масштабах геологического времени (миллионы лет) за счет постепенного увеличения давления и температуры при осадконакоплении и сопровождается разнообразными медленнотекущими фазовыми переходами и химическими реакциями, на ход которых кроме всего прочего оказывают влияние минеральная составляющая пласта, бактерии и другие элементы среды. Однако получение дополнительного притока из керогена возможно и в более короткие сроки при искусственном внешнем воздействии (Карпов и др., 1998; Волков и др. 2016). Поэтому очевидным оказывается вывод о том, что главной задачей при разработке обсуждаемого класса месторождений является добыча их потенциальных запасов, сокрытых в керогене и не учтенных при подсчете геологических запасов.

Теоретические основы и экспериментальные исследования разложения твердых УВ

Для получения углеводородов из органического вещества керогена в масштабах реального времени необходимо

дополнительное внешнее воздействие на керогеносодержащую породу, которое, по мнению исследователей (Нестеров и др., 1993 а; Баженова и др., 1993), состоит в обеспечении условий повышенной температуры в пласте, порядка 300-520° С, а также наличию в структуре порового пространства системы трещин, обеспечивающих пути миграции образующихся продуктов разложения керогена (Нестеров и др., 1993 а; 1993 б; Коровина и др., 2013). В противном случае генерация жидких углеводородов из керогена тормозится вне зависимости от уровня температур (Коровина и др., 2013) и давлений (Нестеров и др., 1993 б).

В тоже время в ряде работ (Коровина и др., 2013; Каюкова и др., 2013; Вольф, Петров, 2006) отмечается факт формирования или увеличения размеров и количества миграционных каналов и пор в результате термического воздействия на керогеносодержащие породы.

Обобщая результаты исследований в этой области, нужно указать, что процесс преобразования органического вещества керогена безусловно связан с термодинамическими условиями (температурой, скоростью нагревания, размерами формаций керогена, наличием кислорода в составе керогеносодержащих пород и др.) и в зависимости от них может протекать по-разному.

В мировой практике на сегодняшний день реализуются в основном тепловые методы в сочетании с гидроразрывом пласта и бурением горизонтальных скважин. Главной задачей данных методов является разогрев пород и увеличение их пропускной способности. В России наиболее перспективным считается термогазовый метод, применяемый сегодня на залежах баженовской свиты. Метод сопоставим с внутрипластовым горением, однако вместо процессов горения включает в себя реакции низкотемпературного окисления.

Все применяемые технологии в большей или меньшей степени могут сопровождаться процессами генерации углеводородов из керогена.

Однако, зачастую, авторы при описании сущности технологии основной задачей ставят добычу малоподвижных углеводородов, сосредоточенных в низкопроницаемой матрице рассматриваемого типа пород, а не процессы генерации. Данная ситуация вытекает из проблемы гидродинамического описания фильтрации в условиях керогеносодержащих коллекторов.

Математическое описание многофазной фильтрации в керогеносодержащих коллекторах, организованной в ходе разработки с применением какого-либо метода, осложняется необходимостью учета особенностей состава пород и протекающих в них процессов, например, таких как приток подвижной фазы, увеличение объема порового пространства, изменение фильтрационно-емкостных свойств и термодинамического состояния системы в целом за счет поглощения и выделения энергии при физико-химических реакциях перехода керогена в углеводороды и другие.

Целью настоящего исследования являлось создание математической модели многофазной фильтрации в сложнопостроенном анизотропном пласте, которая бы учитывала наличие в нем физико-химических реакций и дополнительного притока углеводородов за счет генерации их из керогена.

Генерационная способность тяжелых углеводородов

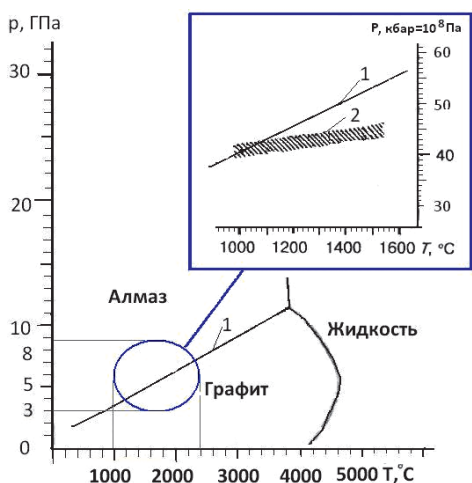


Рис. 1. Фазовая диаграмма графит-алмаз (линия 1) и равновесная зона для УВ (линия 2).

