Моделирование

DOI: 10.34828/UdSU.2024.67.31.004

УДК 622.276

Ф.И. Маврикиди, С.А. Хорьков

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ УНИКАЛЬНОСТИ И ЦЕЛОСТНОСТИ НЕФТЕГАЗОНОСНОГО ПЛАСТА

Аннотация. Статья посвящена развитию математической модели нефтегазового пласта в направлении учета его макрогеометрии и мультифизичности. Макрогеометрия пластовых систем стала доступна с развитием 3D моделей, которые предоставили возможность применения математических методов фрактальной геометрии для описания глобального распределения геолого-физических локальных свойств и введения общей геометрии пласта в качестве самостоятельного параметра. Математическое содержание предлагаемого подхода строится на числовой асимметрии, которая является формальным аналогом фрактальной геометрии материи. Такой подход позволяет объединить теорию линейного переноса с теорией перколяции фильтрационных процессов. Кроме того, наследуя универсальность фракталов в естествознании, метод может быть продолжен на процессы поверхностных физико-химических и нано явлений. В целом в потенции предлагаемого подхода содержится описание продуктивного пласта как целостного, междисциплинароного объекта нефтегазового производства. Целостность отображается в методе системными числовыми характеристиками – голограммой и мультифрактальностью свойств, которые синтезируют научные языки описания. Описана вычислительная асимметрия – как численный метод воплощения предлагаемого метода. Она заключается во взаимодействии гладких и дискретных методов численного анализа. Это в свою очередь впервые позволяет развить моделирование пластов с учетом их уникальности, что делает математическое описание надежным основание для разработки технологий нефтегазоизвлечения.
Ключевые слова: фракталы, числовая асимметрия, нефтегазоносный пласт, фильтрация, перколяция, макрогеометрия, междисциплинарность, математическое моделирование, теория систем.

Для цитирования: Маврикиди Ф.И., Хорьков С.А. Подход к моделированию уникальности и целостности нефтегазоносного пласта // Управление техносферой: электрон. журнал, 2024. Т.7. Вып.4. URL:https://technosphere-ing.ru С. 550–570.DOI: 10.34828/UdSU.2024.67.31.004.

Моделирование течения жидкостей в пористых пластах является определяющей темой нефтяной науки. Несмотря на значительные успехи в физико-математическом понимании этого явления, его практическая значимость остается невысокой. В последние годы наметился значительный прогресс в познании пластовых систем введением в научный арсенал 3D моделирования, которое позволило перенести пласт как объект моделирования из невидимого «подземного» пространства в доступное «лабораторное». Вместо привычной физической гетерогенной среды, которая описывается различными осредняющими и/или вероятностными техниками, наука получила в распоряжение образ, т.е. макрогеометрию, пласта во всем многообразии его неоднородностей. Возникла новая перспектива построения технологически адекватной модели фильтрации для нужд проектирования разработки [1]. Она заключается в возможности описания процесса вытеснения в конкретной геолого-физической картине пласта. Иными словами перед математикой поставлена задача моделирования уникальности при отсутствии экспериментальной воспроизводимости.

Постановка и описание проблемы. Новизна проблемы заключается в синтезе стандартного локального физико-математического описания посредством дифференциальных уравнений с уникальностью строения глобальной макрогеометрии пласта, которая должна рассматриваться как отдельный нефизический параметр, требующий включения в модель. Его глобальность есть невероятностная неопределенность. Эта неопределённость имеет характер «уже-заданной», наличной, но неопределимой алгоритмическими стандартными средствами структуры. Для её снятия не существует привычных формул, уравнений, алгоритмов, позволяющих сжать описание в какие-либо краткие формализмы. Она не имеет вероятности в классическом смысле.

Эта проблема известна в науке как проблема формализации связи Целого, большого (т.е. макрогеометрии пласта) и Части, малого (т.е. локального описания). В теории фильтрации этой паре соответствуют явления конвективного переноса, линейного движения жидкостей и диффузной теории перколяции. Если уравнения переноса трактуют пласт как однородную, предварительно отрегулированную среду, то теория перколяции имеет дело с неоднородностями и «чувствует» геометрию пласта.

Решение отмеченной проблемы состоит в переносе описания пласта из гладкого евклидова пространства во фрактальное гиперболическое. Этот шаг обосновывается дифференциальной геометрией – тело с множеством полостей (т.е. пор) является гиперболическим пространством [2]. Перенос и перколяция физически соответствуют двум сопряженным силам – растяжению и сжатию соответственно [3]. Эти противоположно направленные силы «ломают гладкость» пространства в каждой точке и превращают его во фрактальное. Они определяют двумерную, линейно-диффузную феноменологию течения, процессы которой независимы, но связаны гиперболической ортогональностью с законом сохранения массы. С другой стороны, пространство пор описывается как многомасштабная сеть, которая также является гиперболическим пространством как в общем [4], так и в специальном плане для процессов транспорта [5]. Таким образом, эта пара сил характеризует – как математически так и физически, пространство пласта, как гиперболическое.

