

Белоновская Л.Г.

ТРЕЩИНОВАТОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД И РАЗРАБОТАННЫЕ ВО ВНИГРИ ОСНОВЫ ПОИСКОВ ТРЕЩИННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА

В кратком виде рассмотрена история возникновения и развития учения о трещинных коллекторах в стенах ВНИГРИ в 50х – 80х годах прошлого века, изложены основные положения этого учения и показаны научные и практические достижения, полученные благодаря комплексному подходу к изучению проблемы большого коллектива сотрудников ВНИГРИ под руководством профессора Е.М. Смехова.

Ключевые слова: трещиноватость, трещинные коллектора, микротрещины, нефтеотдача, низкопористые породы.

Трещиноватость пород, являясь повсеместным природным явлением, была издавна предметом изучения при структурном анализе, гидрогеологических, шахтных и других видах технических работ прикладного характера. В нефтяной же геологии этому явлению долгое время не уделялось должного внимания, хотя влияние трещин на нефтеотдачу неоднократно подчеркивалось в западной литературе уже с 40 - 50х гг. прошлого века в связи с открытием месторождений в плотных трещиноватых породах, и в частности, в таких известных, как крупнейшее месторождение в Иране, связанные с карбонатной формацией Асмари, месторождения в западном Техасе, приуроченные к уникальной формации Спраббери и др.

Более позднее освоение месторождений в трещиноватых породах – коллекторах в СССР объясняется тем, что поисковые и разведочные работы долгие годы были направлены практически исключительно на поиски коллекторов порового типа, каковыми явились преимущественно песчаники (старейшие месторождения в Баку, Грозном и др.). Поиски и разведка месторождений в карбонатных породах также регламентировалась наличием высокопористых отложений в перспективных горизонтах.

В СССР наиболее ранние сведения о влиянии трещин на нефтедобычу получены при разведке и разработке Карлинского (1941 г.), Кинзебулатовского (1943 г.) месторождений в Башкирии. В обоих случаях нефтеносными оказались плотные известняки сакмаро–артинского возраста нижней перми, из которых промышленные притоки получались лишь в случаях их сильной разработанности вертикальными трещинами.

Десятилетие спустя (1953 – 1954 гг.) грандиозными фонтанами были открыты сначала в Дагестане (Селли, Гаша), затем в Чечено–Ингушетии (Карабулак) месторождения нефти. Нефтенасыщенной оказалась 300 – 500 м толща светлых, слоистых, мелкозернистых,

плотных, сильно трещиноватых известняков верхнего мела, до этого считавшихся бесперспективными для поисков (фото 1 - 3).



Фото 1. Северо-Кавказская НГП. Трещиноватость позднемеловых тонкозернистых известняков в обнажениях



Фото 2. Северо-Кавказская НГП. Трещиноватость позднемеловых тонкозернистых известняков в обнажениях

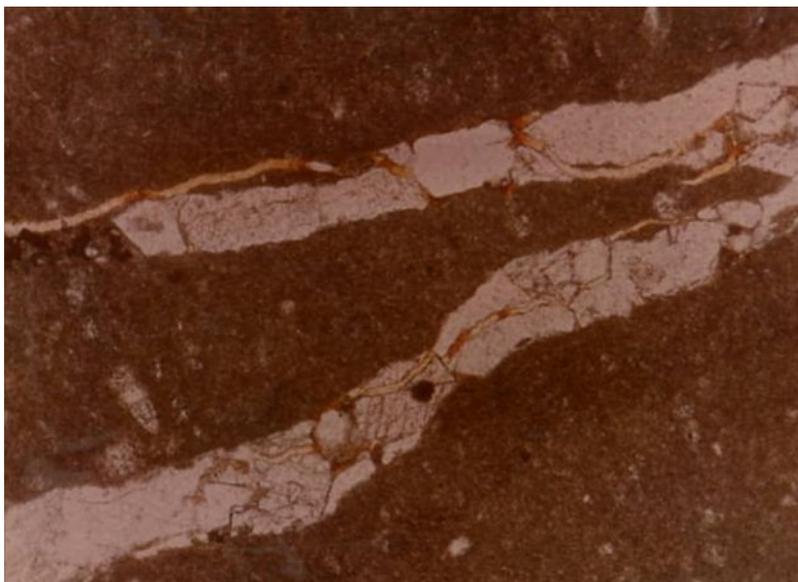


Фото 3. Месторождение Карабулак-Аголуки (Северо-Кавказское НГП)

