ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И РЯДА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОЯВЛЕНИЙ В НЕФТЕГАЗОДОБЫЧЕ

В.И.Графутин[1], Е.П.Прокопьев[1,2], С.П.Тимошенков[2], Ю.В.Фунтиков[1], Ю.А.Чаплыгин[2]
[1]ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И.Алиханова, ул. Б.Черемушкинская,25, 117218, Москва, Россия
e-mail: epprokopiev@mail.ru
[2]Московский государственный институт электронной техники (МИЭТ), Зеленоград, проезд 4806, д. 5, 124498, Москва, Россия

Как утверждается в [1-5], к нефтегазовым нанотехнологиям относятся технологии управления теми наноявлениями, которые определяют извлечение углеводородов из недр. Это прежде всего физико-химические наноявления в геологических средах (телах), пластовых флюидах и промысловом оборудовании при разработке и эксплуатации нефтегазовых залежей. Известно, что эффективность нефтеизвлечения характеризуется коэффициентом извлечения нефти (КИН) от находящейся в пласте ее количества (запасов) [1,2]. При современных технологиях методов закачки воды в пласт для вытеснения нефти (А.П.Крылов и др.) КИН для ряда месторождений достигает величин 0,4-0,5. В настоящее время структура запасов нефти значительно ухудшилась (около 65 % оставшихся запасов являются трудноизвлекаемыми). В России значения КИН в них при заводнении составляют 0,1-0,3.

В то же время развитые с использованием современных технологий и нанотехнологий для трудноизвлекаемых запасов КИН нефти достигли значений 0,4. Исследования динамики изменений значений КИН показали, что для микроструктуры нефтегазовых месторождений (пород) важными показателями являются общая пористость и проницаемость. Прямой связи общей пористости с проницаемостью нет, но существует корреляционная связь между пористостью и проницаемостью. С повышением общей пористости повышается проницаемость породы, за счет увеличения эффективной пористости и увеличения количества крупных пор. Это приводит к резкому увеличению величин КИН при закачке воды и других специальных растворов для вытеснения нефти из пластов пород. Особая роль развития нанотехнологий становится необходимой при освоения нанорезервуаров (наноколлекторов) – например, нефтяных пластов баженовской свиты Сибири, газовых и метанугольных пластов с наноразмерными поровыми каналами. Говорится [1], что в баженовской свите (основной кладовой российских углеводородов) средний радиус пор равен 1-10 нм, что всего в несколько раз больше размеров молекул.

Согласно [4,5], ставшие традиционными определения термина «нанотехнологии» в Национальной нанотехнологической инициативе США, Королевском общество инженеров Великобритании, «РОСНАНО» и других, следует признать суть этих определений: «нанотехнологический подход означает целенаправленное регулирование на молекулярном уровне свойств объектов, определяющих их фундаментальные параметры».

Кроме напосредственно наноразмерных частиц, нанообъектами являются поверхностные наноструктуры (ямки, выступы, канавки, стенки), объемные наноструктуры (поры и капилляры). К объектам исследований нанонауки также относятся ультрадисперсные системы, в том числе глины, аэрозоли, мицеллярные коллоидные растворы, полимерные золи и гели, а также капиллярные и ионнообменные явления. Умение управлять этими объектами принципиально важно для повышения

коэффициента извлечения нефти (КИН).

Указывается [1-5], что технологический прогресс по добыче углеводородов в России не удовлетворяет современным требованиям и нужно его улучшить. Проведенные исследования показали принципиальную роль наноявлений смачивания и ионного обмена в системе «нефть-газ-вода-порода», которые значительно изменяют распределения нефте- и водо- насыщенностей в пористых средах в отличие от традиционных представлений, и, естественно, показатели разработки месторождений.

Выше уже упоминали, что большую роль в добыче нефти в скором времени станут играть наноколлектора (т.е. коллекторы с размерами пор менее 100 нм), и для их разработки потребуются технологии, учитывающие наноразмер порового пространства. Так, залежи нефти баженовской свиты Западной Сибири, в которых еще не завершены процессы преобразования органического вещества (керогена) в подвижные углеводороды, имеют геологические ресурсы углеводородов более 100 млрд. тонн. Основная часть углеводородов сосредоточена в коллекторе со средним радиусом пор 8-25 нм. КИН при традиционных способах – 0,03-0,05, что нерентабельно. КИН при нанотехнологиях может составить более 0,3. В этом случае потенциал прироста извлекаемых запасов нефти превысит 30 млрд. тонн.