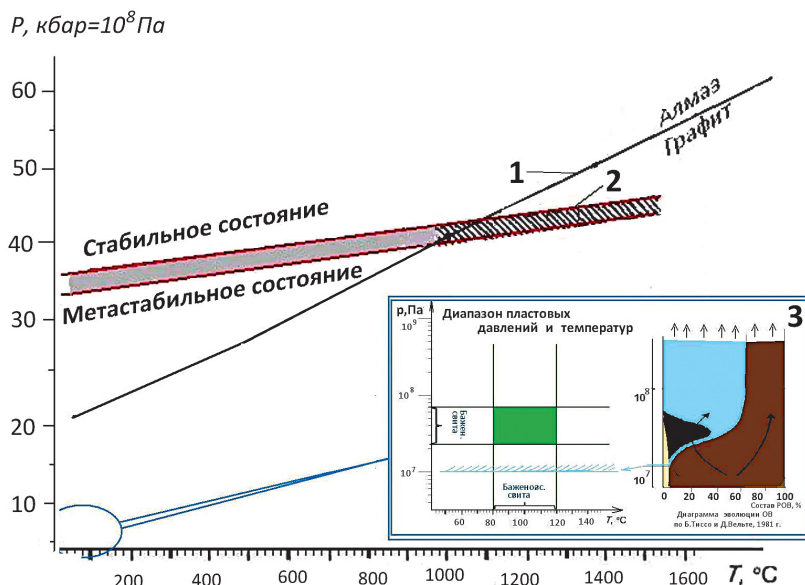


Рис. 2. P-T диаграмма разложения твердых углеводородов и анализ керогена пород баженовской свиты. 1 – линия равновесного состояния графит-алмаз. 2 – граница фазового равновесия метан – тяжелые углеводороды. На вкладке в рисунок черным отмечена область образования жидкой нефти, голубым – генерация газовой фазы, коричневым – наличия в пласте керогена, зеленым обозначена область пластовых давлений и температур, отвечающих Баженовской свите.

может быть оценена и с точки зрения оценки термодинамического потенциала как меры метастабильности тяжелых углеводородов. Возможность разложения тяжелых углеводородов характеризуется фазовой диаграммой P-T. Построение фазовой диаграммы и ее анализ для керогена, даст возможность оценить наиболее оптимальные варианты воздействия, если условия реализуемого процесса будут отвечать зоне метастабильности твердой (керогеновой) фазы.

Согласно диаграмме разложения керогена (Тиссо, Вельте, 1981), на глубинах ниже 1000 м (при давлении порядка 10^7 Па) кероген при термическом воздействии разлагается на жидкие углеводороды, а при давлениях порядка 10^8 Па уже наблюдается только генерация газа из твердых углеводородов.

В работе (Карпов и др., 1998) изучался вопрос о разложении тяжелых углеводородов на метан и твердый углерод в зоне высоких давлений и температур. Авторами отмечено, что в пластах при температурах в интервале от 170 до 230 °С период полураспада тяжелых углеводородов составляет величины порядка геологического времени. Это отвечает глубинам скопления геологически сгенерированных нефти и твердого углерода (до 7 км), и углерода в паре с углеводородным газом (до 10 км), что согласуется с диаграммой Б. Тиссо и Д. Вельте по залеганию и составу пластового флюида. Однако отмечается, что в диапазоне температур свыше 300-700 °С условия разложения твердых УВ могут реализоваться в более глубоких слоях пород ближе к мантии, при этом время разложения может сократиться от тысяч лет до нескольких суток. Температуры в УВ пластах до глубин до 7 км не превышают 250 °С (Конторович, 1972). Так как скорость фазового разложения резко возрастает с ростом температуры, это означает, что на глубинах более 7 км не могут существовать метастабильные углеводороды – они разлагаются на смесь УВ газов и твердый углерод.

На рисунке 1 на P-T диаграмме углерода приведены упомянутые результаты (Карпов и др., 1998) в диапазоне высоких давлений (порядка 10^8 Па) и температур (порядка 1000 °С): заштрихованная область отвечает границе зоны метастабильности твердых углеводородов. В этой

же работе отмечается, что указанная зона равновесия УВ коррелирует с линией равновесия графит-алмаз (линия 1).

На рисунке 2 показана линия фазового равновесия для УВ (Карпов и др., 1998), которая сопоставлена с линией равновесия графит-алмаз (по корреляции (Кравченко, Нигматулин, 1986), построенной по экспериментальным данным (Bundy, 1963)) и пластовыми условиями существования керогена в пластах Баженовской свиты (Тарасова и др., 2012).

Таким образом, нетрадиционные метастабильные нетекучие УВ выше зоны равновесия можно стимулировать к разложению только значительно повышая температуры, стимулируя переход керогена в метастабильное состояние. При этом энергетический барьер перехода может быть рассчитан по разнице внутренних энергий твердого и разложившегося углеводорода.

