Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. И. Попков, В. П. Шакшин, Интегрированное геолого-гидродинамическое моделирование в системном управлении разработкой нефтегазовых месторождений, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2009, выпуск 1(), 239–250

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu655>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.89.185.249

26 апреля 2023 г., 09:11:44

Системный анализ

УДК 622.241:532.526.4

ИНТЕГРИРОВАННОЕ ГЕОЛОГО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМНОМ УПРАВЛЕНИИ РАЗРАБОТКОЙ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В. И. Попков^{1,2}, В. П. Шакин²

¹ Самарский государственный технический университет,
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

² СамараНИПИнефть,
443096, Самара, ул. Мичурина, 52.

E-mails: popkovvi@samnipineft.ru, shakshinvp@samnipineft.ru

Представлены реальные результаты в гидродинамическом моделировании, полученные на фронте инновационных решений в нефтяной отрасли в целом. Предложен формально-логический подход к определению системы в терминах теории категорий и приведены конечные результаты авторов для построения литолого-фациальных моделей залежей. Намечены пути обобщения существующей системы знаний о нефтяных месторождениях в единую модель-представление пластовой системы.

Ключевые слова: фильтрация, гидродинамика, системный анализ, теория категорий, эволюционная модель, гидродинамические исследования.

Введение. Интенсивное развитие нефтегазодобывающей промышленности начала XXI века требует повышения эффективности процессов добычи углеводородов, увеличения нефтегазоотдачи пластов, совершенствования систем разработки и эксплуатации газонефтяных месторождений. Внедрение новейших систем разработки месторождений сопровождаются внедрением 4D-технологий анализа (пространство с учётом временной составляющей) исследований в нефтепромысловой геологии, геофизике, гидрогеологии, физике пласта, наземной и подземной гидрогазодинамики с интенсивным использованием «интеллектуальных» горизонтальных и многоствольных скважин различной «архитектуры». Возникает проблема интеграции названных отраслей науки совместно с изменёнными представлениями о картине мира в единую систему, направленную на решение задачи оптимального управления объектами разработки [1–9].

Внутреннюю, подземную часть разработки нефтегазовых месторождений интегрированного геолого-гидродинамического проектирования, гидродинамические и фильтрационно-емкостные характеристики пластов наиболее достоверно отражают геолого-промысловые материалы. Одним из наиболее эффективных способов оценки системы разработки газонефтяного месторожде-

Попков Вячеслав Иванович — доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений; к.ф.-м.н, доцент.

Шакин Вадим Петрович — зав. лабораторией автоматизированных решений.

ния является математическое моделирование процессов, происходящих при вытеснении нефти и газа из пласта. Модель является средством анализа и оптимизации геолого-технологических мероприятий при принятии решений по реализации стратегии управления разработкой [1]. Для поиска такого решения, которое осуществляло бы целенаправленное воздействие на выявленные проблемные участки, необходимо детальное изучение влияния различных геолого-промысловых факторов и индуцированных техногенных эффектов на эффективность разработки нефтяных месторождений.

Одновременное трёхмерное движение двух или трёх фаз в пористой среде, неоднородность среды, взаимодействие фаз между собой и с твёрдым скелетом пористой среды чрезвычайно осложняют интеграцию гидродинамического моделирования процессов вытеснения нефти из пласта [6]. Анализ многочисленных процессов разработки на постоянно действующих геолого-гидродинамических моделях [1], проведённый авторами [2, 5], показал, что необходимо пересмотреть существующие методы определения состояния пластов и их интеграции к общезфизической картине геолого-гидродинамического строения залежей, новым данным бихевиористического толка (дополнение моделей свойств, нелинейных изменений в зонах распространения воздействия, моделей двойных пористо-проницаемых сред и т. д.).