Другой пример наноколлектора – уголь [4,5]. В недрах угольных бассейнов сосредоточены значительные ресурсы спутника угля – метана, соизмеримые с ресурсами газа традиционных месторождений мира. Угольные бассейны следует рассматривать как метаноугольные, подлежащие комплексному поэтапному освоению, с опережающей широкомасштабной добычей метана (в том числе для безопасной добычи угля). В угле много пор диаметром менее 10 нм. Поэтому уголь является наноколлектором природного газа, и борьба с выбросами природного газа и его добыча должны ориентироваться на работу с наноразмерными порами: закачка реагентов для смачивания угля, если не учитывать наноразмер пор при выборе химреагентов, пройдет только по трещинам и открытым порам. Возможно поэтому и происходят катастрофы на угольных шахтах.

Особенно важным для КИН является учет наноразмерной формы поверхности пор, поскольку она влияет на капиллярный гистерезис в системе «нефть-газ-вода-порода», определяющий эффективность вытеснения нефти. Целенаправленным изменением структуры наноразмерных минеральных фаз коллектора можно увеличить КИН за счет уменьшения итогового значения капиллярного гистерезиса. Этот вывод создает основы прикладной наноминералогии.

Внедрение уже запатентованных нанотехнологий может обеспечить увеличение КИН до 0,45-0,50 (в 1,5-1,7 раза больше, чем ныне достигаемые 0,30-0,35), а их развитие – до 0,60-0,65. При этом КИН для традиционных запасов увеличиться на 0,20-0,25 до 0,60-0,70, для трудноизвлекаемых запасов – увеличение КИН составит 0,25-0,35 до 0,45-0,55.

Запасы газа в месторождениях газогидратов также невозможно освоить без регулирования свойств газогидратов на ионном уровне. Применение нанотехнологий позволит снизить энергозатраты на регулирования свойств газогидратов, переводить газ в газогидратную форму и торговать природным газом в газогидратном состоянии для частичной диверсификации экспорта газа и возможности обеспечить газом отдаленные поселки. Кроме того, это позволит утилизировать попутный нефтяной газ и низконапорный природный. Фактически речь идет о создании газогидратной отрасли ТЭК.

Из изложенного следует, что уже сейчас видны следующие направления развития нефтегазовой наноиндустрии, основанной на целенаправленном регулировании наноявлений, определяющих фундаментальные параметры макросистем [4,5]: 1)

Снижение обводненности добываемой нефти. 2) Увеличение коэффициента извлечения нефти (КИН). 3) Воздействие на глинистую составляющую пород. 4) Регулирование смачиваемости пород. 5) Воздействие на наноколлектора. 6) Снижение энергозатрат на закачку, подъем и подготовку нефти. 7) Разработка месторождений газогидратов. 8) Утилизация и торговля газом в газогидратном состоянии. 9) Утилизация низконапорного и попутного нефтяного газа. 10) Стабилизация неустойчивых коллекторов. 11) Большерасходные нанофильтры. 12) Применение нанокомпозиционных материалов. 13) Гидрофобные наножидкости и нанореагенты. 14) Регулирование состояния нанокластеров тяжелых углеводородов. 15) Упрочнение заколонного цемента при строительстве скважин. 16) Увеличение глубины переработки нефти. 17) Извлечение метана угольных пластов. 18) Экологическое улучшение работы всего нефтегазового комплекса.

Все это вместе взятое потребует использования современных методов контроля структуры и состава наноколлекторов (например, методы позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) в ИТЭФ и ряд электрофизических методов в МИЭТ), так как структура порового пространства нефтегазоносных пород и метаноугольных месторождений определяется в первую очередь его геометрическими характеристиками, такими как состав, размеры нанопор и нанокапилляров и распределениями площадей и объемов пор по их по радиусам. Остановимся вначале на методах ПАС, которые могут позволить определять параметры и состав порового пространства горных пород, особенно для размеров в нанометровом диапазоне [6-20].

Позитроника, включающая также в свой состав и позитронную аннигиляционную спектроскопию (ПАС) (см., например, [6-20]), позволяет определять как электронную структуру совершенных кристаллов, так и различные несовершенства особо малых размеров в твердых телах и пористых системах, таких как вакансии, вакансионные кластеры и свободные объемы до одного кубического нанометра (нанообъекты пустоты). Она включает в себя в основном три метода: изучение временного распределения аннигиляционных фотонов (ВРАФ), углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) и доплеровского уширения аннигиляционной линии с энергией 0,511 МэВ (ДУАЛ) [4].