Математическая модель и результаты расчетов

Предлагаемая общая математическая модель, основана на постулатах механики взаимопроникающих многофазных континуумов и анализе результатов теоретических и экспериментальных исследований разных авторов по изучению поведения керогена при различных термобарических условиях:

$$\frac{\partial}{\partial t}(m c \rho_g s_g) + \text{div}(c \rho_g w_g) = -J_1 - J_3,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m \rho_g (1-c) s_g) + \text{div}((1-c) \rho_g w_g) = J_1 + J_2,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m \rho_n s_n) + \text{div}(\rho_n w_n) = b_k J_1,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1-m)\rho_k] = -J_2 - b_k J_1 + J_3,$$

$$\bar{w}_v = -\frac{k_0 k_v}{\mu_v} \text{grad } p_v; \quad \bar{w}_n = -\frac{k_0 k_n}{\mu_n} \text{grad } p_n,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\sum_i \alpha_i \rho_i c_{vi} T \right] + \text{div} \left[\sum_i w_i \rho_i c_{vi} T \right] = \sum_i \text{div}(\lambda_i \text{grad } T) + J W_k$$

$$b_k = b_k(T, p, c, E_a), \quad k_i = k_i(m).$$

где m – пористость; c – концентрация химического реагента в водном растворе; s_v, s_n – водо- и нефтенасыщенность; w_v, w_n – скорости фильтрации водной и нефтяной фаз соответственно; J_1 – скорость изменения массы химреагента, расходуемого на реакцию растворения породы, в единицу времени; J_2 – скорость притока водной фазы при растворении породы и разложении керогена, в единицу времени; J_3 – скорость притока массы коксовой части породы при разложении керогена, в единицу времени; b_k – функция, связывающая количество потраченного химического реагента с количеством образованных из керогена углеводородов; k_0 – абсолютная проницаемость; k_i ($i=v, n$) – относительные проницаемости воды и нефти соответственно; μ_v, μ_n – вязкости воды и нефти соответственно; α_i – объемная концентрация фаз для $i=v, n, k$, что соответствует воде, нефти и твердой части пласта; ρ_i – истинная плотность фаз для $i=v, n, k$, (воды, нефти и твердой части пласта); c_{vi} – теплоемкость фаз для $i=v, n, k$, (воды, нефти и твердой части пласта); λ_i – теплопроводность фаз для $i=v, n, k$, (воды, нефти и твердой части пласта); J – интенсивность разложения керогена; W_k – энергия, выделяющаяся при разложении керогена на единицу массы разложения.

Анализ имеющихся на настоящий момент промысловых и экспериментальных результатов исследований керогена и данных, ис-

пользуемых при численном моделировании, показал отсутствие единого представления о кинетике нефтегенерационных реакций.

Исходя из анализа фазовой диаграммы керогена, авторами кинетика фазового перехода разложения твердых УВ была задана по тому же принципу, что и кинетика фазового перехода графит-алмаз (Кравченко, 1990).

На первом этапе была построена упрощенная изотермическая модель многофазной фильтрации с кинетикой химической реакции лишь качественно задающей переход керогена в жидкие углеводороды путем учета в модели наличия химически активного агента, обеспечивающего запуск реакции разложения керогена (Вольпин и др., 2010). Такая модель позволила проанализировать особенности фильтрации в условиях увеличения пористости, и образования дополнительного притока жидкой нефти за счет сгенерированной из твердой керогеновой матрицы.

Достаточно обширный блок входных параметров модели позволил выявить эффекты взаимосвязи харак-

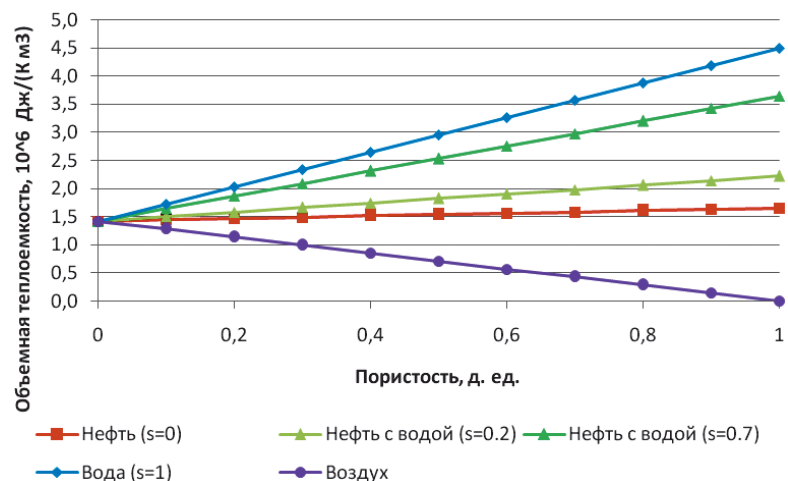


Рис. 3. Объемная теплоемкость песчаника, насыщенного разными фазами, в зависимости от пористости.