Системность. В то время как в физике ограничиваются лишь констатацией образования нового макроскопического свойства, кластера, например такого, как проводимость, в теории фильтрации дело обстоит сложнее. Здесь требуется отразить конкретную геометрию протекания и «форму вязких пальцев», то есть указать в каком направлении будет развиваться фронт вытеснения. Форма фронта имеет решающее значение для проектирования процесса разработки пласта. При этом макроскопическое направление движения фронта зарождается уже на микроуровне процесса. Это типично нелинейный «эффект бабочки», требующий для своего учета введение «теоретического микроскопа», позволяющего отслеживать феномен на всем протяжении пространства и времени. Поэтому регулярные решения, основанные на механике сплошной среды здесь недостаточны.

Необходимость моделирования многопредметности – физико-химических превращений, электромагнитных, температурных, поверхностных явлений оказывается еще одним усложняющим фактором [6]. Его моделирование ведет к многомасштабному анализу. Фракталы – это не только масштабно геометрически инвариантное, но и масштабно качественно вариативное пространство вещества. С уменьшением масштаба меняются физико-химические свойства процесса. И, соответственно, модель процесса становится научно-многопредметной. Эта проблема известна в материаловедении как проблема формализации связи «состав-структура-свойство» (QSAR, QSPR – англ.) и эффект размера (частиц) (size effect – англ.) Поэтому ось иерархии масштабов, ось делимости вещества следует вводить как отдельную независимую координату процесса.

В современных теориях сложности разного рода часто используется вероятностная мера, посредством которой среда оцифровывается числовыми значениями. Теория вероятностей, как известно, полностью отделена от теорий вещества и материи, её мера вводится руками, её аксиоматика никак не связана с геолого-физико-химическими процессами. И, неясно, как она может быть использована в контексте мультифизичности, многомерности и нелинейности, так как здесь требуется согласование аксиоматик вероятностей различных наук. Вместо вероятности мы будем использовать теорию возможностей. Эта теория имеет источники во всех научных разделах. Она согласована с масштабной осью размеров и описывает степень материализации, проявления некоторого свойства вещества, множества, информации. В первом приближении, чтобы не углубляться в теорию, за меру возможности некоторого свойства можно положить ультраметрику – величину p-адической характеристики множества, то есть меру Хаара в степени фрактальной размерности. Такая мера неопределенности присуща самому процессу и меняется вместе с ним, а не привносится извне. Она имеет прозрачный физический смысл насыщенности порового пространства жидкостью. Поэтому, в уравнениях непрерывности, сохранения массы мы будем заменять вероятность мерой возможности.

Как и все инженерные задачи, ориентированные на практический результат, а не на теоретизирование, модель, претендующая на адекватность целям проектирования и производственной конкретики, получается очень объемной. Теоретическая проблема заключается в смысловом сопряжении разделов, которое сделало бы связным их взаимодействие и снятие границ между ними. Смысловая связь наук, входящих в модель, позволяет развить формальное понимание, которое далее можно транслировать в инженерные методики. Вычислительная проблема заключается в численном согласовании разных теорий, с тем, чтобы не потерять скрытые бифуркации на микромасштабах. Ввиду своей размерности и при наличии «эффектов бабочки» в движении фронта, эта проблема не может решаться приблизительно, упрощающими методами инженерных наук.

Специфика предполагаемой модели заключается во включении в теорию глобальной геометрии пористой среды. Целью настоящей статьи является демонстрация возможности интегрированного описания пласта на основе числовой асимметрии фракталов. Как системная теория этот подход имеет метатеоретический характер – теории (синтеза) уже разработанных отдельных теорий. Этот подход развивается авторами в течение ряда последних лет. [7] .

Числовая асимметрия пласта. Фрактальные среды представляются произведением двух основных числовых систем математики – вещественных R и p-адических (2-адических, диадических чисел Z_2). Эти системы определяют два различных, но совмещенных подпространства фракталов. Этот факт записывается как две точки зрения на фрактальную среду. С одной стороны она евклидова, гладкая, плотная. С другой – разрывная, иррегулярная, дисперсная.

$$R \leftarrow U = R \times Z_2 \rightarrow Z_2 \quad (1)$$

Здесь: U – числовая модель фрактального пласта, R – её пространство переноса, линейного движения, Z_2- пространство диффузного, перколяционного развития.

Введение в модель p-адических чисел Z_2 позволяет ввести в модель геометрию такой сложной системы как пласт. Согласно С.Уламу (1955 г.) p-адические числа являются геометрическим инвариантом, то есть деревом, процессов бесконечной делимости материи от мега- до нано- масштабов. Согласно А.Н. Паршину (1984 г.) p-адические числа имеют логико-лингвистическую природу и представляют собой пространство языка. Ю.И, Манин (2012-2013 гг.) интерпретирует строки p-адического дерева-языка в терминах сложности и указывает на энергетическое содержание этой скрытой переменной физики. И.В. Тананаев рассматривает ось делимости материи, координату размеров частиц как отдельную переменную, вводя, по сути дела, новую степень свободы. Теория фракталов вмещает все эти интерпретации. Их объединение выглядит следующим образом. В зависимости от энергетики процесса (давления) меняется степень проникновения жидкостей в пористую среду, заполняя поры все меньшего размера, при этом меняются её физико-химические свойства и возникают новые эффекты (процессы), отсутствующие на верхних масштабах пор (адсорбция, электризация, намагничивание).