Ниже рассматриваются методы определения размеров нанообъектов, их концентраций и химического состава среды, окружающей нанообъекты, по экспериментально измеряемым параметрам спектров ВРАФ и УРАФ для позитронов, аннигилирующих в пористых системах и дефектных твердых телах на примере пористого кремния и пластин кремния, облученных протонами, на основе теоретических представлений, развитых в [6].

Показано, что одним из эффективных методов определения размеров нанообъектов (вакансий, вакансионных кластеров), свободных объемов пор, полостей, пустот, цилиндрических каналов и капилляров, их концентраций и химического состава в месте аннигиляции в в горных породах (пористых системах, некоторых дефектных породах и особенно в породах с нанопорами) является метод позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС). В качестве примера дан краткий обзор экспериментальных исследований нанодефектов в кварце, порошках кварца, пористом кремнии, кремнии, облученных протонами [6-20].

Известно [6-10], что позитроны эффективно зондируют свободные объемы нанообъектов (в основном вакансии, дивакансии и поры) с размерами $\leq$1-100 нм как в металлах и сплавах, так и в полупроводниках и пористых системах. Нами получены на основе модели движения частицы в плоскости, ограниченной круглой цилиндрической абсолютно непроницаемой стенкой [8-10], более правильные формулы для определения радиусов R_c цилиндрических (символ c) и уточненные формулы радиусов

сферических (символ sp) нанопор по ширинам компонент углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) $\theta_{1/2}$ и энергиям E_{1c} и E_{sp} основного состояния парапозитрония, аннигилирующего в порах в пористом кремнии и диоксиде алюминия

$$R_c[\overset{0}{A}] = \frac{21{,}1}{\theta_{1/2}[mrad]}, R_c[\overset{0}{A}] = \left(\frac{30{,}58}{E_{1c}(eV)}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

$$R_{sp}[\overset{0}{A}] = \frac{16{,}6}{(\theta_{1/2})[mrad]}, R_{sp}[\overset{0}{A}] = \left(\frac{18{,}85}{E_{1sp}(eV)}\right)^{1/2} \quad (2)$$

где R и $\theta_{1/2}$ выражаются в Å и $mrad$ соответственно.

Для экспериментального значения в пористом кремнии $\theta_{1/2} = 0{,}8$ мрад [9], получили среднее значение радиуса цилиндрических пор $R \approx 26{,}4$ Å ≈ 3 нм. Их концентрация в пористом слое оказалась равной $\sim 5{,}6 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$.

Рассмотрение кинетической схемы аннигиляционных распадов и превращений позитронных и позитрониевых состояний в пористом слое позволяет получить связь между их скоростью захвата k_{tr} порами и интенсивностями компонент I_{g2} [6]

$$k_{tr} \cong I_{g2}\lambda_{cr},\ \text{с}^{-1} \quad (3)$$

Здесь $\lambda_{cr} \approx \lambda_s = 0{,}8 \cdot 10^{10}$ с$^{-1}$ - скорость аннигиляции парапозитрония (р-Ps), интенсивность $I_{g2} \approx 0{,}015$ (см. табл.1) в [6]). Таким образом по формуле (3) получаем среднюю скорость завата р-Ps порами $k_{tr} = 1{,}2 \cdot 10^8$ с$^{-1}$. С другой стороны скорость захвата k_{tr} р-Ps может быть вычислена исходя из известного выражения

