

УДК 532.685+552.54

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОДОНАСЫЩЕНИЯ ДОЛОМИТОВОГО КЕРНА ПОД АТМОСФЕРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ МРТ

*П.П. Кобчикова¹, М.М. Дорогиницкий¹, А.В. Фаттахов¹,
В.Е. Косарев¹, В.М. Мурзакаев²*

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

²ООО «ТНГ-Групп», г. Бугульма, 423236, Россия

Аннотация

Методом магнитно-резонансной томографии исследовано распределение содержания флюида в процессе насыщения полноразмерного керна мелкозернистого доломита. В процессе насыщения выделены две стадии. На первой, «гидродинамической» стадии процесса наблюдается быстрый рост (до 5 мин) флюидосодержания в приповерхностном слое керна (~0.5 см) до предельного насыщения. Гидродинамическая стадия насыщения флюидом пустотного пространства горной породы рассматривалась в рамках модели фильтрации Дарси, где градиент давления определялся разностью между давлением жидкости, складывающимся из гидростатического и капиллярного давления, и возрастающим давлением сжимаемого в замкнутом поровом пространстве газа (воздуха). На второй, «диффузионной» стадии (от 5 до 320 мин) наблюдается медленный по сравнению с гидродинамической стадией рост профиля влагосодержания в центральной части керна. Диффузионная стадия насыщения рассмотрена в рамках модели установившегося равновесия давлений жидкости и газа, при котором массоперенос флюида осуществляется за счёт градиента содержания флюида.

Ключевые слова: водонасыщение, пористое пространство, доломитовый керн, магнитно-резонансная томография, диффузия в поровом пространстве

Введение

В настоящий момент для описания движения флюидов в поровом пространстве горных пород-коллекторов используются гидродинамические модели [1], основанные на уравнении Дарси или его обобщениях [2]. В гидродинамических моделях описание системы поровое пространство – флюид дается в параметрической форме, не раскрывающей физическую природу состояния флюида и молекулярные механизмы его движения в поровом пространстве. Несмотря на практическую важность и многочисленные исследования, молекулярные механизмы переноса флюида в поровом пространстве в настоящее время полностью не раскрыты [1].

В значительной мере механизмы молекулярного взаимодействия флюида с поверхностью каркаса порового пространства проявляются при фильтрации в условиях небольших градиентов давления. Условиям естественной фильтрации

при малых градиентах внешнего давления отвечает процесс насыщения флюидом сухого пористого тела. Основы физических процессов насыщения и сушки капиллярно-пористых тел изложены в монографии [3]. Процессы насыщения флюидом порового пространства должны определяться: капиллярными силами; адсорбционными, термодинамическими силами; вязким трением флюида; фазовым состоянием флюида (давление-температура). Перенос количества флюида в процессе насыщения может осуществляться:

– в результате гидродинамического течения по капиллярам из-за градиента давления, вызываемого капиллярными и адсорбционными силами [4];

– в результате диффузионного переноса, порождаемого градиентом количества флюида в поровом пространстве [5].

Целью настоящего исследования являлось получение данных о временной эволюции распределения флюида в насыщаемом пористом теле, которые могли бы прояснить механизмы массопереноса в условиях малых градиентов давления. Пространственное распределение флюида в процессе насыщения измерялись методом магнитно-резонансной томографии (МРТ), позволяющим получить срез (томограмму) пространственного распределения содержания водорода ^1H , входящего в состав подвижной воды в керне. Из магнитно-резонансных томограмм (МР-томограмм) фрагментов полноразмерного керна посредством цифровой обработки изображений извлекались усреднённые радиальные профили флюидосодержания при различных временах насыщения. На основании этих профилей были сделаны предположения о математических моделях, работающих в процессе этого насыщения.