Одним из способов интеграции гидродинамических знаний о процессах в общезфизическую теорию выступают методы сопряжения граничных явлений (граничных условий), индуцированных самой флюидо-геологической системой [2–11]. Новая скоростная трёхмерная трёхфазная численная геолого-гидродинамическая модель [2, 5], реализованная авторами в 4D пространстве, дополняет одномерные аналитические [8, 9] и двумерные численные [10, 11] модели фильтрации многофазных жидкостей свойствами объёмного распространения воздействия, его замера и исследования. Это означает, что каждое исследование геологических параметров пласта уже не является замером начального состояния пласта, а выступает значением характеристик для текущего его состояния, скорректированного соответственно условиям стратегии разработки месторождения на дату замера.

Модель нефтегазового месторождения базируются на некотором статичном геологическом каркасе [1], ограниченном геологическими скоростями, бесконечным временем релаксации и проблемой их сопряжения с макроскопическими фильтрационными процессами для осуществления дальнейших прогнозных расчётов. Для анализа и оценки текущего состояния разработки месторождения одним из наиболее эффективных способов получения представительной информации о системе является математическое моделирование эволюционных процессов, происходящих при вытеснении нефти из пласта. Современные математические методы в моделировании позволяют решать совместные задачи формирования адаптированной пластовой залежи с одновременным анализом степени погрешности наблюдаемых параметров (функции воздействия на пластовую систему) как меры *определённости неизвестных параметров модели*. Сформулировать и одновременно поставить единую самодостаточную и непротиворечивую задачу формирования гидродинамически-адаптированной геологической модели пластовой залежи на основании исходных данных по скважинам является целью настоящей работы.

Поскольку первичной считается входная информация в представляемую

модель фильтрационного процесса, геолого-гидродинамического явления и т. д., то предлагаемые в настоящее время решения научных и технических проблем разработки нефтегазовых месторождений получены преимущественно путём создания новых и совершенствования существующих методов анализа и обработки информации. Новые представления о геологическом моделировании предполагают создание такой статической модели пласта, которая учитывала бы особенности регионального распространения пластов-аналогов, их фильтрационно-ёмкостных свойств, физико-химических свойств нефти, воды, текущей кумулятивной истории разработки (интегральные накопленные показатели добычи нефти и жидкости, дифференциальную обводнённость и т. п.). Основой построения геологической модели должен быть не просто набор статических данных в единственной интерпретации, но и динамические исследования пласта, а результатом такого моделирования уже будет не единичное представление, а некоторый спектр равновероятных обоснованных прогностических моделей, в каждой из которых геофизические характеристики резервуара восстанавливаются и уточняются на базе динамических данных, охватывающих историю разработки, результаты интерпретации геолого-гидродинамических исследований скважин, варианты разработки, конечные результаты гидродинамического моделирования и их анализа и т. д. Наиболее полными будут считаться такие варианты геологической модели, которые позволят в рамках допустимой свободы уточнения параметров сформировать полную последовательность последующих этапов проектно-технологического документа.

В качестве модели пластовой системы используется некоторая совокупность представлений о процессах, происходящих в нефтяном пласте, которая в дальнейшем видоизменяется до некоторых абстрактных форм (уравнения), и, соответственно, целевых установок. Пласт представляется объектом некоторого абстрактного класса с собственным множеством морфизмов. Поскольку физическая система может являться элементом сразу нескольких абстрактных классов, то модель системы «нефтяной пласт» представляет собой многокомпонентное представление о каждом индивидуальном явлении, происходящем в системе. Единая модель нефтяного пласта может содержать противоречия, устранение которых должно осуществляться непосредственным анализом косвенных характеристик о состоянии пласта в сопоставлении с полученными модельными данными. Возникает необходимость принятия решения, которое бы мотивировалось обоснованными выводами из интегрированного анализа на базе существующих данных.

Система представляет собой набор категорий, каждая из которых описывает некоторое конкретное явление в пласте:

$$S = \bigcup_{l \in I} \{ \langle \text{Ob}(K_l), \text{Mor}(K_l) \rangle \},$$

где S — система; K_l — категория системы; $\text{Ob}(K_l)$ — класс объектов категории K_l , $\text{Mor}(K_l)$ — класс морфизмов категории K_l .