$$k_{tr} = \sigma_{tr}\upsilon N_{tr},\ \text{с}^{-1} \quad (4)$$

Здесь σ_{tr} - сечение захвата порами (дефектами) позитрония и позитрона; v - скорость теплового позитрония или позитрона; N_{tr} - средняя концентрация пор (дефектов) (в пористой (дефектной) области кристалла. Таким образом, из приведенных выражений возможно определить размеры величины k_{tr}, N_{tr} и R_{tr} если известны такие параметры, как $\lambda_1, \sigma_{tr}(i), v$. Тепловые скорости позитрония, и позитрона при температуре $T = 293K$ были оценены под формуле $\upsilon = \left(8k_0T/\pi m_+^*\right)^{1/2} \approx 7{,}52 \cdot 10^6$ cm/s для позитрония, для позитрона $v \approx 1{,}05 \cdot 10^7$ cm/s, где k_0 – постоянная Больцмана, $m_+^* \approx 2m_0$ - эффективная масса позитрония, $m_+^* \approx m_0$ - эффективная масса позитрона, $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-28}$ г - масса свободного позитрона. Принимали, что сечение захвата позитронов и позитрония порами равняется величине площади геометрического сечения поры (дефекта) $\sigma_{tr} \approx \pi R_{tr}^2 = 1{,}256 \cdot 10^{-13}$ см^2. С этими значениями параметров $R_{tr} \approx 2 \cdot 10^{-7}$ см, k_{tr} и v по формулам (3) и (4) определили концентрации пор, служащих центрами захвата р - Ps $N_{tr} \approx 1{,}27 \cdot 10^{14}$ см^3.

Эксперименты показали [6-20], что основная часть позитронов аннигилирует в пористом кремнии из позитронных состояний непозитрониевого типа в объеме пор. Будем считать, что такого типа позитронные состояния являются позитронами, локализованными в объеме пор таким же образом, как и атомы позитрония. В этом случае формулы (1) и (2) имеют вид

$$R_c[\overset{0}{A}] = \left(\frac{61{,}1}{E_{1sp}(eV)} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$R_{sp}[\overset{0}{A}] = \left(\frac{37{,}7}{E_{1sp}(eV)} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Исследованные методом позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) образцы пористого кремния с размерами 10×20×10 мм^3 были вырезаны из целых пластин кремния p – типа с ориентациями <111>. Для исследований были выбраны четыре образца, определяемые нами как 164 (1) (начальный монокристаллический образец), PR86, PR16, PR17 (образцы пористого кремния, полученные методом электрохимической обработки в растворах HF:C_2H_5OH при силе тока J=10 и 20 мА/см^2). Параметры исследованных пластин кремния и основных особенностей спектров УРАФ приводены в табл.1-3.

Таблица 1

Характеристики и параметры исследуемых образцов пористого кремния p-типа

№ п/п	Характеристика образца
164(1)	Si-монокристаллический, зеркальный, p-тип, <111>, КДБ-10, h=340 мкм.
PR86	Si-пористый, <111>, КДБ-0,03, h=360-370 мкм, HF:C_2H_5OH=2:1, J=20 мА/см^2, Пористость ~ 45%±3%
PR16	Si, пористый, <111>, КДБ – 0,03, h = 20 мкм, HF:C_2H_5OH = 1 : 1, J = 10 мА/см^2, T = 2400 ^{0}C
PR17	Si, пористый, <111>, КДБ – 0,03, h = 20 мкм, 10 мин в $PdCl_2$, HF:C_2H_5OH = 1 : 1, J = 10 мА/см^2, T = 2400 ^{0}C

Таблица 2

Параметры исследуемых образцов монокристаллического и пористого кремния и характеристики спектров УРАФ

№ п/п	$I_{g2}=S_{g1}/S_{sum}$	$I_{g1}=S_{g1}/S_{sum}$	Γ_{g1}, мрад	$I_p=S_p/S_{sum}$	Γ_p, мрад
164(1)		0.665±0.035		0.335±0.031	
PR86	0.015±0.003	0.493±0.052		0.492±0.044	
PR16		0.483 ± 0.045	9.01 ± 0.09	0.517±0.041	5.60 ± 0.01
PR17		0.511 ± 0.051	8.98 ± 0.09	0.489±0.044	5.57 ± 0.01

Таблица 3

Характеристики спектров УРАФ исследуемых образцов пористого кремния р-типа и параметры цилиндрических пор

	№ образца	$I_p=S_p/S_{sum}$	$k_{tr}\cdot10^{-9}$, $с^{-1}$	R_{tr}, Å	$N_{tr}\cdot10^{-17}$, $см^{-3}$
164(1)	0.335±0.031	0.665±0.035			
PR86	0.493±0.052	0.492±0.044	7.21	13	1.31
PR16	0.483 ± 0.045	0.517±0.041	6.76	13	1.23
PR17	0.511 ± 0.051	0.489±0.044	8.00	13	1.55

Примечание к табл. 1-3: h – толщина пластин кремния, <111> - их кристаллографическая ориентация, КДБ – 0,03 – марка пластин кремния, легированных бором с удельным сопротивлением 0,03 ом·см, $I_g = S_{gi}/S_{sum}$ (i=1,2)– интенсивности гауссовых компонент, а $I_P = = S_p/S_{sum}$- интенсивность параболической компоненты в спектрах УРАФ (S_{sum}-суммарная площадь экспериментального спектра УРАФ, а S_{gi} и S_p – соответственно площади гауссовых и параболической компонент в этом спектре). J – плотность тока. $(\theta_{1/2})_{g2}=0{,}8$ мрад, $(\theta_{1/2})_{g1}=10{,}9$ мрад, $(\theta_{1/2})_p\approx 7$ мрад - ширины гауссовых ($g_i, i=1{,}2$) и параболической компонент.