1. Объект и метод исследования

Объектом исследования являлся керн мелкозернистого доломита из скважины «Университетская-1», пробуренной на территории Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского «Приволжского» федерального университета. Глубина отбора исследуемого фрагмента составила около 165 м. Представленный образец характеризуется преимущественно межзерновой пористостью с размерами пор в диапазоне от 500 до 0.2 мкм со средним размером пор в области от 10 до 50 мкм. На рис. 1 представлен внешний вид исследуемого образца и пример МР-томограмм, полученных в результате исследований. Образец имеет цилиндрическую форму высотой около 15 см и диаметром 8.7 см.

Исследуемый керн гидроизолировался с торцевых поверхностей посредством нанесения водонепроницаемого полимерного слоя. В исходном образце отмечалось высокое остаточное водосодержание, возникшее в результате адсорбционного поглощения влаги из воздуха. Для удаления остаточной флюидонасыщенности перед насыщением порода подвергалась предварительной вакуумной сушке при 50 °С в течение 20 ч. Температура сушки выбиралась опытным путем, исходя из требований предотвращения образования трещин в образце доломита при термической обработке. Содержание воды в процессе сушки контролировалось методом МРТ. Пример МР-томограмм, получаемых в процессе сушки, приведен на рис. 1, справа.

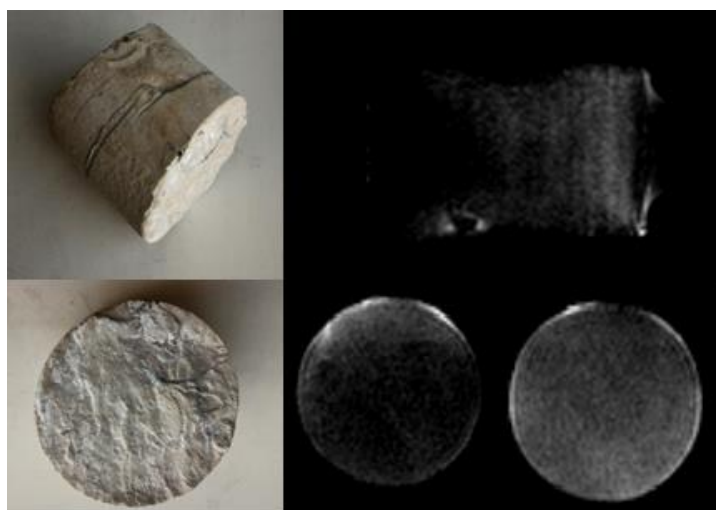


Рис. 1. Слева – фотографии исследуемого фрагмента полноразмерного керна; справа – МР-томограммы керна в сагиттальной проекции и трансверсальной проекции

Насыщение образца осуществлялось путем его погружения в ёмкость с водой на глубину не более 15 см. В процессе насыщения и измерений обеспечивались условия поддержки постоянного уровня флюидосодержания на боковой, цилиндрической поверхности керна.

Для получения МР-томограмм использовался томограф MR Scanex, со следующими характеристиками: тип магнита – сверхпроводящий с криорефрижератором и компрессором туннельной конструкции, индукция магнитного поля – 1.5 Т (63.8 МГц ^1H), разрешающая способность – 0.3 мм, минимальная толщина слоя МРТ среза – 1 мм, зона исследования цилиндрическая формы диаметром 160 мм и длиной 160 мм, минимальный интервал между подачей возбуждающего (90°-го) РЧ-импульса и серединой интервала сбора сигнала – 20 мс, неоднородность магнитного поля в зоне исследования – не более 10 ppm. Для измерения использовалась последовательность «спиновое эхо Хана» с применением пространственно-кодирующих градиентов магнитного поля [6]. Время получения одной МР-томограммы составляло не более 1 мин. Пример томограмм, снятых в начале и в конце процесса насыщения, приведён на рис. 2. На рисунке четко видны калибровочные фантомы, получаемые от тонких пробирок с водой.