Иными словами, во фрактальном пористом пласте следует вводить эту дополнительную степень свободы. Здесь пока проблемой остается химия. Химизм материи пока слабо формализован. Известно, что химия является ключевой в многомасштабном моделировании и во многом определяет пластовые процессы [8]. В самом общем представлении химические процессы также протекают в пространстве числовой асимметрии – как пара процессов типа «реакция-диффузия» [9]. И с этой точки зрения физико-химические процессы также укладываются в p-адическое пространство [10].

В основаниях математики p-адические числа представляют второй способ координатизации, введения числовых характеристик и развития строгости, дополнительный к евклидову (декартову) способу.

Соответственно, все числовые параметры имеют вид мультипликативных чисел:

$$u = x \cdot \xi,\ x \in R, \xi \in Z_2 \qquad (2)$$

Уравнение неразрывности. Рассмотрим уравнение неразрывности (CE – continuity equation – англ.) в простейшем виде без источников и стоков в рамках модели числовой асимметрии.

Прежде всего, обратим внимание на то, что параметр u из (2) в выражении (3) имеет двойной смысл: плотности массы (левая стрелка) и плотность в возможности (стрелка справа).

$$R \supset \rho \leftarrow x \cdot \xi \rightarrow \varphi \subset Z_2 \qquad (3)$$

Плотность в возможности – это масса в процессе рассеяния/агрегирования, то есть масса еще не полностью сконцентрированная.

Вместо интегрального вида CE напишем его слабую форму, где вместо плотности вероятности примем плотность в возможности, т.е. степень её «материальности»:

$$CE\ (x,t;\ \xi,\tau),\ m=\int_V u\cdot dv \tag{4}$$

При этом в (4) явно выделяется объем *V*. В дополнении к физическому локально однородному объему $V^{\bullet}$ в пространстве R^3, мы рассматриваем его и как неоднородный, состоящий из множества пор V° пространства Z_2. То есть включаем в рассмотрение внутреннюю геометрию объема пласта [3].

$$(V^{\bullet}(x,t)\subset R^3)\xleftarrow{\bullet}V\xrightarrow{\circ}(V^{\circ}(\xi,\tau)\subset Z_2) \tag{5}$$

Как известно, уравнение неразрывности инвариантно относительно природы массы – оно верно для всех видов материи. Это значит, что оно не зависит от конкретного ее вида и является чисто геометрическим фактом, описывающим не только константность физических характеристик, но и движения границ раздела, фронтов. Такая техника развита в так называемом методе множеств уровня [11]. Она естественным образом включается в модель.

Обычной техникой дифференцирования интеграла с переменным объемом, с учетом двойственностей (1)-(5) получим уравнение неразрывности для движения фронта под действием переноса во времени *t*, и перколяции – τ:

$$CE_R(\rho,x,t)+CE_{Z_2}(\varphi,\xi,\tau)+CE_U(V(x,\rho;\xi,\varphi;\ t,\tau))=0 \tag{6}$$

$$t\cdot\tau\approx const$$

Спецификой задачи моделирования уникальности является «двумерное», конвективно-диффузное движение объема/фронта вытеснения $CE_U(V(x,\varphi,\xi,t,\tau))=0$. С учетом взаимной формальной независимости переноса и перколяции он сводится к паре уравнений с одинаковой правой частью:

$$CE_R(V,x,t)=V(x,t.\xi^*,\tau^*) \tag{7}$$

$$CE_{Z_2}(V,\xi,\tau)=V(x^*,t^*,\xi,\tau)$$

Уравнения (7) с учетом соотношения времён (6) являются альтернирующей системой. Если работает перенос $\Delta t \approx 0 \rightarrow \Delta\tau >> 1$, то перколяция переходит в разряд шума, и, наоборот. Первое уравнение действует в линейном пространстве-времени при фиксированных переменных диффузного, второе – в диффузном, при фиксированном линейном пространстве-времени.

Второе уравнение в (7) собственно направляет течение в иррегулярной геометрии. Здесь используется 3D модель пласта с 3D картинами пористости, проницаемости как числовыми характеристиками сетевой структуры [12]. Такая картина снабжает уравнения (7) необходимыми коэффициентами по всей макрогеометрии пласта.

Продолжим использовать свойства *p*-адических чисел. Представим проблему фильтрации в качестве информационно-числовой голограммы – интерпретации геометрии пласта связью её компонент:

$$H \models \; Z_2 \cong \exp(Z_2) \cong [IFS \equiv \{0,1\}^N] \cong [Z_2 \rightarrow Z_2] \cong H \cong BA \tag{8}$$

Здесь слева направо: числовая *2*-адическая фрактальная модель пласта (Z_2); набор его частей, геологических неоднородностей ($\exp(Z_2)$); пласт как формальный язык итеративной системы функций, координатизирующей пласт ($[IFS \equiv \{0,1\}^N]$); пласт как пространство непрерывных функций ($[Z_2 \rightarrow Z_2]$), т.е. каналов и пор, доступных течению; гильбертово пространство (*H*) потребное для теорий поверхностных и нано- явлений (по сути дела, пласт как сложная поверхность); пласт как булева алгебра (*BA*) в её интерпретации как геометрия причинности, т.е. траекторий движения частиц потока.