В продуктивных позднемеловых (маастрихт) тонкозернистых известняках наблюдаются многочисленные минеральные трещины, заполненные средне – крупнозернистым кальцитом, внутри которых и рассекая их проходят тонкие открытые трещины с примазками желтого битума. Скв. 30, гл. 2261 – 2265 м, шлиф, увел. 30^x.

Таким образом, в связи с открытием ряда месторождений в трещиноватых карбонатных породах с изменчивыми или низкими коллекторскими свойствами, которые не поддавались изучению традиционными методами, в 50 – 60х гг. прошлого века стала вырисовываться новая проблема в нефтяной геологии – исследование пород, возможных коллекторов нефти и газа, отличительным свойством которых была высокая трещиноватость. Такая проблема, впервые в Союзе, была поставлена во ВНИГРИ в 1954 г. Под руководством профессора Е.М. Смехова был создан сектор трещинных коллекторов, в который входили специалисты разного профиля: помимо геологов, здесь работали литологии, геофизики, гидродинамики, гидрогеологи, математики. Исследования в целом были направлены на разработку теоретических и методических основ поисков коллекторов, у которых трещиноватость существенным образом влияет на их ёмкостно–фильтрационные свойства. В процессе работы эта разновидность коллекторов получила название «трещинных».

На первых этапах работы велись по изучению трещиноватости в хорошо обнаженных районах страны с целью выявления закономерностей их ориентировки, густоты, морфологии и других особенностей. Уже в 1956 г. Е.М. Смеховым и М.Г. Ромашовой (Рожковой) на основании полевых работ в Южно–Минусинской впадине и Средней Азии была составлена временная инструкция для сбора данных о трещиноватости пород в поле и их камеральной обработке.

Трещиноватость пород в обнажениях изучалась в Восточных Карпатах, Узбекистане, Туркмении, Урало–Поволжье, Прибалтике (отряд Т.В. Дорофеевой), в Иркутском амфитеатре и Ср. Азии (отряд В.Н. Калачевой), в Татарии и Башкирии (отряд В.К. Громова), на Северном Кавказе (отряд М.Х. Булач). Затем выявленные закономерности переносились на закрытые территории.

В 1962 г. под редакцией Е.М. Смехова и М.Х. Булач вышло первое методическое пособие по изучению трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа, представлявшее собой итог комплексных методических исследований за период 1955 – 1962 гг. В нем систематизированы сведения, касающиеся сбора фактического материала, его камеральной обработки и способов графического изображения результатов исследования. Особое внимание уделено геофизическим и петрографическим методам исследования трещинных коллекторов. В методическом пособии впервые в краткой форме изложены основные теоретические предпосылки, вошедшие в учение о трещинных коллекторах, и намечены задачи для дальнейших исследований.

По мере расширения круга исследований, к работе стали привлекаться гидродинамические, лабораторные и промысловые исследования, а при обработке материала использоваться основы математической статистики.

Проведение комплексных исследований позволило решить ряд теоретических и прикладных задач нефтяной промышленности. Так, исследования Е.С. Ромма о соотношении между капиллярными каналами коллектора и субкапиллярными пустотами показали, что «связанная» вода в коллекторах обязана не силам молекулярного притяжения, а наличию капиллярных сил и тупиковых пор. Это позволило более объективно оценивать величины коэффициентов нефтенасыщенности и нефтеотдачи коллекторов. В результате исследований фильтрации в анизотропном трещинном коллекторе Б.В. Позиненко была установлена возможность анализа движения жидкости к скважине в подобных условиях. Выяснено, что в формуле Дарси роль коэффициента проницаемости выполняет тензор с компонентами – параметрами трещиноватости, определяемыми непосредственными визуальными геологическими наблюдениями.