Обработка томограмм, представляющих распределение флюида в трансверсальной плоскости керна, производилась в программе «Инобитек DICOM просмотрщик 1.8.6». Данная программа предоставляет возможность просканировать участок вдоль выделенной линии и получать цифровые характеристики интенсивности томограммы, как показано на рис. 3.

Интенсивность МР-томограмм имела неоднородный характер, связанный с характером распределения пористости и трещиноватости внутри горной породы. С целью учета такой пространственной неоднородности образца данные по интенсивности МР-томограмм усреднялись по восьми угловым направлениям и трём томографическим срезам в центральной части керна. По усреднённым

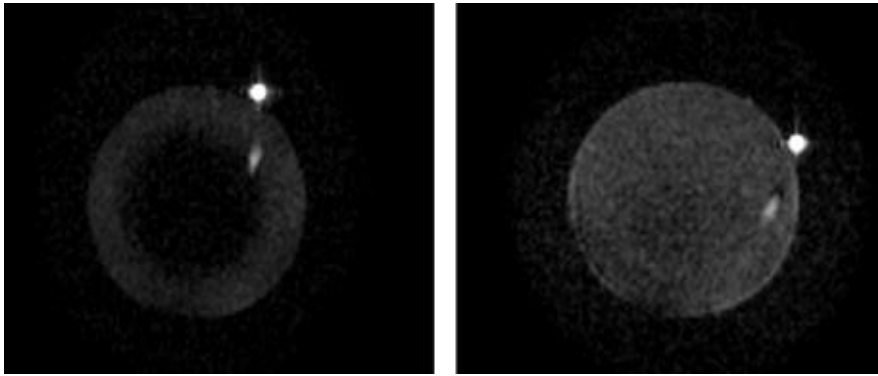


Рис. 2. Трансверсальные МР-томограммы ядра, полученные в различные моменты насыщения: слева – в начальный период насыщения; справа – на конечном этапе насыщения; белые пятна на томограммах – калибровочные фантомы

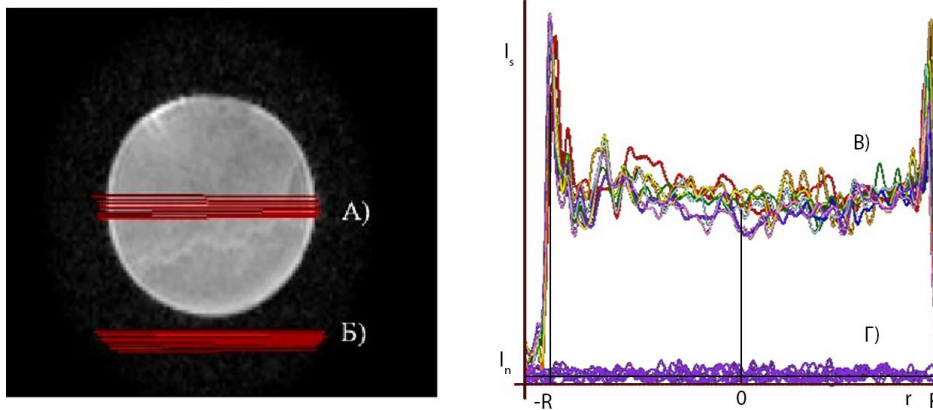


Рис. 3. Слева – оцифровка интенсивности МР-томограммы: А) в области насыщения ядра в выделенном радиальном направлении; Б) в области шума. Справа – профили интенсивности МР-томограммы: В) в области насыщения $I_s(r)$; Г) в области шума $I_n(r)$

МР-томограммам, полученным в моменты времени t от начала насыщения, определялись интенсивность изображения в области насыщения $I_s(r, t)$ и средняя интенсивность в области шума I_n . По интенсивности МР-томограммы в области фантома с 100%-ным флюидосодержанием I_{ph} и интенсивностям МР-томограмм в приповерхностном слое на конечной стадии насыщения $I_s(R, \infty)$, а также по среднему уровню интенсивности в области шума I_n оценивался коэффициент открытой пористости κ , который равен отношению объема открытых пор V_p в элементарном (дифференциальном) объеме образца V :

$$\kappa = \frac{V_p}{V} = \frac{I_s(R, \infty) - I_n}{I_{ph} - I_n}. \quad (1)$$

Коэффициент пористости κ в исследуемом образце доломита оценивался в пределах от 10% до 15%.