Синтез процессов описывается рефлексивной формулой:

$$\forall n \in N, \quad Z_2 \cong Z_2 \times Z_2 \times \ldots \times Z_2 = Z_2^n, \tag{9}$$

где каждый сомножитель является одним из изоморфов. Отсюда их взаимовлияние; нисходящая причинность – влияние геометрии пласта, получается как:

$$Z_2^i = Z_2 \times \prod_{k \neq i} Z_2^k \tag{10}$$

Представление физических параметров. Физические параметры, как входящие, так и пока не вошедшие в уравнения, являются числовыми мерами, распределенными на некотором геометрическом носителе – площади, объеме. Они изменяются вместе с самим носителем. В предлагаемой модели такими носителями являются частичные объемы, получающиеся при движении (делении пространства) по иерархии *p*-адического дерева. Этому геометрическому представлению соответствует ось размеров частиц и их свойства, представленные масштабной осью. Масштабная ось ставит в соответствие каждому размеру определенное физическое свойство [13].

Все разнообразие свойств материи образует пространство Z_2 в его интерпретации А.Н.Паршиным, т.е. как пространство языка, дополнительное к интерпретации Улама-Тананаева – размеров частиц. В этом пространстве ось иерархии содержит названия свойств – механические, электромагнитные, и т.п. Уровень иерархии поперек её оси – вариации величин свойств. Точнее эту схему можно представить, если ввести «толстые уровни», т.е. в определении числа задать нормирование рациональными числами. В этом случае в (9) и (10) имеет смысл выделить свойства $Z_2^{свойства}$:

$$Z_2^i = \{Z_2 \times \prod_{k \neq i} Z_2^k\} \times Z_2^{свойства} \tag{11}$$

Таким образом, сопряжением деревьев делимости/масштабов/размеров и свойств материи создается пространство многомасштабного анализа.

Выражения (8)-(11) создают «лестницу» последовательного развития адекватности модели включением нужных параметров, число которых может варьироваться от пласта к пласту. Они позволяют единообразно включать или исключать из модели существенные или несущественные факторы и процессы. Детальное развитие этой схемы требует построения теории измерений, которая включала бы в себя не только разделы механики, но и физики, химии и термодинамики [14]. Тогда станет возможным обоснованное знание о влиянии микропроцессов на фильтрационные характеристики [8].

Подставляя такое представление в (8)-(11) получим взаимосвязь разнородных и разнопредметных параметров. Величина их связи дается тензорным произведением метрик соответствующих представлений. Для наших целей важно то, что тензорное произведение метрик имеет максимум и минимум, что позволит развить анализ на лимитирующие факторы фильтрации в различных условиях. Соответственно становится возможным развитие диагностики и управления процессом.

3D–образ. Сопряжение конвергентного и дивергентного процессов в формальных методах отображается как сопряжение градиента (вектора) $gradV$ потенциального поля V с дивергенцией (скаляром) $divV$. Это объясняется тем, что поле градиентов $gradV$ на скалярном поле V характеризует направление скорости изменения уровней этого поля, а $divV$ – расход поля в данной конкретной точке. Тогда закон Дарси в нашей схеме удваивается и повторяет вид для уравнения неразрывности (4)-(6). В его формулировку входит давление не только в конвергентном, энергетическом виде, но и в дивергентном, энтропийном распределении по порам различного размера. Уравнение Дарси во втором случае, т.е. в Z_2, необходимо сопряжено с масштабной осью качеств/свойств материи, т.к. на процесс начинают оказывать существенное влияние капиллярные силы, поверхностные и химические явления.

Тогда общее уравнение движения $v = -k \cdot gradP$ дополняется своим нелокальным 3D-распределенным видом, т.е. имитацией процесса на всем объеме пласта. В этом втором представлении все параметры представлены своими p-адическими образами.

За описанной схемой стоит большой объем физико-химического моделирования и работы по систематизации измерительных процедур и методик, которая должна составлять теорию измерений в нефтегазовом производстве [15]. В настоящее время единая, согласованная теория измерений полностью отсутствует. Эта область представляет набор разнообразных несвязанных фактов.

Вычислительная асимметрия и природа вязких пальцев. Решение системы уравнений (6)-(7) невозможно привычными аналитическими методами из-за информационной несвертываемости макрогеометрии в изолированное формальное описание. Идея решения заключается в синтезе теории и имитации – единственном подходе описания движения сложной системы.

В нашей модели возникает новый эффект, который заключается в связи гладкой аналитической части с дискретной имитационной. Эта связь реализуется двойной дискретно-непрерывной динамикой объема (7). В евклидовом пространстве работает метод множеств уровня, в p-адическом – дискретные «ползучие» техники (turtle graphics – черепашья геометрия).