Совместные лабораторные гидродинамические исследования проницаемости жидкости в тонких и сверхтонких щелях Е.С. Ромма и литологические исследования Л.П. Гмид в больших петрографических шлифах заложили теоретическую основу метода больших шлифов ВНИГРИ, не потерявшего своего значения и поныне. Этот метод, помимо того, что позволяет более точно судить о структуре и генезисе порового пространства породы, дает возможность получить качественные, а при представительном фактическом материале и

количественные параметры трещинного коллектора – его трещинную проницаемость, а также объемную плотность трещин и трещинную пористость. Для их определения Е.С. Роммом были предложены нижеследующие формулы, в которые входят коэффициенты, рассчитанные для различных случаев геометрии систем трещин, в том числе для бессистемной трещиноватости.

$$K_T = A \frac{b^3 l}{S} ; m_T = \frac{b l}{S} ; T = B \frac{1}{S} ;$$

где: K_T – трещинная проницаемость мД

m_T – трещинная пористость, %

T – плотность трещин, 1/м

b – раскрытость трещин, мкм

l – Суммарная длина трещин, мм

S – Площадь шлифа, мм²

} измеряются в шлифах

A – коэффициент, вводимый при подсчете проницаемости, величина которого зависит от геометрии систем трещин:

- при двух взаимно перпендикулярных системах вертикальных (по отношению к слоистости) трещин $A = 1,71 \cdot 10^6$;

- при трех системах взаимно перпендикулярных трещин $A = 2,28 \cdot 10^6$;

- при одной системе горизонтальных (по отношению к слоистости) трещин $A = 3,42 \cdot 10^6$;

- в случае хаотического расположения трещин $A = 1,71 \cdot 10^6$

Обоснование коэффициентов приведено в работе Е.С. Ромма [1966].

Позднее, основываясь на этих формулах, а также опираясь на обширный материал и выявленные закономерности развития трещин разного генезиса, величины их раскрытости на глубине, зависимости плотности трещин от литологии вмещающих слоев и их толщин, был разработан экспресс – метод определения трещинной проницаемости и пористости по рассчитанным таблицам и номограммам [Белонин и др., 2005].

Исследования анизотропии удельного электрического сопротивления, начатые И.И. Горюновым, позволили установить его связь с трещиноватостью, что, в свою очередь, позволило ориентироваться при выборе точек для заложения разведочных и эксплуатационных скважин [Смехов, Горюнов, Ромм, 1959].

Применение методов математической статистики позволило Л.Д. Кнорингу устанавливать ряд зависимостей в развитии и ориентировке трещин.

По мере накопления фактического материала, расширились и методические исследования трещиноватости. К ним присоединились такие организации, как, МГУ, ВНИГНИ, ГрозНИИ, Гипровостокнефть, Востсибнефтегеология и др.

В 1969 г. во ВНИГРИ вышло второе издание методики изучения трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа, расширенное за счет проведения комплексных исследований [Методические рекомендации..., 1989].

Изучение трещиноватости в различных геологических условиях позволило устанавливать связь между параметрами трещиноватости и основными геологическими факторами (тектоническая напряженность, вещественный состав пород, толщина вмещающего слоя, ориентировка основных тектонических напряжений и др.), изучить распределения системы трещин и их густоту на локальных структурах в складчатых и платформенных областях и в зонах дизъюнктивных нарушений [Белоновская, Дорофеева, 1982].

Значительное место в изучении трещиноватых пород – коллекторов было отведено литолого-петрографическим исследованиям, направленным на оценку влияния литологического фактора на коллекторские свойства трещиноватых пород, проводимых под руководством Л.П. Гмид.