Основной анализируемой величиной является относительное объёмное флюидосодержание $w(r,t)$, определяемое как отношение объема флюида V_f к объёму пор V_p в элементарном объёме образца, характеризующем положением и моментом наблюдения t :

$$w(r,t) = \frac{V_f(r,t)}{V_p} = \frac{V_f(r,t)}{KV}. \quad (2)$$

С использованием значений интенсивности $I_s(r,t)$ и коэффициента пористости κ определялось относительное объёмное флюидосодержание образца в радиальном направлении в различные моменты времени $w(r,t)$:

$$w(r,t) = \frac{I_s(r,t) - I_n}{\kappa(I_{ph} - I_n)} = \frac{I_s(r,t) - I_n}{I_s(R, \infty) - I_n}. \quad (3)$$

Перед началом насыщения по среднему уровню интенсивности МР-томограммы в центральной области высушенного зерна $I_s(0,0)$ оценивалась остаточное относительное объёмное флюидосодержание w_0 :

$$w_0 = \frac{I_s(0,0) - I_n}{\kappa(I_{ph} - I_n)} = \frac{I_s(0,0) - I_n}{I_s(R, \infty) - I_n}. \quad (4)$$

Начальное остаточное относительное объёмное флюидосодержание в высушенном зерне составляло $\sim 0.5\%$.

2. Результаты и их обсуждение

Результаты измерения профилей относительного объёмного влагосодержания $w(r,t)$ в процессе насыщения приведены на рис. 4 и 5. Процесс насыщения зерна можно разделить на две стадии.

Первая стадия приведена на рис. 4. Она характеризуется гидравлическим вытеснением воздуха из крупных пор зерна при помещении его в воду. На рис. 6 можно видеть рост флюидосодержания в приповерхностном слое зерна $w(R,t)$ в интервале времени насыщения $t \leq t_c \leq 5$ мин, далее содержание воды в приповерхностном слое (≤ 0.5 см) меняется очень медленно. В центральной части зерна в этот интервал времени влагосодержание не меняется и соответствует остаточному флюидосодержанию w_0 .

Вторая стадия изменения радиальных профилей влагосодержания, приведённых на рис. 5, характеризуется незначительной скоростью выделения газа (воздуха) с поверхности образца зерна, погруженного в воду.

Флюидосодержание $w(0,t)$ центральной части профиля на этой стадии начинает расти и продолжает свой рост спустя несколько часов после начала насыщения с постепенным его замедлением. На рис. 6 отмечена граница разделения стадий насыщений $t_c \sim 5$ мин, определённая по изменению поведения флюидосодержания в приповерхностном слое $w(R,t)$ и центральной области $w(0,t)$.