В соотношении скоростей этих процессов скрыто возникновение бифуркаций – формы фронта вытеснения. Они порождают место возникновения и направление развития так называемых вязких пальцев (viscous fingers – англ.) [16]. Здесь нерешенной пока проблемой остается моделирование распределения давления на микро- и нано- уровне [17], которая является ключевой для отслеживания точек бифуркаций фронта.

Природа вязких пальцев заключается в выборе фронтом жидкости направления развития в зависимости от распределений составляющих комплекса факторов – проницаемости, размеров и геометрии пор, вязкости, давления нагнетания, физико-химии контактов материальных фаз. Этот параметр является нелокальным, несводимым к «физически бесконечно малому объему». Поэтому для его воспроизведения нужна модель с нелокальными свойствами. Такими являются сети и клеточные автоматы – несинтаксические, неформально-логические, недедуктивные способы описания сложных систем.

Эта модельная техника получила развитие в решеточном уравнении Больцмана и клеточно-автоматных моделях физических процессов. В ней геометрия несущей среды представляется отделенной от самого процесса и не входит в него. Клеточно-автоматные методы и модели решеточного уравнения Больцмана в настоящее время широко используются в различных физических процессах [18], в том числе и пористых средах [19]. Наш подход дополняет автоматную технику аналитикой движения объема.

Все пространство пласта можно отобразить большой матрицей. Хорошей иллюстрацией может служить изображение на экране монитора. Известно, что матричный анализ во многом повторяет обычное дифференциальное исчисление. Тогда, представления (8)-(10) есть матричные представления геолого-физических параметров. Уравнение Дарси не меняет вида при замене числовых величин их матричными представлениями и, поэтому, удваивается. Соответственно, здесь используются матрицы двух видов – стандартные и кронекеровы, действующие по двум осям – переносу и диффузии [20]. Поэтому матричное моделирование является продолжением модели числовой асимметрии пласта. Оно сочетает в себе методы решения дифференциальных уравнений для первого уравнения (6) в регулярной среде и решеточные методы имитации поведения этих решений в иррегулярной среде.

Описанная матричная модель имеет нелокальный характер. Динамика объема моделируется локальными, частичными распределенными объемами с матрицами в виде матриц смежности. Их движение по макрогеометрии имеет вид движения «поля зрения», области наблюдения. В этом случае изоморфы в соотношении (9) имеют смысл, как в (12), который извлекается из 3D модели пласта.

$$(Z_2 - поры)\times(Z_2 - проницаемость)\times(Z_2 \to Z_2 - линии\,тока)\times(2^{Z_2} - причинность), \quad (12)$$

Булева алгебра (Boolean array-булев вектор, bitmap-траектория пикселей, англ.) как модель причинности [21] вместе с градиентом поля линий тока аналогична правилу перехода для клеточных автоматов, представляющих собой систему, поведение которой полностью определяется текущим состоянием поля и локальными взаимодействиями [22]. Соответственно, дополнения и вариации уравнения Дарси будут отражаться этим правилом адекватно.

Перспектива развития метода. Развитие модели может происходить в направлении учета физико-химической механики скелета пласта и взаимодействия его с флюидом. В этом случае для скелета как сложной среды можно развить предлагаемый подход, образовав пару «внешнее (скелет)-внутреннее (флюид)». В этом случае в рассмотрение вводится второе пространство числовой асимметрии. Объединение этих пространств в реальный пласт дает проективную плоскость [23]. Проективная плоскость допускает переходы противоположных процессов, таких как, например, адсорбция и десорбция, испарение и конденсация и т.п. Тем самым создается пространство для последовательной физико-химической теории.

Заключение. В работе был описан подход к построению теории пластовых систем, ориентированный на достижение адекватности практическим требованиям – уникальности и многопредметности (многофакторности). В деталях эта модель имеет в значительной степени характер развития программных систем и органична современной идее цифровизации. Использование *p*-адических чисел позволяет расширить возможности моделирования без потери достигнутых результатов, как в теории, так и в практике нефтяной науки.

Недостатком метода является практически полное отсутствие сущностных математических моделей химии. В некоторой степени этот изъян может быть компенсирован балансовыми моделями. Но это остается в области эмпирии, в каждом случае вопрос должен быть исследован отдельно до включения его в модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологическое и гидротермодинамическое моделирование месторождений нефти и газа / Р.М. Тер-Саркисов, В.М. Максимов, К.С. Басниев [и др.] / под ред. Проф. В.М. Максимова и проф. Р.М. Тер-Саркисова. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. 452 с.
2. Hyde S. et.al. The Language of Shape. Elsevier, 1997. 383 p., ch.1.
3. Изотов А.Д., Маврикиди Ф.И., Хорьков С.А. Математический базис инновационных технологий нефтегазовой промышленности // Управление техносферой: электрон. журнал. 2019. Т.2. Вып. 4. URL: f-ing.udsu.ru/technosphere
4. Wei Peng et.al. Hyperbolic Deep Neural Networks: A Survey, arXiv:2101.04562v3 [cs.LG] 17 Feb 2021
5. Krioukov D. [et.al]. Hyperbilic geometry of complex networks, Phys. Rev., 2010, E 82, 036106
6. Zhen (Leo) Lui Multiphysics in Porous Materials. Springer, 2018. 431 p.
7. Хорьков С.А., Маврикиди Ф.И. Ценозы, системы и их модели: монография. Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2021. 92 с.
8. Сургучев, М.Л., Желтов Ю. В., Симкин Э. М. Физико-химические микропроцессы в нефтегазоносных пластах. М.: Недра, 1984. 215 с.
9. Grzybowski B.A. Chemistry in Motion. Reaction-Diffusion Systems for Micro- and NanoTechnology. Wiley, 2009. 288 p.
10. .Adamatzky A. [et.al]. Reaction-Diffusion Computers. Elsevier, 2005. 349p.
11. Gibou F., Fedkiw R., Osher S. A Review of Level-Set Methods and Some Recent Applications, J. Comput. Physics, 2018, vol. 3, pp. 82 – 109.

12. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. М.: Маска, 2009. 376 с.
13. Сухонос С.И. Масштабная гармония Вселенной. М.: Изд-во Новый центр, 2002. 253 с.
14. Panfilov M. Physicochemical Fluid Dynamics in Porous Media. Wiley, 2019. 396 p.
15. Cai J. Et.al. (eds.) Modelling of Flow and Transport in Fractal Porous Media. Elsevier, 2021. 272 p., Ch.3-5.
16. Si Suo et.al. Fingering Patterns in Hierarchical Porous Media, Phys. Rev., 2020, Fluids 5, 034301.
17. Galteland O, Bedeaux D, Hafskjold B., Kjelstrup S. Pressures Inside a Nano-Porous Medium. The Case of a Single Phase Fluid, Front. Phys, 2019, 7:60. Doi: 10.3389/fphy.2019.00060
18. Chopard B., Droz M. Cellular Automata Modeling of Physical Systems. Cambridge U.P., 1998, 340 p.
19. Succi S. The Lattice Boltzmann Equation for Complex States of Flowing Matter. Elsevier, 2018, 288 p., Ch.19
20. Изотов, А.Д., Маврикиди Ф.И. Фракталы. Делимость вещества как степень свободы в материаловедении. Самара, СГАУ, 2011. 128 с.
21. Яглом И. М. Булева структура и ее модели. М.: Сов. радио,1980. 192 с.
22. Тоффоли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов / пер. с англ. М.: Мир,1991, 280 с.
23. Хорьков С. А., Маврикиди Ф. И. Причинность ценозов и систем // Федоровские чтения — 2023: LIII Всерос. науч.-практич. конф. с междунар. участием (с элементами науч. шк. для молодежи) (Москва, 15–17 нояб. 2023 г.). Москва: Издательство МЭИ, 2023. С. 442 – 450.
24. Bennethum LS, Weinstein T. Three pressures in porous media, Transp Porous Media, 2004, 54:1–34. doi: 10.1023/A:1025701922798
25. Galteland O, Bedeaux D, Hafskjold B, Kjelstrup S. Pressures Inside a Nano-Porous Medium. The Case of a Single Phase Fluid., Front. Phys, 2019, 7:60. doi: 10.3389/fphy.2019.00060
26. Nikiel S. Iterated Function Systems for Real-Time Image Synthesis. Springer, 2007. 152 p.
27. Aja-Fernandez S. et.al. Tensors in Image Processing and Computer Vision. Springer, 2009 – 466 p.

28. Valavanides M.S., Payatakes A.C. True-to-mechanism model of steady-state two-phase flow in porous media, using decomposition into prototype flows, Advances in Water Recourses 24, 2001, pp. 385 – 407.
29. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлениям знаний в информатике / Пер с фр. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
30. Хорьков С.А. Теория возможности при расчете электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия // Федоровские чтения-2019: материалы XLIX Международной научно-практической конференции с элементами научной школы (Москва 20 – 22 ноября 2019) / под общ. ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 90 – 94.
31. Krzhizhanovskaya V.V. Sun S. Simulation of Multiphysics multiscale systems: Introduction to the ICCS'2007 workshop., In: International conference on computational science. Springer, Berlin/Heidelberg, (2007), pp 755–761
32. Meagher D. Geometric Modelling Using Octree Encoding, COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, 1982, 19, 129 – 147.
33. Хавкин А. Я. Наноявления и нанотехнологии в добыче нефти и газа. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. 692 с.
34. Нургатин Р.И., Лысов Б.А. Применение 3D моделирования в нефтегазовой отрасли // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2014. № 1(44), С. 66 – 73
35. Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. Моделирование процессов нефтегазодобычи. Нелинейность, неравновесность, неопределенность. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 368с.