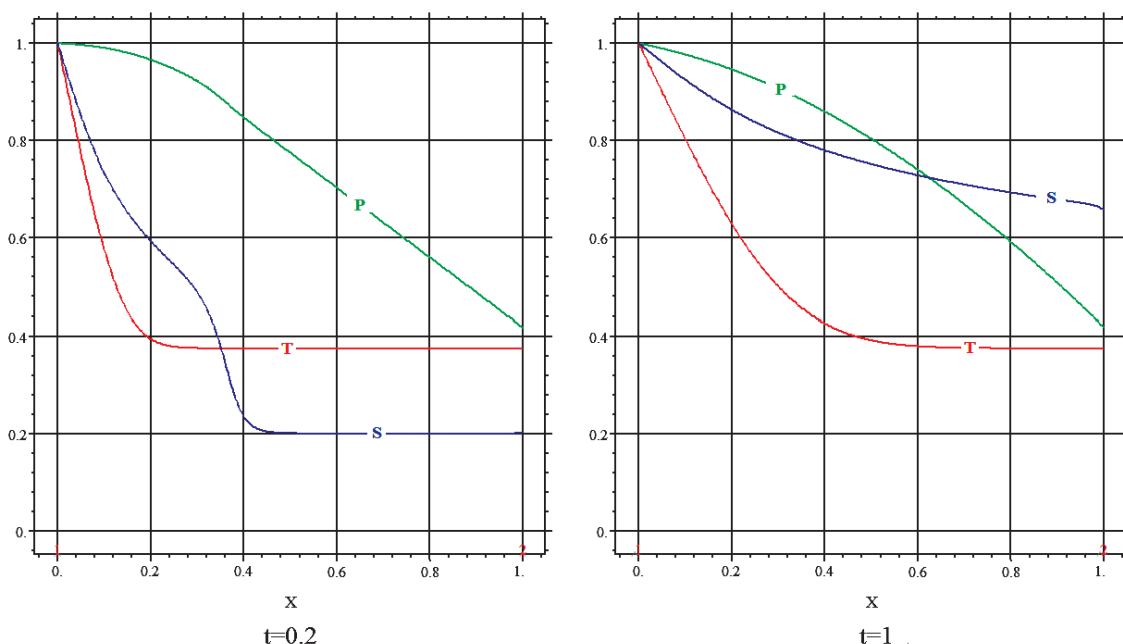


Рис. 4. Сравнение скоростей распространения волн давления (зеленая линия), насыщения (синяя) и тепловой (красная) в насыщенном пласте (время безразмерное).

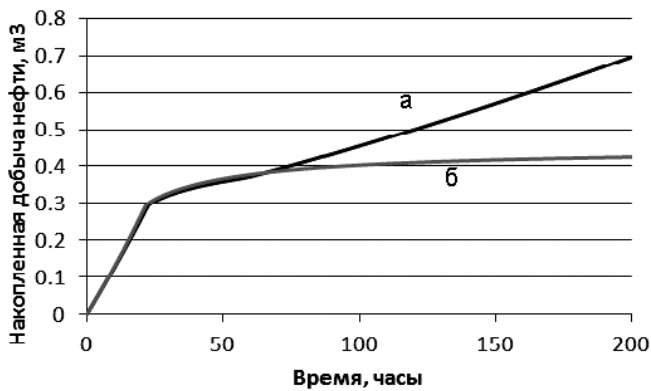


Рис. 5. Динамика изменения накопленной добычи нефти при вытеснении её водным раствором химически активного вещества а) в пласте, содержащем кероген; б) и в пласте без учета разложения керогена.

тера получаемых в результате воздействия (способа разработки) промысловых выходных данных (суммарный объем дополнительного притока, время его достижения) с параметрами, отражающими свойства пласта (например, нефтегенерационный потенциал керогена) и процесса флюидовытеснения (например, скорости продвижения фронта фаз). В частности, были определены зависимости времени разложения всей массы керогена, что соответствует реализации полного потенциала керогена в зависимости от скорости процесса разложения и от скорости закачки активного агента в пласт. Также была выявлена динамика изменения порового пространства, влияющая на изменение проводимости.

Следующим этапом моделирования было проведение ряда расчетов (математических экспериментов), целью которых являлось отслеживание динамики распространения в пласте волн давления и температуры, стимулируемых посредством волнового термо-газо-химического воздействия (Вольпин и др., 2014) с использованием бинарных смесей (на основе нитрата аммония). Модель позволила оценить диапазоны значений параметров процесса (давлений, объемов закачиваемых реагирующей и буферной жидкостей, удаленность зоны реакции и др.) при различной организации воздействия, знание которых необходимо для обеспечения безопасного режима проведения работ. С помощью модели можно «наблюдать» возникновение в пространстве зон сформировавшегося фильтрационного поля, с учетом анизотропии распределения фильтрационно-емкостных свойств, а также изменения пористости и абсолютной проницаемости в ходе протекания реакции преобразования керогена в жидкие углеводороды.