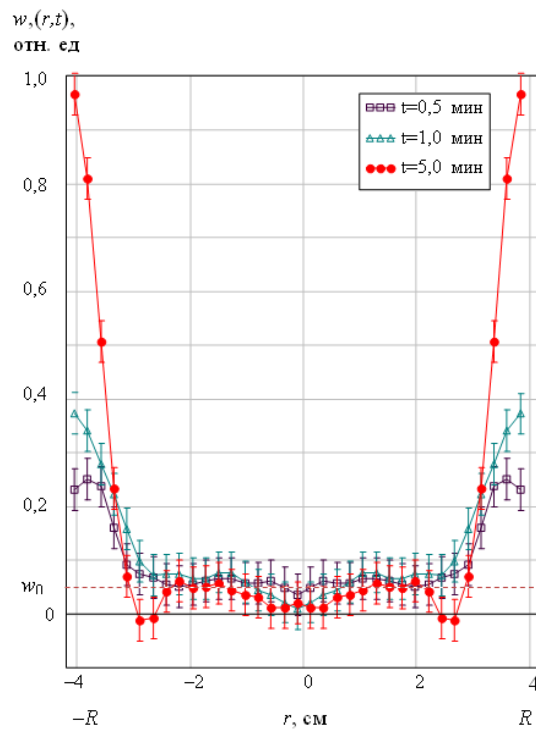


Рис. 4. Профили относительного объёмного влагосодержания образца зерна на первой стадии насыщения

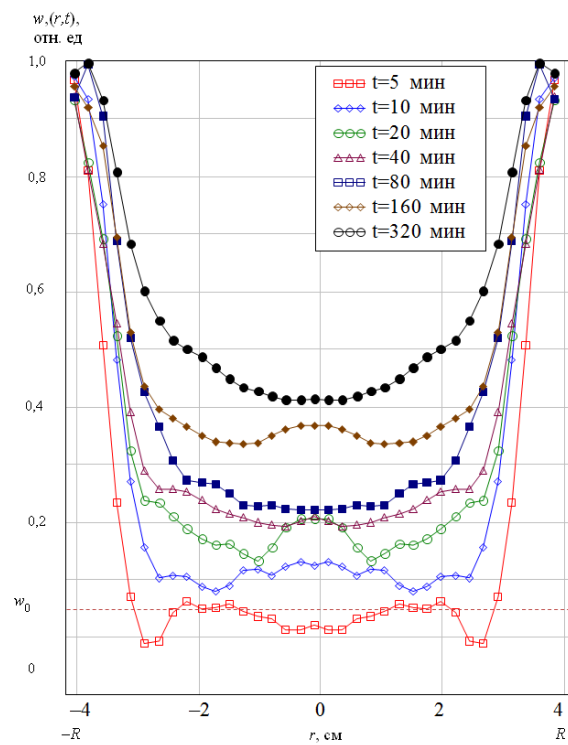


Рис. 5. Профили относительного объёмного влагосодержания образца зерна на второй стадии насыщения

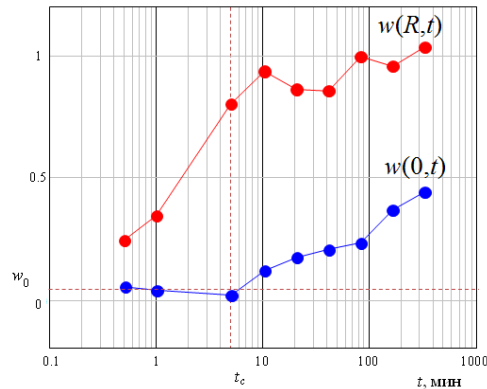


Рис. 6. Изменение относительного объемного флюидосодержания в приповерхностном слое $w(R,t)$ и в центральной части ядра $w(0,t)$. Момент времени насыщения $t_c \sim 5$ мин разделяет стадии различного поведения относительного объемного влагосодержания

3. Анализ результатов

Процесс флюидонасыщения, проведенный в эксперименте, описывается несколькими моделями физических процессов. В случае постоянных термобарических условий выделенные ранее стадии процесса можно охарактеризовать следующими явлениями:

- на первой стадии процесс массопереноса флюида определяется разностью между давлением жидкости и давлением сжимаемого в закупоренном капилляре насыщенного парами флюида воздуха, основным механизмом движения флюида в капиллярно-пористой среде на этой стадии является гидродинамическое течение флюида по капилляру;

- при достижении гидромеханического равновесия между давлением жидкости и давлением сжимаемого воздуха процесс массопереноса замедляется и преимущественным физическим механизмом переноса на второй стадии становится сорбция на поверхности поровых каналов и диффузия, вызванная градиентом количества флюида в поровом пространстве.