Поступила в редакцию: 02.11.2024

Сведения об авторах
Маврикиди Федор Иванович
к.т.н., с.н.с. Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Москва, Россия.
E-mail: mavrikidi@mail.ru

Хорьков Сергей Алексеевич
доцент кафедры теплоэнергетики, Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет», 426034, ул. Университетская, 1/7, г. Ижевск, Россия. E-mail: horkov_07@mail.ru

F.I. Mavrikidi, S.A. Khorkov

AN APPROACH TO MODELING THE UNIQUENESS AND INTEGRITY OF AN OIL AND GAS FORMATION

Annotation. The article is devoted to the development of a mathematical model of an oil and gas formation in the direction of taking into account its macrogeometry and multiphysics. Macrogeometry of reservoir systems became available with the development of 3D models, which provided the opportunity to apply mathematical methods of fractal geometry to describe the global distribution of geological and physical local properties and introduce the general geometry of the formation as an independent parameter. The mathematical content of the proposed approach is based on numerical asymmetry, which is a formal analogue of the fractal geometry of matter. This approach allows us to combine the theory of linear transfer with the theory of percolation of filtration processes. In addition, inheriting the universality of fractals in natural science, the method can be extended to processes of surface physical, chemical and nano phenomena. In general, the potential of the proposed approach contains a description of a productive formation as an integral, interdisciplinary object of oil and gas production. Integrity is reflected in the method by systemic numerical characteristics - a hologram and multifractality of properties that synthesize scientific languages of description. Computational asymmetry is described - as a numerical method for implementing the proposed method. It consists in the interaction of smooth and discrete methods of numerical analysis. This, in turn, for the first time allows developing modeling of formations taking into account their uniqueness, which makes the mathematical description a reliable basis for the development of oil and gas recovery technologies.
Keywords: fractals, numerical asymmetry, oil and gas formation, filtration, percolation, macrogeometry, interdisciplinarity, mathematical modeling, systems theory.

For citation: Mavrikidi F.I., Khorkov S.A. [An approach to modeling the uniqueness and integrity of an oil and gas formation]. *Upravlenie tekhnosferoi,* 2024, vol. 7, issue 4. (In Russ.). Available at**:** https://technosphere-ing.ru/ pp. 550–570. DOI: 10.34828/UdSU.2024.67.31.004

REFERENCES

1. Ter-Sarkisov R.M., Maksimov V.M., Basniev K.S. [i dr.]. *Geologicheskoe i gidrotermodinamicheskoe modelirovanie mestorozhdenii nefti i gaza* [Geological and hydrothermodynamic modeling of oil and gas fields] In V.M. Maksimova i prof. R.M. Ter-Sarkisova (eds.). Moscow: Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovanii, 2015, 452 p. (In Russ.).
2. Hyde S. et.al. The Language of Shape. Elsevier, 1997. 383 p., ch.1.
3. Izotov A.D., Mavrikidi F.I., Khor'kov S.A. Matematicheskii bazis innovatsionnykh tekhnologii neftegazovoi promyshlennosti [Mathematical basis of innovative technologies in the oil and gas

industry]. *Upravlenie tekhnosferoi: elektron. zhurnal*. 2019, vol. 2, Issue 4. URL: f-ing.udsu.ru/technosphere (In Russ.).

4. Wei Peng et.al. Hyperbolic Deep Neural Networks: A Survey, arXiv:2101.04562v3 [cs.LG] 17 Feb 2021
5. Krioukov D. [et.al]. Hyperbilic geometry of complex networks, Phys. Rev., 2010, E 82, 036106
6. Zhen (Leo) Lui Multiphysics in Porous Materials. Springer, 2018. 431 p.
7. Khor'kov S.A., Mavrikidi F.I. *Tsenozy, sistemy i ikh modeli: monografiya* [Cenoses, systems and their models: monograph]. Izhevsk: Publ."Udmurt University", 2021, 92 p. (In Russ.).
8. Surguchev, M.L., Zheltov Yu. V., Simkin E. M. *Fiziko-khimicheskie mikroprotsessy v neftegazonosnykh plastakh* [Physicochemical microprocesses in oil and gas formations]. Moscow: Nedra, 1984, 215 p. (In Russ.).
9. Grzybowski B.A. Chemistry in Motion. Reaction-Diffusion Systems for Micro- and NanoTechnology. Wiley, 2009, 288 p.
10. .Adamatzky A. [et.al]. Reaction-Diffusion Computers. Elsevier, 2005, 349p.
11. Gibou F., Fedkiw R., Osher S. A Review of Level-Set Methods and Some Recent Applications, J. Comput. Physics, 2018, vol. 3, pp. 82 – 109.
12. Zakrevskii K.E. *Geologicheskoe 3D modelirovanie* [Geological 3D Modeling]. Moscow: Maska, 2009, 376 p. (In Russ.).
13. Sukhonos S.I. Masshtabnaya garmoniya Vselennoi. [Large-scale harmony of the Universe]. Moscow: Publ. New Center, 2002, 253 p. (In Russ.).
14. Panfilov M. Physicochemical Fluid Dynamics in Porous Media. Wiley, 2019. 396 p.
15. Cai J. Et.al. (eds.) Modelling of Flow and Transport in Fractal Porous Media. Elsevier, 2021. 272 p., Ch.3-5.
16. Si Suo et.al. Fingering Patterns in Hierarchical Porous Media, Phys. Rev., 2020, Fluids 5, 034301.
17. Galteland O, Bedeaux D, Hafskjold B., Kjelstrup S. Pressures Inside a Nano-Porous Medium. The Case of a Single Phase Fluid, Front. Phys, 2019, 7:60. doi: 10.3389/fphy.2019.00060
18. Chopard B., Droz M. Cellular Automata Modeling of Physical Systems. Cambridge U.P., 1998, 340 p.
19. Succi S. The Lattice Boltzmann Equation for Complex States of Flowing Matter. Elsevier, 2018, 288 p., Ch.19.