Из табл.1-3 видим, что разность между интенсивностями гауссовых компонент I_g(окисленная), то есть окисленными пластинами кремния, и I_g(не окисленная) (начальная не окисленная пластина) в спектрах УРАФ, может быть записана в виде

$$\Delta I_g = I_g(\text{окисленная}) - I_g(\text{не окисленная}) = k_{tr}\tau_1 \qquad (7)$$

Таким образом среднее значение скорости захвата позитронов порами равна

$$k_{tr} = \Delta I_g/\tau_1, \qquad (8)$$

Значения k_{tr}, рассчитанные по формулам (7) и (8) приведены в табл.3. Исходя из этих значений k_{tr} по формуле (4) были рассчитаны значения концентраций пор N_{tr}. Их значения также приведены в табл.3.

Из выражений (1), (2) и (5), (6) также видим, что по энергии в месте аннигиляции на внешних валентных электронах E можно также найти радиусы пор, используя только данные УРАФ. Для этого приведем выражение, связывающее энергию аннигилирующей электронно-позитронной пары с полной шириной на полувысоте [1]

$$E = 6{,}9\cdot10^{-2}(\theta_{1/2})_g^2 \qquad (9)$$

Здесь E- энергия в *эВ*, а $(\theta_{1/2})_g$ - полная ширина кривой УРАФ на полувысоте в мрад.

Так для образцов кремния измеренная величина $(\theta_{1/2})_g$ составила 11,1 мрад и ей соответствует средняя энергия аннигилирующей электрон-позитронной пары, равная $E=8{,}5$ эВ и обусловленная средней энергией электронов внешней оболочки атома кремния на стенке поры, которую можно принять равной энергии электрона на внешней оболочке изолированного атома кремния. При этом учитывается, что до аннигиляции позитрон и позитроний успевают термализоваться и измеренная энергия определяется, в основном, энергией электрона. Табличное значение энергии для $Si(3p^2\ ^3P_0)$ электронной внешней оболочки кремния $E(Si)=8{,}1517$ эВ [6]. Как видим, согласие этих величин энергий E и $E(Si)$ вполне удовлетворительное. Таким образом, позитроны аннигилируют в основном на внешних валентных электронах атомов кремния «стенки» поры. Отсюда можно сделать заключение о том, что метод ПАС может определять химический состав «стенок» нанообъектов в конденсированной

фазе (для рассматриваемого нами случая наноколлекторов пластов месторождений нефти, угля и газа).

Можно полагать, что разность величин $E - E(Si) = 0{,}35$ эВ обусловлена вкладом энергии связи позитрона, находящегося в поре в энергию аннигилирующих электронно-позитронных пар. В этом случае для определения размера цилиндрических пор рационально использовать выражение (9)

$$R_c = \left(\frac{61{,}1}{E - E(Si)} \right)^{1/2}, \qquad (10)$$

Таким образом, при значении $E = E - E(Si) = 0{,}35$ эВ размер пор равен 13,2 Å.

Далее со значением $R_{tr} \approx 13{,}2$ Å определили среднее значение сечения захвата позитрона дефектами $\sigma_{tr} \approx 5{,}5 \cdot 10^{-14}$ см^2. Для оценок средних значений концентраций пор приняли $k_{tr} \approx 7{,}9 \cdot 10^8$ с$^{-1}$, $\sigma_{tr} \approx 5{,}5 \cdot 10^{-14}$ см^2 и $v \approx 10^7$ см/с. Получили значение концентрации пор $N_{tr} = k_{tr} / v \cdot \sigma_{tr} \approx 1{,}4 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$. Зная общую пористость (45%) [7-10] и средний объем поры, можем оценить концентрацию пор из простых геометрических соображений и, сравнив ее с рассчитанной N_{tr}, проверить достоверность принятых приближений. Определенному нами по формуле (2) среднему размеру пор $R_{tr} \approx 3$ нм соответствует их средний объем $V_{tr} = \pi R_{tr}^2 \cdot h \approx 2{,}8 \cdot 10^{-16}$ см$^{-3}$ Здесь h - толщина слоя пористого кремния. Для случая «плотной упаковки» таких пор их концентрация исходя из величины общей пористости 0,45 могла бы быть равной $N_{tr}^G \sim 0{,}45 / V_{tr} \sim 1{,}6 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$. Расхождения величины N_{tr}^G с нами определенной концентрацией $N_{tr} = 1{,}4 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$ не очень велико. Таким образом, изученные методом УРАФ образцы пористого кремния представляют собой микропористые цилиндрические нанообъекты с размерами порядка 3 нм и концентрацией примерно 10^{15} см$^{-3}$.