Необходимо ввести наложения эффектов явлений, следования явлений и прочее — это описывается посредством операций взаимодействия между объектами разных категорий и операций соответствия между морфизмами объектов различных категорий; то есть существует некий набор функторов

между категориями системы. Для представления иерархии объектов необходимо описать операцию принадлежности объектов разных категорий друг к другу. Операция принадлежности одного объекта к другому также будет описываться некоторым набором категорий. При этом должно выполняться условие следования.

Пусть $\Phi_{\subset}(S)$ — набор функторов принадлежности для системы S (функторы принадлежности несут информацию преимущественно об отношении объектов, их условной иерархии, т. е. ограничения на отношение между морфизмами классов в этих функторах пока вводить нецелесообразно на данном этапе формирования задачи). Тогда целесообразны следующие требования:

- 1) $(F_1, F_2 \in \Phi_{\subset}(S), F_1: K_1 \rightarrow K_2, F_2: K_2 \rightarrow K_3) \Rightarrow (\exists F_3 \in \Phi_{\subset}(S), F_3: K_1 \rightarrow K_3);$
- 2) $(F \in \Phi_{\subset}(S), F: K_1 \rightarrow K_2) \Rightarrow (\exists F^{-1} \in \Phi_{\subset}(S), F^{-1}: K_2 \rightarrow K_1),$
где $K(\mathbb{R}^n)$ — множество всех компактных множеств $\mathbb{R}^n$.

Помимо функторов принадлежности для системы требуются функторы взаимодействия $\Phi_{\leftrightarrow}(S)$, суть которых будет заключаться в том, что из взаимодействия между объектами одной категории должно следовать (или не следовать) взаимодействие для объектов другой категории. При этом иногда возможно однозначное соответствие между подклассом морфизмов одной категории системы и некоторым подклассом морфизмов другой категории. Возможно рассмотрение нечётких функторов взаимодействия, когда каждое взаимодействие имеет собственный вес. Возможны категории высшей удалённости в принадлежности, объекты которых не принадлежат никакому другому классу, кроме класса, сопоставляемого с системой (пласт, месторождение, вселенная и т. п.). Совокупность классов системы должна быть изначально избыточна и противоречива, в противном случае систему можно было бы смоделировать как совокупность непересекающихся категорий или подсистем. Такая система будет тривиальной.

Избыточность системы подразумевает под собой, что ряд категорий имеют пересечения в классах объектов, но при этом симметрическая разность классов объектов категорий содержит элементы из классов объектов каждой категории. Для категорий вложимых по классам объектов одна в другую множества морфизмов не пересекаются.

Условие *противоречивости системы* означает, что для некоторых взаимодействующих категорий K_1 и K_2 системы S выполняется:

$$\begin{aligned} & \left(\exists F \in \Phi_{\leftrightarrow}(S), F: K_1 \rightarrow K_2, F_{\text{Ob}}: \text{Ob}(K_1) \rightarrow \text{Ob}(K_2), \right. \\ & \quad \left. F_{\text{Mor}}: \text{Mor}(K_1) \rightarrow \text{Mor}(K_2) \right) \Rightarrow \\ & \left(\exists k_1^1, k_1^2 \in K_1; k_2^1, k_2^2 \in K_2: \right. \\ & \quad \left. (\forall m_1 \in \text{Mor}(K_1), m_2 \in \text{Mor}(K_2): \overline{\exists k_1^1 m_1 k_1^2} \wedge \overline{\exists k_2^1 m_2 k_2^2}) \Rightarrow F_{\text{Mor}}(m_1) \neq m_2 \right). \end{aligned}$$

Если имеется противоречивая избыточная система, то возникает необходимость в проведении системного анализа, иначе, как уже говорилось выше, система распадается на некоторую совокупность непересекающихся, возможно, взаимодействующих, подсистем. В случае взаимодействующих подсистем совокупность функторов взаимодействия можно разбить на внутренние взаи-

модействия каждой подсистемы и функторы взаимодействия непосредственно подсистем.