Для более полного анализа заполняемое флюидом поровое пространство будем рассматривать как систему поровых каналов с характерными радиусами r_c .

На воздух в капилляре оказывается давление p_f :

$$p_f = p_h + p_c + p_i = \rho gh + 2 \frac{\sigma}{r_c} + p_i, \quad (5)$$

где p_h – гидростатическое давление, p_c – капиллярное давление, p_i – атмосферное давление, ρ – плотность заполняющей воды, g – ускорение свободного падения, h – высота столба жидкости, σ – поверхностное натяжение воды.

Сжимаемый в капилляре воздух p_v оказывает сопротивление с давлением, которое примем подчиняющимся законам идеального газа:

$$p_v = p_i \frac{L}{r(t)}, \quad (6)$$

где L – длина капилляра.

Сравнение с оценками давлений показывает, что для капилляров среднего размера вкладом от гидростатического давления можно пренебречь, в то время как для капилляров с размерами, близкими к верхней границе распределения пор по размерам, гидростатическое давление в процессе гидродинамического течения становится определяющим.

Основным уравнением переноса в пористых средах является уравнение Дарси [1, 2]:

$$v = \frac{\mu}{\eta} \frac{dp}{dr}, \quad (7)$$

где μ – проницаемость пористой среды, характеризующей геометрические свойства каналов порового пространства.

Модель фильтрации на основе уравнения Дарси (7) применима к установившемуся течению флюида в заполненных капиллярах порового пространства под действием стационарного или медленно меняющегося градиента давления. Заметим, что продвижение флюида в незаполненный, сухой капилляр под действием капиллярных сил отличается от установившегося движения флюида в заполненном капилляре, на концах которого поддерживается постоянный перепад давления. Отличие проявляется в области границы флюид – газ и уменьшается по мере удаления от границы в заполненную часть капилляра. При продвижении границы жидкость – газ скорость этого продвижения уменьшается и достигает нуля.

В эксперименте установлено, что гидродинамическая стадия процесса насыщения составляют $\sim 3 \div 300$ с.

В модели насыщения на гидродинамической стадии процесса насыщения предполагается наступление механического равновесия между давлением сжимаемого газа в замкнутой флюидом поре и давлением жидкости. Профиль флюидосодержания в момент установления гидромеханического равновесия полностью определяется плотностью совместного распределения гидродинамических радиусов и длин поровых каналов.

После установления гидромеханического равновесия массоперенос флюида осуществляется за счёт градиента содержания флюида, то есть за счёт диффузионных процессов.

На следующем этапе начинает работать модель адсорбционного массопереноса пара. Диффузионный поток в модели адсорбции пара складывается из медленной диффузии жидкой фазы флюида с потоком и из быстрого переноса и адсорбции пара за счёт адсорбционных сил с потоком.

Как видно из рис. 5, центральная часть зерна имеет гораздо меньшее насыщение, чем приповерхностный слой. Этот факт объясняется тем, что дальнейший рост флюидонасыщения – очень длительное явление, и эксперимент был прекращен. Даже при условии линейного характера зависимости влагонасыщения от времени для центральной части высокопористого гидрофильного зерна полное насыщение достижимо только через 8–10 сут (рис. 6). Однако, вторая стадия изменения радиальных профилей влагодержания имеет нелинейный характер. Следующим этапом исследования будет решение уравнения насыщения пористой среды с целью выявления зависимости влагонасыщения полноразмерного доломитового зерна от времени.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать, что метод МРТ может быть успешно использован для изучения динамики не только процессов насыщения кернового материала, но и других процессов, таких как сушка керна [7] или фильтрация флюида в поровом пространстве кернов. Основным результатом применения МРТ к исследованию кернов являются данные о распределении флюида в плоском сечении (томограммы) керна. Имеющееся программное обеспечение позволяет получать данные о линейном распределении флюида вдоль выделенного на томограмме отрезка линии.