Согласно этим данным для пористого кремния можно полагать, что эффективными свободными центрами (областями захвата позитронов и позитрония) являются скорее всего сферические и цилиндрические ультрамикропоры и микропоры с размерами порядка 2 нм, находящимися в пористом слое кремния. Зная общую пористость (45%) и средний объем поры, можем оценить концентрацию пор из простых геометрических соображений и, сравнив ее с рассчитанной N_{tr}, проверить достоверность принятых приближений. Определенному нами среднему размеру цилиндрических пор пор $R_{tr} \approx 2$ нм соответствует ее средний объем $V_{tr} = \pi R_{tr}^2 \cdot h = 1{,}26 \cdot 10^{-16}$ см$^{-3}$. Здесь h - толщина слоя пористого кремния. Для случая «плотной упаковки» таких пор их концентрация исходя из величины общей пористости 0,45 могла бы быть равной $N_{tr}^G \sim 0{,}45 / V_{tr} = 3{,}6 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$. Расхождения величины N_{tr}^G с нами определенными концентрациями $N_{tr} = 3{,}21 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$ [8] не очень велики, что говорит о правильности предложенной модели. Таким образом, изученные методом позитронной аннигиляционной спектроскопии характеристики образца пористого кремния говорят о том, что здесь имеют место микропористые цилиндрические объекты с размерами порядка 2 нм и концентрацией порядка 10^{15} см$^{-3}$. Полученные результаты позволяют надеяться, что дальнейшие исследования дадут возможность связать параметры аннигиляционных спектров с размерами пор и их топологией.

Таким образом показано, что один из эффективных методов определения средних размеров цилиндрических и сферических нанообъектов $\overline{R}$ (свободных объемов пор,

полостей, пустот и т.д.), их средних значений концентрации $\overline{N}$ и химического состава в месте аннигиляции позитрона в пористых системах и некоторых дефектных материалах (и в большом числе технически важных материалах и наноматериалах) является метод позитронной аннигиляционной спектроскопии. Это позволяет определять средние значения доли свободного порового пространства $\overline{V}_{rad} = (4/3)\pi\overline{R}^3 \cdot \overline{N}$, имеющие место в нефтегазоносных и метаноугольных породах. Обсуждается идея поиска корреляции между значениями $\overline{V}_{rad}$ и динамикой изменений значений КИН. Установлено, что для микроструктуры нефтегазовых месторождений (пород) важными показателями являются общая пористость и проницаемость. Прямой связи общей пористости с проницаемостью нет, но существует корреляционная связь между пористостью и проницаемостью. С повышением общей пористости повышается проницаемость породы, за счет увеличения эффективной пористости и увеличения количества крупных пор. Это приводит к резкому увеличению величин КИН при закачке воды и других специальных растворов для вытеснения нефти из пластов пород. Особая роль развития нанотехнологий становится необходимой при освоения нанорезервуаров (наноколлекторов) – например, нефтяных пластов баженовской свиты Сибири, газовых и метанугольных пластов с наноразмерными поровыми каналами.

. Дается краткий обзор экспериментальных исследований нанообъектов в образцах кремния различных марок, подтверждающих сделанные предположения. При этом важную роль приобретают экспериментальным методы определения электрофизических параметров кремния. Особое значение при этом имеет поиск критичных дефектов, сильно нарушающих его электрофизические свойства (http://www.physics-online.ru/php/paper.phtml?jrnid=null&paperid=8127&option_lang=rus).