Отдельно проведен анализ изменения тепловых параметров породы при насыщении ее разными флюидами, результаты которого учтены в модели (Рис. 3). На рисунке 4 приведены результаты сравнения скоростей распространения волны давления, волны насыщения и тепловой волны. Как видим, давление устанавливается в пласте значительно быстрее двух других фронтов. Поэтому можно рассматривать волновую и тепловую задачу последовательно.

Проведено сравнение результатов фильтрации в инертном пласте и в керогеносодержащем пласте с учетом процессов разложения керогена с образованием подвижных углеводородов (Рис. 5).

Проведены расчеты, моделирующие реальные промышленные эксперименты по стимулированию нефтепритока путем термохимического воздействия на некоторых нефтяных месторождениях. Результаты моделирования показали качественное совпадение с результатами реальных промышленных экспериментов; обоснован стадийный подход к анализу моделируемого технологического процесса. На основе обобщения теоретических, экспериментальных и промысловых исследований по волновому, тепловому и взрывному воздействию на кероген обоснована возможность эффективного применения методов термо-газо-химического воздействия на керогеносодержащие пласты типа баженовской свиты (Dieva et al., 2015).

Литература

- Алекперов В.Ю., Грайфер В.И., Николаев Н.М. и др. Новый отчетный способ разработки месторождений баженовской свиты (часть 2). *Нефтяное хозяйство*. 2014. № 1. С. 50-53.
- Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геология и геохимия нефти и газа. М: Издательство Московского университета; Издательский центр «Академия». 2004. 415 с.
- Волков В.А., Олейник Е.В., Оксенойд Е.Е., Солопахина Л.А.. К вопросу о типе органического вещества пород баженовской свиты. *Вестник недропользователя*. 2016. № 28.
- Вольпин С.Г., Диева Н.Н., Кравченко М.Н. Построение модели процесса разработки керогеносодержащего коллектора. Повышение эффективности разработки нефтяных месторождений. *Сборник научных трудов ОАО «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт им.акад. А.П. Крылова»*. 2010. Вып. 143. С. 78-85.
- Вольпин С.Г., Сайтгареев А.Р., Смирнов Н.Н., Кравченко М.Н., Корнаева Д.А., Диева Н.Н. Перспективы применения волновой технологии термогазохимического воздействия для повышения нефтеотдачи пластов. *Нефтяное хозяйство*. 2014. № 1. С. 62-66.
- Вольф А.А., Петров А.А. Особенности инициирования процесса внутрислоевого горения в низкопроницаемых керогеносодержащих породах. *Нефтяное хозяйство*. 2006. № 4. С. 56-58.
- Карпов И.К., Зубков В.С., Степанов А.Н. и др. Термодинамический критерий метастабильного состояния углеводородов в земной коре и верхней мантии. *Геология и геофизика*. 1998. Вып. 39. № 11. С. 1518-1528.
- Каюкова Г.П., Киямова А.М., Косачев И.П. и др. Состав продуктов гидротермальной деструкции органического вещества доманиковых пород. *Материалы Всероссийской конференции «Нетрадиционные ресурсы углеводородов: распространение, генезис, прогнозы, перспективы развития»*. М: ГЕОС. 2013. С. 91-94.
- Ковешников А.Е. Геология нефти и газа. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2010. 114 с.
- Конторович А.Э., Трушков П.А., Фомичев А.С. Условия формирования залежей нефти и газа. Условия накопления и преобразования органического вещества в осадочных толщах. *Закономерности размещения и условия формирования залежей нефти и газа в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности*. М: Недра. 1972. С. 201-226.
- Коровина Т.А., Кропотова Е.П., Гульязев С.В. и др. Генетические аспекты формирования баженовской свиты и критерии прогноза ее промышленной продуктивности. *Материалы Всероссийской конференции «Нетрадиционные ресурсы углеводородов: распространение, генезис, прогнозы, перспективы развития»*. М: ГЕОС. 2013. С. 116-119.
- Кравченко М. Н. Скорости фазового перехода графита в алмаз. *В сб.: Исследование свойств вещества и экстремальных условиях*. М: ИВТАН. 1990. С. 206-209.
- Кравченко М.Н., Нигматулин Р. И. Исследование особенностей ударного сжатия графита в области полиморфных превращений. *Детонация и ударные волны*. Черногловка: ОИХФ АН СССР. 1986. С. 104-109.
- Нестеров И.И., Симоненко Б.Ф., Ларская Е.С., Калинин М.К., Рыльков А.В. Влияние температуры на количество и состав нафтидов при катагенезе ОБ (по экспериментальным данным). *Геология нефти и газа*. 1993 а. № 11. С. 26-30.
- Нестеров И.И., Симоненко Б.Ф., Ларская Е.С., Калинин М.К., Рыльков А.В. Влияние геостатического давления на образование углеводородных флюидов в процессе термокатализа ОБ (по экспериментальным данным). *Геология нефти и газа*. 1993 б. № 12. С. 22-25.
- Тарасова Е.В., Чебанов С.Н., Яхшибеков Ф.Р. Особенности рас-

предела поровых давлений в битуминозных аргиллитах баженовской свиты (верхнеюрские отложения, пласт ЮС0) на Ай-Пимском месторождении. *Каротажник*. 2012. № 10. С. 41-53.

Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти. М.: Мир. Редакция литературы по вопросам геологических наук. 1981. 504 с.

Чекалюк Э.Б. Термодинамическая устойчивость углеводородных систем в геотермодинамических условиях. *Дегазация Земли и геотехника*. М.: Наука. 1980. С. 267-274.

Bundy F.P. Direct conversion of graphite to diamond in static pressure apparatus. *J. Chem. Phys.* 1963. V. 38. No. 3. Pp. 618-631.

Dieva N.N., Dmitriev N.M., Kravchenko M.N., Muradov A.V. Possibility of Kerogen Decomposition Using Thermo-Gas Wave Stimulation in Bazhenov Formation. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia. 2015. SPE-176705-MS.

Сведения об авторах

Марина Николаевна Кравченко – доцент, кандидат физ.-мат. наук, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

Россия, 119991, Москва, Ленинский пр. 65, к.1

Тел: +7(903) 764-98-42, e-mail: dep.ngirg@yandex.ru

Николай Михайлович Дмитриев – доктор тех. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

Россия, 119991, Москва, Ленинский пр. 65, к.1

Тел: +7(925) 631-84-59, e-mail: nmdrgu@gmail.com

Александр Владимирович Мурадов – профессор, доктор тех. наук, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

Россия, 119991, Москва, Ленинский пр. 65, к.1

Тел: +7(499) 507-88-35

E-mail: konplyantseva.i@mail.ru

Нина Николаевна Диева – кандидат тех. наук, ассистент, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

Россия, 119991, Москва, Ленинский пр. 65, к.1

Тел: +7(917) 599-17-49

E-mail: ninadieva@bk.ru

Валентин Владимирович Герасимов – студент, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

Россия, 119991, Москва, Ленинский пр. 65, к.1

Тел: +7(915) 405-51-30

E-mail: gerasimovvalentin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16.10.2016

Innovative Development Methods of Kerogen-Bearing Reservoirs that Promote Oil Generating Potential

M.N. Kravchenko, N.M. Dmitriev, A.V. Muradov, N.N. Dieva, V.V. Gerasimov
Gubkin Russian State Oil and Gas University, Moscow, Russia

Abstract. In recent years, a very close attention is paid to the problem of search for development methods of Bazhenov Formation. For this purpose, there are at least three reasons. The first deals with the exhaustion of light oil. The second is due to a quantum leap in the knowledge of the geological and physical properties of reservoirs with reserves difficult to recover. Thirdly, the development of innovative technologies made it possible to develop deposits of unconventional hydrocarbons, which include heavy oil, oil of shale fields with low permeability.

Layers of the Bazhenov Formation are characterized by low porosity and permeability, heterogeneity of structure and composition, the presence of kerogen inclusions, high degree of anisotropy and low percentage of recoverable reserves. All this makes these layers to be the objects of study in the search for new technologies, which should take into account the need to change the structure of the reservoir, including its reservoir properties, to be carried out within the pressure and temperature corresponding to the zone of maximum generation. Experimental study of the kerogen properties, as the main source of additional generation of mobile hydrocarbons, allows not only to close the mathematical model, but also to numerically predict

the choice of the most optimal methods of development based on the experience of the combination of the wave, thermal and chemical methods for the development of conventional fields.

The authors conducted an analysis of the current state of research of low-permeability reservoirs, and laboratory experiments on the decomposition of kerogen, generation of mobile hydrocarbon phase. A mathematical model was built based on physical and chemical processes occurring under the influence of heat waves and high pressure waves generated in the reservoir when using thermochemical methods.

Keywords: unconventional hydrocarbons, kerogen, thermochemical methods, decomposition kinetics, mathematical modeling

References

Alekperov V.Yu., Grayfer V.I., Nikolaev N.M. et al. Novyy otechestvennyy sposob razrabotki mestorozhdeniy bazhenovskoy svity (chast' 2) [New Russian oil-recovery method for exploiting the Bazhenov formation's deposits (part 2)]. *Nefyanoe khozyaystvo = Oil Industry*. 2014. No. 1. Pp. 50-53. (In Russ.)