Исследование процесса водонасыщения доломитового керна в условиях полного погружения керна в емкость с водой показывает две стадии процесса насыщения. На первой, быстрой стадии наблюдается насыщение водой приповерхностного слоя керна. Вторая стадия характеризуется относительно медленным изменением флюидосодержания во внутренней части керна. Для количественного анализа и прямого сравнения экспериментальных данных с теоретическими моделями необходима дальнейшая работа по сведению всех моделей в единую систему и составления уравнения, описывающего поведение итоговой модели.

Благодарности. Авторы благодарят профессора Казанского федерального университета В.Д. Скирду за предоставленную возможность выполнить измерения на магнитно-резонансном томографе. Особенную благодарность выражаем аспиранту Д.Л. Мельниковой за оказанную помощь в проведении измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 02.G25.31.0131).

Литература

1. *Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Розенберг Г.Д.* Нефтегазовая гидромеханика. – М.-Ижевск: Ин-т компьют. исслед., 2005. – 543 с.
2. *Колесниченко А.В., Максимов В.М.* Обобщенный закон фильтрации Дарси, как следствие соотношений Стефана-Максвелла для гетерогенной среды // Матем. моделирование. – 2001. – Т. 13, Вып. 1. – С. 3–25.
3. *Лыков А.В.* Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1971. – 558 с.
4. *Хейфец Л.И., Неймарк А.В.* Многофазные процессы в пористых средах. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
5. *Голубев В.С., Гарибянц А.А.* Гетерогенные процессы геохимической миграции. – М.: Недра, 1968. – 191 с.
6. *Ильясов К.А.* Принципы получения изображений в магнитно-резонансной томографии. – Казань: Казан. фед. ун-т, 2014. – 31 с.
7. *Фаттахов А.В., Косарев В.Е., Скирда В.Д., Дорогиницкий М.М.* Изучение процесса высыхания полноразмерного керна методом ядерно-магнитного резонанса // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 61–63.

Поступила в редакцию
26.09.17

Кобчикова Полина Павловна, магистрант кафедры физики молекулярных систем

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *pollymoon@ya.ru*

Дорогиницкий Михаил Михайлович, инженер НОЦ «Современные геофизические технологии»

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *m_dorogin@bk.ru*

Фаттахов Артур Вилданович, ассистент кафедры геофизики и геоинформационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *avfattahov@kpfu.ru*

Косарев Виктор Евгеньевич, старший преподаватель кафедры геофизики и геоинформационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *victor.kosarev@kpfu.ru*

Муразакаев Владислав Марксович, главный инженер научно-технического управления

ООО «ТНГ-Групп»
ул. Ворошилова, д. 21, г. Бугульма, 423236, Россия
E-mail: *murza@tngf.tatneft.ru*

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2017, vol. 159, no. 4, pp. 618–628

**The Study of Water Saturation Process of Dolomite Core
under Atmospheric Pressure by MRI Method**

P.P. Kobchikova^{a}, M.M. Doroginitski^{a**}, A.V. Fattahov^{a***},
V.E. Kosarev^{a****}, V.M. Murzakaev^{a*****}*

^a*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

^b*“TNG-Group” Ltd, Bugulma, 423236 Russia*

E-mail: ^{*}*pollymoon@ya.ru*, ^{**}*m_dorogin@bk.ru*, ^{***}*avfattahov@kpfu.ru*,
^{****}*victor.kosarev@kpfu.ru*, ^{*****}*murza@tngf.tatneft.ru*

Received September 26, 2017

Abstract

The distribution of the fluid content in the process of water saturation of fine-grained full-sized dolomite core has been measured by magnetic resonance imaging (MRI). Two stages have been allocated in the saturation process. A rapid growth (up to 5 min) of the fluid content in the near-surface core layer (~0.5 cm) to the maximum saturation has been observed at the first “hydrodynamic” stage of the process. The hydrodynamic stage of fluid saturation with a void rock space has been considered in the framework of the Darcy filtration model. The pressure gradient in this model has been determined by the difference between the pressure of the fluid formed from the hydrostatic and capillary pressure and the increasing pressure of the compressed gas (air) in the confined pore space. At the second, “diffusion”, stage (from 5 to 320 min), the slow growth of the water content profile has been observed in the central part of the core compared to the hydrodynamic stage. The diffusion stage of saturation has been considered

within the model of equilibrium of fluid and gas pressures. The mass transfer of the fluid is carried out at the expense of the fluid content gradient.