В качестве примера действия функтора принадлежности можно привести принадлежность скважины пласту. Морфизмы скважин могут включать свойство «слышать друг друга», полученное по результатам гидропрослушивания пласта, что будет представлять собой степень оценки принадлежности, таким образом, функтор будет нечётко определять родительский объект, тем самым, возможно, разбивая весь объект категории на «возможные подобъекты».

Для описания системы одними из наиболее важных будут отображения категорий системы в некоторые классифицирующие или измеряющие множества. Совокупности таких отображений должны иметь соответствие при функторном отображении между категориями. Это позволяет увязывать явления различных категорий и оценивать степень следования явлений и объектов различных категорий. Полное определение системы будет иметь вид

$$S = \bigcup_{l \in I} \{ \langle \langle \text{Ob}(K_l), \text{Mor}(K_l) \rangle, \{ (\alpha, \beta) | \alpha: \text{Ob}(K_l) \rightarrow X_l; \beta: \text{Mor}(K_l) \rightarrow Y_l \} \rangle \},$$

где X_l, Y_l — классифицирующие или измеряющие множества образов (представляющими идентификаторы моделей явлений и классифицирующие эти объекты мониторинга и т. п.) или измеряющими (представляющими собой распределения свойств объектов и явлений; определяющими степень достоверности какого-либо представления и т. п.). Тем самым оказывается принципиально формализуемым общее определение системы, усложняясь в каждом конкретном случае в силу уточнения взаимодействующих объектов и т. п.

Для каждого отдельного компонента системы требуется индивидуальное описание, которое в дальнейшем вливается в общую структуру системы по веткам взаимосвязей категорий и т. д. Вся совокупность данных, отражающая начальное состояние пласта, может именоваться *обобщённой геологической моделью месторождения* и включает в себя петрофизическую модель, данные геофизических исследований скважин, концептуальную модель, седиментологическую модель месторождения, данные о тектонике региона, статистику по пластам-аналогам и т. д. По сути, *геологическая база* охватывает весь спектр геологических представлений о региональной геологии, особенностях формирования данного типа пластов и залежи и включает в себя геологическую модель всего лишь как одну из собственных компонент. В соответствии с вышеизложенным, базируясь на данных по распределению дискретного значения «типа» по скважинам, согласно определённой методологии, предлагается математическая формализация заполнения пространства данными, имеющими дискретное распределение (принимаящими целые значения).

1. Решение задачи заполнения компактного разбиения дискретным свойством. Известны значения некоей функции F , действующей из пространства $\mathbb{R}^3$ в некоторый отрезок натурального ряда. Предположим, что F действует из компакта G , тогда строим разбиение компакта на более мелкие компакты, пересекающиеся, разве что, по множеству меры нуль. Далее на некотором подмножестве множеств разбиения строится функция f , причём значения по скважинам, пересекающимся с ячейками, задаются в качестве исходных начальных данных.

Постановка задачи. Зная значения функции f в некоторых множествах разбиения, необходимо продолжить функцию f на всё разбиение. Построение этой функции основано на некоем критерии h , который характеризует каждое дискретное значение свойства. В зависимости от вида критерия получим заполнение всех ячеек разбиения. Таким образом, для задачи подобного вида устанавливается критериальное продолжение функций вида f , математический поиск которого и будет рассмотрен ниже.

Пусть задано множество $G \in K(\mathbb{R}^n)$. Рассмотрим разбиение этого множества на компакты, обладающие следующими свойствами:

$$\begin{aligned} G &= \bigcup_{k=1}^N G_k, \quad N = m_1 m_2 \cdots m_n, \\ \forall i_1, i_2: \text{mes}(G_{i_1} \cap G_{i_2}) &= 0, \quad \forall i: \text{mes}(G_i) \neq 0, \quad G_i \in K(\mathbb{R}^n); \\ \Omega &= \left\{ \left\{ G_{i_j} \right\}_{j=1}^l \middle| \text{mes} \left(\left(\bigcup_{j_1=1}^{l_1} G_{i_{j_1}} \right) \cap \left(\bigcup_{j_2=1}^{l_2} G_{i_{j_2}} \right) \right) = 0 \right\}, \\ \Omega_l &\in \Omega, \quad \bigcup_k \bigcup_{j_k=1}^{l_k} G_{i_{j_k}} \subset G; \\ \Omega_l &= \bigcup_{\omega} \Omega_l^{\omega}, \quad \omega \in [0, P]_{\mathbb{N}}; \quad \psi: \bigcup_l \Omega_l \rightarrow [0, P]_{\mathbb{N}}, \quad \psi \left(\bigcup_l \Omega_l^{\omega} \right) = \omega, \end{aligned}$$

где mes — абстрактная мера; Ω_l — объединение всех компактов из компактного разбиения компакта-универсума, пересекающихся с l -той скважиной; Ω — подмножество компактного разбиения компакта-универсума, $[0, P]_{\mathbb{N}}$ — отрезок натурального ряда, Ω_l^{ω} — каждый компакт из компактного разбиения, пересекающийся с l -той скважиной и идентифицирующий с дискретным значением ω ; $\psi: \bigcup_l \Omega_l \rightarrow [0, P]_{\mathbb{N}}$ — функция-идентификатор.

Обозначим: Ψ — продолжение функции-идентификатора на весь компакт-универсум, $\text{сеп}(G)$ — центр множества G ; κ — псевдометрика; ∂X — граница множества X ; $\text{Гео}_{\alpha, \beta, \gamma, \delta, v}^{\omega}(X)$ — геологический критерий для множества X ; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, v, \omega$ — параметры геологического критерия.

Необходимо построить продолжение Ψ функции ψ такое, что:

- 1) $\Psi: \{G_i\}_{i=1}^N \rightarrow [0, P]_{\mathbb{N}}$;
- 2) $\Psi \Big|_{\bigcup_{E \in \Omega} E} = \psi$.

В общем виде таких функций очень много, поэтому будем искать только те, которые удовлетворяют некоторым условиям. Введём несколько определений.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. *Центром* $\text{сеп}(G_i)$ назовём множество таких $g \in G_i$, что $G_i \subset B(\rho, g)$, причём

$$\rho = \inf_{\{G_i \subset B(r, g)\}} \{r\}; \quad \forall h \neq g: (\forall r_h: G_i \subset B(r_h, h)) \Rightarrow (r_h \geq \rho),$$

где $B(\rho, g)$ — шар радиуса ρ с центром в точке g .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 2. Псевдометрикой $\kappa: \{G_i\}_{i=1}^N \rightarrow \mathbb{R}_+$ назовём следующую величину:

$$\kappa(G_1, G_2) = \sup_{\substack{g_1 \in \text{cen}(G_1), \\ g_2 \in \text{cen}(G_2)}} \rho(g_1, g_2).$$

Пусть $\Upsilon = \{G_i\}_{i=1}^N \setminus \bigcup_{E \in \Omega} E$, возьмём $X \in \Upsilon$, тогда

$$\varepsilon_\alpha^\omega(X) = \frac{1}{\text{mes}(X)} \cdot \sup_{T \in \bigcup_l \Omega_l^\omega} \left\{ \frac{\text{mes}(T) + \alpha}{\kappa(X, T) + \alpha} \cdot \frac{\alpha}{\rho(\partial X, \partial T) + \alpha} \right\}.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 3. Геологическим критерием назовём величину следующего вида:

$$\begin{aligned} \text{Geo}_{\alpha, \beta, \gamma, \delta, v}^\omega(X) = & \sqrt{\frac{n^{\langle \rho(\partial X, \partial^T \Omega_l^\omega) \leq \gamma \rangle}}{n^{\langle 0 \leq \frac{\rho(\partial X, \partial^T \Omega_l)}{\rho(\partial X, \partial^T \Omega_l^\omega)} \leq 1 + \beta, \rho(\partial X, \partial^T \Omega_l) \leq \gamma \rangle}}} \times \\ & \times \sqrt{\frac{n^{\langle \kappa(X, {}^T \Omega_l^\omega) \leq \delta \rangle}}{n^{\langle 0 \leq \frac{\kappa(X, {}^T \Omega_l)}{\kappa(X, {}^T \Omega_l^\omega)} \leq 1 + v, \rho(X, {}^T \Omega_l) \leq \delta \rangle}}} \cdot \varepsilon_\alpha^\omega(X), \end{aligned}$$