20. Izotov, A.D., Mavrikidi F.I. Fraktaly. *Delimost' veshchestva kak stepen' svobody v materialovedenii* [Divisibility of Matter as a Degree of Freedom in Materials Science]. Samara, SGAU, 2011, 128 p. (In Russ.).
21. Yaglom I. M. *Buleva struktura i ee modeli*. [Boolean Structure and Its Models]. Moscow: Sov. Radio, 1980, 192 p. (In Russ.).
22. Toffoli T., Margolus N. Mashiny kletochnykh avtomatov [Cellular Automata Machines]. In Toffoli T., Margolus N. (eds). Moscow: Mir, 1991, 280 p. (In Russ.).
23. Khor'kov S. A., Mavrikidi F. I. Prichinnost' tsenozov i sistem [Causality of cenoses and systems]. *Fedorovskie chteniya. 2023: LIII Vseros. nauch.-praktich. konf. s mezhdunar. uchastiem (s elementami nauch. shk. dlya molodezhi)* [*Fedorov readings – 2023: LIII All-Russian scientific-practical. conf. with international. participation (with elements of scientific school for youth)*]. (Moscow, November 15-17, 2023). Moscow: Publ. MPEI, 2023, pp. 442–450. (In Russ.).
24. Bennethum LS, Weinstein T. Three pressures in porous media, Transp Porous Media, 2004, 54:1–34. doi: 10.1023/A:1025701922798
25. Galteland O, Bedeaux D, Hafskjold B, Kjelstrup S. Pressures Inside a Nano-Porous Medium. The Case of a Single Phase Fluid., Front. Phys, 2019, 7:60. doi: 10.3389/fphy.2019.00060
26. Nikiel S. Iterated Function Systems for Real-Time Image Synthesis. Springer, 2007. 152 p.
27. Aja-Fernandez S. et.al. Tensors in Image Processing and Computer Vision. Springer, 2009 – 466 p.
28. Valavanides M.S., Payatakes A.C. True-to-mechanism model of steady-state two-phase flow in porous media, using decomposition into prototype flows, Advances in Water Recourses 24, 2001, pp. 385 – 407.
29. Dyubua D., Prad A. *Teoriya vozmozhnostei. Prilozheniya k predstavleniyam znanii v informatike* [Possibility theory. Applications to knowledge representations in computer science]. Prad A. (eds). Moscow: Radio and Communications, 1990, 288 p. (In Russ.).
30. Khor'kov S.A. Teoriya vozmozhnosti pri raschete elektropotrebleniya mnogonomenklaturnogo tsekha promyshlennogo predpriyatiya [Possibility theory in calculating the power consumption of a multi-product workshop of an industrial enterprise]. *Fedorovskie chteniya-2019: materialy XLIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s elementami nauchnoi shkoly (Moskva 20 – 22 noyabrya 2019)* [*Fedorovskie Readings-2019: Proceedings of the XLIX*

International Scientific and Practical Conference with Elements of a Scientific School (Moscow, November 20 – 22, 2019)]. In B.I. Kudrina, Yu.V. Matyuninoi (ed). Moscow: Publ. MPEI, 2019, pp. 90 – 94. (In Russ.).

31. Krzhizhanovskaya V.V. Sun S. Simulation of Multiphysics multiscale systems: Introduction to the ICCS’2007 workshop., In: International conference on computational science. Springer, Berlin/Heidelberg, (2007), pp 755–761.
32. Meagher D. Geometric Modelling Using Octree Encoding, COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, 1982, 19, 129 – 147.
33. Khavkin A. Ya. *Nanoyavleniya i nanotekhnologii v dobyche nefti i gaza* [Nanophenomena and nanotechnologies in oil and gas production]. Moscow–Izhevsk: NITs Institut komp'yuternykh issledovanii, 2010, 692 p. (In Russ.).
34. Nurgatin R.I., Lysov B.A. Primenenie 3D modelirovaniya v neftegazovoi otrasli [Application of 3D modeling in the oil and gas industry]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle RAEN*. [*Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences*]. 2014, no. 1(44), pp. 66–73. (In Russ.).
35. Mirzadzhanzade A.Kh., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. *Modelirovanie protsessov neftegazodobychi. Nelineinost', neravnovesnost', neopredelennost'*. [Modeling of oil and gas production processes. Nonlinearity, nonequilibrium, uncertainty]. Moscow: Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovanii, 2004, 368 p. (In Russ.).

Received: 02.11.2024

About the Authors

Mavrikidi Fyodor Ivanovich
Candidate of Technical Sciences, senior researcher, Institute of oil and gas problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
E-mail: mavrikidi@mail.ru

Khorkov Sergey Alekseevich
Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering, Institute of Oil and Gas named after M.S. Gutseriev, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Udmurt State University", 426034, University st., 1, Izhevsk, Russia.
E-mail: horkov_07@mail.ru