Следует также остановится на возможностях применений электрофизических методов, развиваемых в МИЭТ, для исследования наноявлений в нефтегазодобыче.Они должны включать в себя проведение исследований и разработку новых конструкций и технологий изготовления методов контроля и измерения параметров МЭМС в герметичном исполнении, а именно микрогироскопов, микроакселерометров, инклинометров, микрозеркал (сложно-функциональных микроприводов), микромеханических датчиков давления. Эти перечисленные приборы в герметичном исполнении несомненно позволят решать задачи аналитического контроля окружающей среды в процессах нефтегазодобычи.

Список литературы

1. А.Я.Хавкин. Наноявления в в нефтегазодобыче. Вестник РАН. 2009. Т.79. №6. С.519-522.
2. И.Н.Евдокимов, А.П.Лосев. Нефтегазовые нанотехнологии для разработки и эксплуатации месторождений. Учебное пособие для РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина. М.: РГУ, 2007.
3. Н.П.Лаверов.Топливно-энергетические ресурсы. Вестник РАН. 2006. Т.76. №5.
4. А.Я.Хавкин. Регулируемые наноявления в добыче нефти и газа. Полный отчет о Первой ежегодной научно-технической конференции НОР «Развитие нанотехнологического проекта в России: состояние и перспективы». 11. Другие сферы применения нанотехнологий. http://ntsr.info/nor/bulletin/seminars/?ID=1601&phrase_id=661090
5. Г.К.Сафаралиев, А.Я.Хавкин, В.Л.Севостьянов. Работа секции «Нанотехнологии для нефтегазового комплекса» НОР в 2008-2009гг. Полный отчет о Первой ежегодной научно-технической конференции НОР «Развитие нанотехнологического проекта в России: состояние и перспективы». 11. Другие сферы применения нанотехнологий. http://ntsr.info/nor/bulletin/seminars/?ID=1601&phrase_id=661090
6. Е.П.Прокопьев. Развитие теоретических основ методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для исследования размеров и концентраций нанообъектов в конденсированной фазе. Полный отчет о Первой ежегодной научно-технической конференции НОР «Развитие нанотехнологического проекта в России: состояние и перспективы». 8. Нанотехнологии группы Б. http://ntsr.info/nor/bulletin/seminars/?ID=1601&phrase_id=661090, , http://www.ntsr.info/upload/My/nauka/pozan.doc.
7. Yu.A. Chaplygin, V.I. Grafutin, E.P. Svetlov-Prokopiev, S.P. Timoshenkov. Positronics and Nanotechnologies: Possibilities of Studying Nano-objects in Technically Important Materials and Nanomaterials. In book: Advances in Nanotechnology. Volume 1, 2010. Editors: E. J. Chen and N. Peng. Nova Science Publishers, New York, 2010. P.191-208. https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?cPath=23_96&products_id=10207&osCsid=9c7f4bdf96ee0b265245e976a7c8d2fc
8. В.И. Графутин, О.В. Илюхина, Г.Г. Мясищева, Е.П. Прокопьев, С.П. Тимошенков, Ю.В. Фунтиков, Ю.А. Чаплыгин. Применение и развитие методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для определения размеров нанообъектов в пористых системах, дефектных материалах и наноматериалах. Наноструктуры. Математическая физика и моделирование,2010, том 2, № 2, с.15–42. http://www.nano-journal.ru/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%86%D0%B0
9. В.И.Графутин, О.В.Илюхина, Г.Г.Мясищева, Е.П.Прокопьев, С.П.Тимошенков, Ю.В.Фунтиков, Р.Бурцл. Позитроника и нанотехнологии: возможности изучения нанообъектов в материалах и наноматериалах методом позитронной аннигиляционной спектроскопии. Ядерная физика. Т.72. №10. 2009. С.1730-1739.
10. Р.Бурцл, В.И.Графутин, О.В.Илюхина, Г.Г.Мясищева, Е.П.Прокопьев, С.П.Тимошенков, Ю.В.Фунтиков, Возможности изучения нанообъектов в пористом кремнии и подложках кремния, облученных протонами, методом

позитронной аннигиляционной спектроскопии. Физика твердого тела. 2010. Т.52. Вып.4. С.651-654.