Keywords: water saturation, porous space, dolomite core, magnetic resonance imaging, diffusion in porous space

Acknowledgments. We thank V.D. Skirda, Professor of Kazan Federal University, for the opportunity to perform measurements with a MRI scanner. We are especially grateful to D.L. Mel'nikova, postgraduate student, for her help during the measurement procedure.

The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. 02.G25.31.0131).

Figure Captions

Fig. 1. On the left – photos of the studied fragment of the full-sized dolomite core; on the right – MR images of the dolomite core in the sagittal and transversal projection.

Fig. 2. Transversal MR images of the core obtained at different stages of the saturation process: on the left – at the beginning of water saturation; on the right – at the final stage of water saturation; white spots on MR images – calibration phantoms.

Fig. 3. On the left – MRI intensity digitization: A) in the area of core saturation in the selected radial direction; B) in the area of noise. On the right – MRI intensity profiles: C) in the area of saturation $I_s(r)$; D) in the area of noise $I_n(r)$.

Fig. 4. The profiles of relative volumetric moisture content in the dolomite core sample at the first stage of saturation.

Fig. 5. The profiles of relative volumetric moisture content in the dolomite core sample at the second stage of saturation.

Fig. 6. Changes in the relative volumetric fluid content in the subsurface layer $w(R, t)$ and in the central part of the core $w(0, t)$. Saturation time point $t_c \sim 5$ min divides two different stages in the behavior of relative volumetric moisture content.

References

1. Basniev K.S., Dmitriev N.M., Rozenberg G.D. Oil and Gas Hydromechanics. Moscow, Izhevsk, Inst. Komp'yut. Issled., 2005. 543 p. (In Russian)
2. Kolesnichenko A.V., Maksimov V.M. The generalized Darcy law of filtration as inquest of Stefan–Maxwell relations for heterogeneous medium. *Mat. Model.*, 2001, vol. 13, no. 1, pp. 3–25. (In Russian)
3. Lykov A.V. Heat and Mass Transfer (Handbook). Moscow, Energiya, 1971. 558 p. (In Russian)
4. Heifets L.I., Neimark A.V. Multiphase Processes in Porous Media. Moscow, Khimiya, 1982. 320 p. (In Russian)
5. Golubev V.S., Garibiants A.A. Heterogeneous Processes of Geochemical Migration. Moscow, Nedra, 1968. 191 p. (In Russian)
6. Ilyasov K.A. Principles of Obtaining Images in Magnetic Resonance Imaging. Kazan, Kazan. Fed. Univ. 2014. 31 p. (In Russian)
7. Fattakhov A.V., Kosarev V.E., Skirda V.D., Doroginitskii M.M. Study of drying process in full-size core by nuclear magnetic resonance method. *Neft. Khoz.*, 2016, no. 3, pp. 61–63. (In Russian)

Для цитирования: Кобчикова П.П., Дорогиницкий М.М., Фаттахов А.В., Косарев В.Е., Мурзакаев В.М. Исследование процесса водонасыщения доломитового керна под атмосферным давлением методом МРТ // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2017. – Т. 159, кн. 4. – С. 618–628.

For citation: Kobchikova P.P., Doroginitskii M.M., Fattakhov A.V., Kosarev V.E., Murzakaev V.M. The study of water saturation process of dolomite core under atmospheric pressure by MRI method. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2017, vol. 159, no. 4, pp. 618–628. (In Russian)