Bazhenova O.K., Burlin Yu.K., Sokolov B.A., Khain V.E. Geologiya i geokhimiya nefi i gaza [Geology and geochemistry of oil and gas]. Moscow: Publ. house Moscow State University; «Academia» Publ. Center. 2004. 415 p. (In Russ.)

Bundy F.P. Direct conversion of graphite to diamond in static pressure apparatus. *J. Chem. Phys.* 1963. V. 38. No. 3. Pp. 618-631.

Chekalyuk E.B. Termodinamicheskaya ustoychivost' uglevodorodnykh sistem v geotermodynamicheskikh usloviyakh [Thermodynamic stability of hydrocarbon systems in geotermodynamic conditions]. *Degazatsiya Zemli i geotekhnika* [Degassing of the Earth and geotechnics]. Moscow: Nauka Publ. 1980. Pp. 267-274. (In Russ.)

Dieva N.N., Dmitriev N.M., Kravchenko M.N., Muradov A.V. Possibility of Kerogen Decomposition Using Termo-Gas Wave Stimulation in Bazhenov Formation. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia. 2015. SPE-176705-MS

Karpov I.K., Zubkov V.S., Stepanov A.N. et al. Termodinamicheskii kriteriy metastabil'nogo sostoyaniya uglevodorodov v zemnoy kore i verkhney mантии [The thermodynamic criterion of the metastable state of hydrocarbons in the Earth's crust and upper mantle]. *Geologiya i geofizika = Geology and geophysics*. 1998. V. 39. No. 11. Pp. 1518-1528. (In Russ.)

Kayukova G.P., Kiyamova A.M., Kosachev I.P. et al. Sostav produktov gidrotermal'noy destruktivnoy organicheskogo veshchestva domanikovykh porod [Composition of the products of organic matter hydrothermal degradation of Domanik rocks]. *Sb. Netraditsionnye resursy uglevodorodov: rasprostraneniye, genezis, prognozy, perspektivy razvitiya* [Unconventional hydrocarbon resources: distribution, genesis, forecasts, prospects of development: Coll. papers]. Moscow: GEOS Publ. 2013. Pp. 91-94. (In Russ.)

Koveshnikov A.E. *Geologiya nefi i gaza* [Oil and Gas Geology]. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University. 2010. 114 p. (In Russ.)

Kontorovich A.E., Trushkov P.A., Fomichev A.S. Usloviya formirovaniya zalezhey nefi i gaza. Usloviya nakopleniya i preobrazovaniya organicheskogo veshchestva v osadochnykh tolschakh [Formation conditions of oil and gas deposits. Terms of accumulation and transformation of organic matter in sedimentary sequences]. *Zakonomernosti razmesheniya i usloviya formirovaniya zalezhey nefi i gaza v mezozoysskikh otlozheniyakh Zapadno-Sibirskoy nizmennosti* [Laws of location and accumulation conditions of oil and gas deposits in Mesozoic sediments of the West Siberian Plain]. Moscow: Nedra Publ. 1972. Pp. 201-226. (In Russ.)

Korovina T.A., Kropotova E.P., Gul'tyaev S.V. et al. Geneticheskie aspekty formirovaniya bazhenovskoy svity i kriterii prognoza ee promyshlennoy produktivnosti [Genetic aspects of generation of Bazhenov Formation and prediction criterion of its productivity]. *Sb. Netraditsionnye resursy uglevodorodov: rasprostraneniye, genezis, prognozy, perspektivy razvitiya* [Unconventional hydrocarbon resources: distribution, genesis, forecasts, prospects of development: Coll. papers]. Moscow: GEOS Publ. 2013. Pp. 116-119. (In Russ.)

Kravchenko M. N. Skorosti fazovogo perekhoda grafita v almaz [Transition speeds of graphite into diamond]. *Sb. Issledovanie svoystv veshchestva i ekstremal'nykh usloviyakh* [Study of matter properties in extreme conditions]. Moscow: IVTAN Publ. 1990. Pp. 206-209. (In Russ.)

Kravchenko M.N. Nigmatulin R. I. Issledovanie osobennostey udarnogo szhatiya grafita v oblasti polimorfnykh prevrascheniy [Study of graphite shock compression features in the polymorphic transformations area]. *Detonatsiya i udarmye volny* [Detonation and shock waves]. Chernogolovka: OIkhF AN SSSR. 1986. Pp. 104-109. (In Russ.)

Nesterov I.I., Simonenko B.F., Larskaya E.S., Kalinko M.K., Ryl'kov A.V. Vliyanie temperatury na kolichestvo i sostav naftidov pri katagenezе OV (po eksperimental'nym dannym) [Effect of temperature on the quantity and composition of naphthides during katagenesis of organic matter (by experimental data)]. *Geologiya nefi i gaza = Geology of oil and gas*. 1993 a. No. 11. Pp. 26-30. (In Russ.)