Особенно плодотворным оказалось разработанное под руководством Е.М. Смехова учение о микротрещинах, оказывающих существенное, а иногда и определяющее влияние на фильтрацию УВ в низкопоровых породах. Это учение, базирующееся на огромном и разнообразном фактическом материале, на теоретических и экспериментальных исследованиях движения жидкостей и газов в тонких и сверхтонких щелях, и явилось основой для разработки теории определения в больших шлифах параметров трещиноватости для различных случаев геометрии систем трещин – метода больших шлифов ВНИГРИ, о котором уже говорилось выше. Этот метод, несмотря на критику, до сих пор является единственным методом прямого определения параметров трещиноватости и других показателей трещинного коллектора. Рациональность его применения подтверждена Е.С. Роммом в 1991 г. результатами сравнительного анализа величин трещинной проницаемости, определенной методом шлифов, и гидродинамическими исследованиями.

В 1974 г. Е.М. Смеховым была издана монография «Теоретические и методические основы поисков трещинных коллекторов нефти и газа», где обобщены имеющиеся на то время разработки, проводившиеся в секторе коллективом сотрудников (в алфавитном порядке): М.Х. Булач (зам. зав. сектором, впоследствии зав. сектором трещинных коллекторов), Л.Г. Белоновской (геолог) Л.П. Гмид, И.И. Горюновым, В.К. Громовым, В.Н.

Дечем (геофизик), Т.В. Дорофеевой, В.Н. Калачевой, Ю.Ф. Клейносовым (промысловый геолог), Л.Д. Кнорингом, С.Ш. Леви (литолог), Г.В. Петровой (лабораторные исследования физических свойств пород), Б.В. Позиненко, Е.С. Ромом, Г.И. Сергеевой (физик), С.К. Стетюха–Лопатиной (геолог), И.В. Татариновым (математическая геология). В этой монографии рассмотрены вопросы происхождения и механизма образования трещиноватости, а также закономерности ее развития. Подробно освещены основные положения учения о трещинных коллекторах, вопросы классификации и терминологии трещинных коллекторов, особенности фильтрации в них флюидов. Значительное место отведено обсуждению роли постседиментационных преобразований пород в формировании емкости трещинных коллекторов. Обсуждаются современные методы определения коллекторских свойств трещиноватых пород и особенности подсчета в них запасов нефти и газа.

На основании проведенных комплексных исследований была предложена модель трещинного коллектора, базирующаяся на учении о микротрещинах и их преимущественном развитии на глубине. По этой модели трещинный коллектор представляет горную породу, рассеченную системами микротрещин на многочисленные блоки. Проницаемость такого коллектора обусловлена, в основном, межблоковым пространством (микротрещины и возможно редкие макротрещины), а емкость – пустотами первичного и вторичного происхождения в блоках матрицы, а также приуроченных к трещинам. Малое раскрытие микротрещин, исчисляемое первыми десятками микрон, обеспечивает фильтрацию в коллекторе и притоки, нередко значительные, в скважинах.

В 1986 г. в издательстве «Недра» вышла монография Т.В. Дорофеевой «Тектоническая трещиноватость горных пород и условия формирования трещинных коллекторов нефти и газа», явившаяся, по сути, содержанием ее докторской диссертации. В ней автор, основываясь на материалах своих многолетних исследований трещиноватости в различных регионах Советского Союза и за рубежом, рассматривает взаимосвязь между тектонической трещиноватостью и трещинными коллекторами нефти и газа, приводит фактические данные о качественных и количественных характеристиках трещиноватости в различных геоструктурных зонах, рассматривает закономерности распределения трещиноватости в осадочном чехле. Опираясь на разработки, проведенные в секторе, Т.В. Дорофеева дает региональную оценку территорий, предпочтительных для поисков зон трещинных коллекторов, указывает на факторы, обуславливающие развитие трещинного коллектора.