11. В. И. Графутин, Е. П. Прокопьев, В. Крщак, Р. Бурцл, П. Хэнер, А. Земан, О. В. Илюхина, Д. Ерак, М. А. Могилевский, Г. Г. Мясищева, Ю. В. Фунтиков. Изучение конструкционных материалов активной зоны реакторов методами позитронной аннигиляционной спектроскопии. Ядерная физика. 2011, Т.74. №2. С.1-12.
12. В.И.Графутин, Е.П.Прокопьев, Ю.В.Фунтиков, О.В.Илюхина, Г.Г.Мясищева. Возможное применение методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для исследования наноявлений в нефтегазодобыче. ID=1278405194. Научная Онлайн-Библиотека Порталус: http://www.portalus.ru/modules/science/rus_readme.php?subaction=showfull&id=1278405194&archive=&start_from=&ucat=19& http://www.portalus.ru/modules/science/data/files/prokopiev/Paper-Prokopev-EP.pdf
13. В.И. Графутин, О.В. Илюхина, Г.Г. Мясищева, Е.П. Прокопьев, Ю.В. Фунтиков. Возможное развитие методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для исследования наноявлений в нефтегазодобыче. МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНГРЕСС «ЭНЕРГЕТИКА В ГЛОБАЛЬНОМ МИРЕ» • 16–18 ИЮНЯ 2010 г. • РОССИЯ • г. КРАСНОЯРСК. С.336-337. http://conf.sfu-kras.ru/uploads/E-CONGRESS-2010%20part%202.pdf#page=78
14. Е.П.Прокопьев. Развитие методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для определения размеров нанообъектов в пористых системах, дефектных материалах и наноматериалах. ID=1263401871. Научная Онлайн-Библиотека: http://www.portalus.ru/modules/science/data/files/prokopiev/Prokopev-pos-Report.doc
15. В.И.Графутин, Е.П.Прокопьев, Ю.В.Фунтиков. Развитие методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для определения размеров нанообъектов в пористых системах, дефектных материалах и наноматериалах. Обсуждение современных проблем в мире физики/ Блог. Прокопьев Евгений Петрович. Рубрика: Химическая физика, физическая химия и материаловедение http://www.physics-online.ru/php/paper.phtml?jrnid=null&paperid=8127&option_lang=rus
16. В.И.Графутин, Е.П.Прокопьев, Ю.В.Фунтиков. Развитие методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для определения размеров нанообъектов в пористых системах, дефектных материалах и наноматериалах. Научная Онлайн-Библиотека Порталус: http://www.portalus.ru/modules/science/data/files/prokopiev/Prokopev-pos-Report.doc
17. .П.Прокопьев, В.И.Графутин, С.П.Тимошенков, Ю.В.Фунтиков. Определение методом ПАС радиусов пор и их концентраций в пористом кремнии и кремнии, облученном протонами. Модели сферической и цилиндрической пор. Научная Онлайн-Библиотека Порталус: http://www.portalus.ru/modules/science/rus_readme.php?subaction=showfull&id=1274458775&archive=&start_from=&ucat=19&category=19
18. В.И.Графутин, О.В.Илюхина, Г.Г.Мясищева, Е.П.Прокопьев, Ю.В.Фунтиков. Возможное применение методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для исследования наноявлений в нефтегазодобыче. Азербайджано–Российский симпозиум с международным участием «Катализ в решении проблем

нефтехимии и нефтепереработки». 28-30 сентября, 2010 г. Азербайджан, Баку. http://conf.nsc.ru/view/baku-2010/$N;jsessionid=04BBBF0E08F77023397121B7FEA77093 , **Preliminary Scientific Program.pdf**, http://conf.nsc.ru/files/conferences/baku-2010/27591/scientific%20program-BAKU.pdf

19. В.И.Графутин, И.Н.Мешков, Е.П.Прокопьев, Н.О.Хмелевский, С.Л.Яковенко. Определение размеров дефектов вакансионного типа в ангстремных диапазонах методами позитронной аннигиляционной спектроскопииhttp://www.portalus.ru/modules/science/rus_readme.php?subaction=showdate&id=1284930000&archive=&start_from=&ucat=& .
20. В.И.Графутин, И.Н.Мешков, Е.П.Прокопьев, С.П.Тимошенков, Н.О.Хмелевский, Ю.А.Чаплыгин, С.Л.Яковенко. Определение размеров дефектов вакансионного типа в ангстремных диапазонах методами позитронной аннигиляционной спектроскопии. Тезисы докладов. 2-я ежегодная научно-техническая конференция Нанотехнологического общества России «Перспективы развития в России НБИК-технологий как основного научного направления прорыва к шестому технологическому укладу» при поддержке РНЦ «Курчатовский институт», 14-15 октября 2010 г., г. Москва, РНЦ КИ. С.? В печати