где n — число множеств X , удовлетворяющих условию, стоящему в качестве верхнего индекса над n ; левый индекс T означает, что берутся только те множества, граница которых целиком попадает в указанную окрестность центра исходного множества; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, v$ — функции от ω .

В качестве решения получим, например,

$$\Psi(X) = \omega \Leftrightarrow \forall t : \frac{\inf_X \text{Geo}_{\alpha, \beta, \gamma, \delta, v}^\omega(X)}{\text{Geo}_{\alpha, \beta, \gamma, \delta, v}^\omega(X)} \leq \frac{\inf_X \text{Geo}_{\alpha, \beta, \gamma, \delta, v}^t(X)}{\text{Geo}_{\alpha, \beta, \gamma, \delta, v}^t(X)}.$$

Данное решение сходится и является единственным [5].

На базе выделенного распределения дискретных свойств (фашии, литология и т. п.) формируется геометрия геологических слоев модели и соответствующий геологический массив свойств и передается в гидродинамическую модель.

2. Адаптированное формирование гидродинамической модели залежи. Решения гидродинамических задач наиболее чувствительны к граничным условиям, представленным в пластовых системах образованиями, которые характеризуются коллекторскими свойствами, близкими кровле пласта или имеющими высокий градиент начального сдвига: глинистым, сланцевым и аргиллитовым пропласткам. Для подобных поверхностей должно соблюдаться основное граничное условие в задаче гидродинамического расчёта процессов фильтрации — скорости течения флюидов на непроницаемых границах равны нулю.

Согласно представлениям о пласте как о динамической техногенно-естественной системе, учитываются также вторичные эффекты формирования

залежи, поскольку разрабатываемый пласт уже не будет статичным объектом, по сути же в такой системе уже будут наблюдаться эффекты вторичного переформирования системы: вторичная (техногенная) трещиноватость пласта, защемление запасов нефти в матрице породы и т. п.

Эффект переформирования запасов матрицы в застойную область (недренируемую) обусловлен высокой пьезопроводностью трещин и слоев «суперколлектора» в сравнении с низкопроницаемой матрицей и более быстрой скоростью выработки этих запасов, не согласованной со временем релаксации матричной проницаемости [11]. В результате того, что запасы матрицы обладают большим временем отклика (релаксации), они оказываются отсечёнными в рамках сформированных токов, ориентированных по естественной и вторичной трещиноватости пласта. Подобные эффекты на «сверхмалых» скоростях фильтрации происходят в пограничных фациальных зонах фильтрации или в самой матрице с формированием «туннельных», канальных [10] эффектов.

Упомянутая «скоростная» модель пограничного слоя фильтрации [2, 5] предлагает решение подобных задач анализа, идентификации и управления на основе численного учета эволюционных процессов при разработке углеводородов. На рис. 1 представлено классическое линейное скоростное решение области фильтрации на бесконечности (порядка 10^6 м от скважины). Из гидродинамических исследований скважин известно, что радиус радиального дренирования скважины не превышает 200–300 м, т. е. расстояния не больше трёх логарифмических циклов от скважины. При сверхмалых линейных скоростях $U \sim 10^{-6}$ м/с в удалённой области фильтрации формируется переходная зона релаксации скоростных напряжений за счёт капиллярных и архимедовых сил с образованием недренируемых зон или областей запирания филь-

Рис. 1. Геомеханическая (гидродинамическая) эволюция изменения остаточной нефтенасыщенности при затухании макроскопической фильтрации

трации [2–4]. Первоначально радиальный процесс фильтрации для неоднородного многослойного коллектора эволюционно трансформируется в объёмный образ с нелинейными (фрактальными) эффектами в переходной области $U \sim 10^{-6} \pm \varepsilon$ м/с, что согласуется с наблюдаемыми зависимостями остаточной (неподвижной) доли нефти с уменьшением проницаемости коллектора до минимальной непроницаемой по лабораторным измерениям (рис. 2).