В дальнейшем основной упор делался на изучение коллекторских свойств карбонатных пород, т.к. именно в них трещиноватость часто является определяющей не только в их

проницаемости, но и в формировании их емкости. Такой коллектор, где фильтрация флюидов происходит в двух средах – в матрице и в трещинах, получил название сложного коллектора. Именно с такими коллекторами геологи стали все чаще сталкиваться при открытии новых месторождений.

За прошедшие годы после написания второго методического пособия по изучению трещиноватости, накопилось много новых данных по изучению сложных коллекторов, влиянию на их формирование и коллекторские характеристики трещиноватости. Во ВНИГРИ, ВНИГНИ и других организациях разработаны новые методы изучения и оценки сложных коллекторов, в которых трещиноватость оказывает существенное (а иногда и определяющее) влияние на формирование их ФЕС. Появилась необходимость обобщения полученных результатов на новом уровне разработанности проблемы в целом. В 1989 г. уже под редакцией М.Х. Булач и Л.Г. Белоновской во ВНИГРИ вышли методические рекомендации по изучению и прогнозу коллекторов нефти и газа сложного типа, которые включали в себя основные наработки первых двух рекомендаций по изучению трещиноватости, а также были существенно расширены за счет разбора методов изучения и прогноза сложных (порово–трещинных или трещинно-поровых) коллекторов. В работе рассматривается влияние литологических, тектонических и гидрогеохимических (автор В.Н. Озябкин) факторов, влияющих на формирование сложных коллекторов, рассматриваются литолого-петрографические, лабораторные (автор Т.В. Яковлева, Г.В. Петрова, М.О. Ковалевский, Н. Л. Кучинская), гидродинамические (автор Б.В. Позиненко, И.А. Волков), промыслово-геофизические методы изучения сложных коллекторов, оценочно-генетическая характеристика пустотного пространства коллекторов сложного типа, генетическая классификация трещиноватости, нацеленная на поиски зон повышенной трещиноватости, рассматриваются породы-коллекторы и породы-покрышки на больших глубинах, а также методы построения прогнозных карт сложных коллекторов. Здесь же приведена усовершенствованная принципиальная схема классификации коллекторов нефти и газа, в которой широко использованы результаты гидродинамических исследований в качестве поисковых признаков различного класса коллектора (табл. 1). В этой схеме показано место трещинных коллекторов среди многообразия природных резервуаров и специфика их фильтрационно-емкостных свойств.

В предложенной схеме, в отличие от существующих многочисленных классификаций коллекторов, для отношения коллектора к тому или иному классу определяющим является не значение пористости, а условия фильтрации, то есть проницаемость породы.

Принципиальная схема классификации коллекторов нефти и газа (1985)

Тип коллектора	Класс коллектора	Критерии классификации			Гидродинамические характеристики		
		Полезная емкость	Условия фильтрации	Распределение физических свойств	Кривая продуктивности (КП)	Кривая восстановления давления (КВД)	
простой	поровый	Поры и (или) каверны (m_p)		Поровая проницаемость (K_p) и пьезопроводимость (χ)	Изотропность	Прямая линия	Прямая линия
сложный	Трещинно-поровый	Емкость пор несопоставимо превышает емкость трещин ($m_p \gg m_T$)		Поровая и трещинная проницаемость сопоставимы ($K_p \approx K_T$) Трещинная пьезопроводимость превышает поровую ($\chi_T > \chi_p$)	Слабо выраженная анизотропность	Слабо выгнутая к оси депрессий	Намечается излом в области малых значений времени
	Макро неоднородный	Поры и каверны	Емкость пор несопоставимо превышает емкость трещин ($m_p \gg m_T$)	Трещинная проницаемость и пьезопроводимость преобладают над поровой ($K_T \gg K_p$; $\chi_T \gg \chi_p$)	Анизотропность, в том числе ярко выраженная	Выгнутость к оси депрессий может быть сильно выражено	На КВД намечается излом
			Пористость высокопроводящего слоя толщиной h_1 намного меньше пористости аккумулирующего слоя толщиной h_2 ($m_p h_1 \ll m_p h_2$)	Поровая проницаемость и пьезопроводимость составляющих слоев (сред) значительно отличаются друг от друга	Анизотропность по разрезу	Прямая линия	Излом на поздней стадии процесса восстановления давления
простой	трещинный	Трещины и пустоты расширения вдоль них (m_T)		Трещинная проницаемость и пьезопроводимость (K_T ; χ_T)	Анизотропность, в том числе ярко выраженная	Вогнутость к оси депрессий может быть сильно выражена	Прямая линия