Nesterov I.I., Simonenko B.F., Larskaya E.S., Kalinko M.K., Ryl'kov A.V. Vliyanie geostaticeskogo davleniya na obrazovanie uglevodorodnykh flyuidov v protsesse termokataliza OV (po eksperimental'nym dannym) [Influence of geostatic pressure on the generation of hydrocarbon fluids during termokatalysis of organic matter (by experimental data)]. *Geologiya nefi i gaza = Geology of oil and gas*. 1993 b. No. 12. Pp. 22-25. (In Russ.)

Tarasova E.V., Chebanov S.N., Yakhshibekov F.R. Osobennosti raspredeleniya porovykh davleniy v bituminoznykh argillitakh bazhenovskoy svity (verkhneyurskie otlozheniya, plast YuS0) na Ay-Pimskom mestorozhdenii [Peculiarities of pore pressure distribution in bituminous argillites of bazhenovskaya suite (Upper jurassic sediments, formation YuS0), Ai-Pimskoe field]. *Karotazhnik*. 2012. No. 10. Pp. 41-53. (In Russ.)

Tisso B., Vel'te D. Obrazovanie i rasprostraneniye nefi [Generation and distribution of oil]. Moscow: Mir Publ. 1981. 504 p. (In Russ.)

Volkov V.A., Oleynik E.V., Oksenoyd E.E., Solopakhina L.A. K voprosu o tipe organicheskogo veshchestva porod bazhenovskoy svity [The question of type of organic matter of Bazhenov Formation rocks]. *Vestnik nedropol'zovatelya = Bulletin of the subsoil user*. 2016. No. 28. <http://www.oilnews.ru/28-28/k-voprosu-o-tipe-organicheskogo-veshchestva-porod-bazhenovskoy-svity>. (In Russ.)

Vol'pin S.G., Dieva N.N., Kravchenko M.N. Postroeniye modeli protsessа razrabotki kerogenosoderzhaschego kollektora [Model building of the development of kerogen containing collector]. *Sbornik nauchnykh trudov OAO «Vserossiyskiy neftegazovyy nauchno-issledovatel'skiy institut im. akad. A.P. Krylova»: Povysheniye effektivnosti razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy* [Proceedings of OAO «VNIIneft»: Improving the efficiency of oil field development]. 2010. Issue 143. Pp. 78-85. (In Russ.)

Vol'pin S.G., Saitgareev A.R., Smirnov N.N., Kravchenko M.N., Kornaeva D.A., Dieva N.N. Perspektivy primeneniya volnovoy tekhnologii termogazokhimicheskogo vozdeystviya dlya povysheniya nefteodachi plastov [Application prospects of wave technology of thermal-gas-chemical formation treatment for oil recovery enhancement]. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*. 2014. No. 1. Pp. 62-66. (In Russ.)

Vol'f A.A., Petrov A.A. Osobennosti initsirovaniya protsessа vnutriplastovogo goreniya v nizkopronitsaemykh kerogenosoderzhaschikh porodakh [Initiation features of in-situ combustion process in low permeability kerogen containing rocks]. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*. 2006. No. 4. Pp. 56-58. (In Russ.)

For citation: Kravchenko M.N., Dmitriev N.M., Muradov A.V., Dieva N.N., Gerasimov V.V. Innovative Development Methods of Kerogen-Bearing Reservoirs that Promote Oil Generating Potential. *Georesursy = Georesources*. 2016. V. 18. No. 4. Part 2. Pp. 330-336. DOI: 10.18599/grs.18.4.12

Information about authors

Marina N. Kravchenko – Associate Professor, PhD in Physics and Mathematics, Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Russia, 119991, Moscow, Leninskiy pr. 65, buil.1

Phone: +7(903) 764-98-42

E-mail: dep.ngipg@yandex.ru

Nikolay M. Dmitriev – Professor, DSc in Engineering, Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Russia, 119991, Moscow, Leninskiy pr. 65, buil.1

Phone: +7(925) 631-84-59

E-mail: nmdrgu@gmail.com

Aleksandr V. Muradov – Professor, DSc in Engineering, Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Russia, 119991, Moscow, Leninskiy pr. 65, buil.1

Phone: +7(499) 507-88-35

E-mail: konoplyantseva.i@mail.ru

Nina N. Dieva – PhD in Engineering, Assistant, Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Russia, 119991, Moscow, Leninskiy pr. 65, buil.1

Phone: +7(917) 599-17-49

E-mail: ninadieva@bk.ru

Valentin V. Gerasimov – Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Russia, 119991, Moscow, Leninskiy pr. 65, buil.1

Phone: +7(915) 405-51-30

E-mail: gerasimovvalentin@yandex.ru

Manuscript received October 16, 2016