Центральное место в классификации занимают классы сложных коллекторов: трещинно – поровые, порово – трещинные и макронеоднородные.

Под последним подразумевается совокупность пластов с резко различающимися коллекторскими свойствами, примером которых могут служить низкопористые и слабопроницаемые пласты довольно большой мощности (десятки метров) с пропластками хорошо проницаемых и пористых пород (например, карбонатные породы венда Непско-Ботуобинской НГО). Указанные коллекторы, в отличие от поровых, характеризуются двумя фильтрационными сферами: блоковой (пористая матрица) и межблоковой (фильтрующие трещины) одновременно существующими и гидродинамическими непрерывно между собой связанными.

В настоящее время, в связи с трудностями открытия новых крупных месторождений в высокопористых коллекторах, все больше внимания уделяется плотным, низкопористым породам, роль повышенной трещиноватости в которых является часто первостепенной. Именно поэтому методику целесообразно более активно использовать при изучении карбонатных и терригенных коллекторов нефтегазоносных провинций России.

Литература

Белонин М.Д., Белоновская Л.Г., Булач М.Х., Гмид Л.П., Шиманский В.В. Карбонатные породы – коллекторы фанерозоя нефтегазоносных бассейнов России и её сопредельных территорий. В 2-х т. СПб., Недра, 2005.

Белоновская Л.Г., Дорофеева Т.В. Зоны дизъюнктивных нарушений как возможные коллекторы нефти и газа. В сб. Нетрадиционные источники углеводородов. Л., Тр. ВНИГРИ, 1982. С. 59 -71.

Булач М.Х. О трещиноватости меловых отложений Чечено-Ингушской АССР в связи с изучением их коллекторских свойств. Л., Тр. ВНИГРИ, вып. 165, 1961. С. 89 - 128.

Гмид Л.П. Результаты литолого-петрографического исследования трещиноватых пород Башкирского Приуралья, Южно-Минусинской впадины и Иркутского амфитеатра. Л., Тр. ВНИГРИ, вып. 121, 1958.

Дорофеева Т.В. Тектоническая трещиноватость горных пород и условия формирования трещинных коллекторов нефти и газа Л., Недра, 1986, 222 с.

Калачева В.Н. Некоторые данные о трещиноватых породах нижнего кембрия Иркутского амфитеатра и их коллекторские свойства. Л., Тр. ВНИГРИ, вып. 121, 1958.

Методическое пособие по изучению трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа. Л., Гостоптехиздат, 1962.

Методические рекомендации по изучению и прогнозу коллекторов нефти и газа сложного типа. Л., ВНИГРИ, 1989.

Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М., Недра, 1966.

Смехов Е.М. Закономерности развития трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа. Л., Гостоптехиздат, 1961, 146 с.

Смехов Е.М. Теоретические и методические основы поисков трещинных коллекторов нефти и газа. Л., Недра, 1974, 200 с.

Смехов Е.М., Горюнов И.И., Ромм Е.С. Опыт методических исследований трещинных коллекторов нефти и газа и пути их практического применения. Л., Тр. ВНИГРИ, вып. 144, Гостоптехиздат, 1959.

Рецензент: Танинская Надежда Владимировна, доктор геолого-минералогических наук.