В линейном случае не работает только первый слой с минимальной проницаемостью $0,001 \cdot 10^{-12}$ м², другие слои обеспечивают радиальный приток с «бесконечности» к скважине, т.к. скорость не ограничена снизу. Введение в модель скорости «динамического запирания» $U \sim 10^{-6} \pm \varepsilon$ м/с приводит к нелинейному искривлению линий тока, в том числе и главной линии тока. Происходит процесс обтекания запертого объёма углеводородов структурированными плёнками, ламеллами и глобулами нефти с эффектами отрыва их с обтекаемой поверхности за счёт работы капиллярных и гравитационных архимедовых сил. Процесс обтекания застойных зон определяемых таким образом *трудноизвлекаемых* запасов происходит за счёт предельных канальных или «туннельных» скоростей, разрывающих оставшиеся запасы на множество матричных, изолированных областей. При несогласовании времени отклика матрицы со скоростью фильтрации в трещинах происходит их полное отсечение от фильтрационных процессов по трещинам, каналам, туннелям и т.д. и консервация во внешней области фильтрационных каналов.

Взаимодействие в рамках предложенной модели формируется на базе следующего утверждения: *каждое действие в настоящем сказывается на будущем, однако, поскольку будущее формируется сейчас, то будущее сказывается на настоящем посредством намерения, т.е. существует связь между будущим и прошлым (скорость течения), а в перерывах между взаимодействием (время отклика системы) будущее и прошлое сосуществуют по внутренним законам, подготавливаясь к отклику (бихевиоризм)*. А это означает, что у нас формируется три системы уравнений. Решение из первой посылается во вторую, а пока вторая реагирует, первая существует по собственным законам (собственное время и т.д.). В нашем случае это означает, что между тремя зонами (или более — тут уж, сколько мы выделим), существуют особые формы взаимодействия, возможно, более простые, чем собственные законы существования, а выразителем формы существования будет приток между областями фильтрации. Помимо собственно изменённых дифференциальных законов возможно введение форм взаимодействия между областями типа «действие – реакция». По сути, данный вопрос завязан с вопросом о том, может ли что-либо оказаться где угодно или только там, где оно может оказаться? А во втором случае одно-

Рис. 2. Геологические условия увеличения остаточной нефтенасыщенности в поровом пространстве в зависимости от проницаемости коллектора: сплошная линия — расчётные данные; точки — фактические данные

значно следует утверждение о том, что намерение, чем, по сути, являются любые начальные и граничные условия, определяет будущее не в меньшей степени, чем, собственно, ближайшее будущее влияет на текущее намерение, что отражается, к примеру, в инерционных процессах системы.

Поэтому общее развитие системы будет описываться законом ожидания отклика системы от самой себя, что характеризуется характерными временами процессов системы:

$$\begin{array}{ccccc}
 \left\{ \begin{array}{l} L^1 u = F^1(u, \vec{r}, t); \\ l_0^1 u = f_0^1(\vec{r}); \\ l_{\partial G}^1 u = f_{\partial G}^1(\vec{r}, t). \end{array} \right. & \xrightarrow{\text{взаимодействие}} & \left\{ \begin{array}{l} L^2 v = F^2(u, v, \vec{r}, t); \\ l_0^2 v = f_0^2(\vec{r}, u(\vec{r}, t_{i+1})); \\ l_{\partial G}^2 v = f_{\partial G}^2(\vec{r}, u, t). \end{array} \right. & \xrightarrow{\text{эволюция}} & \left\{ \begin{array}{l} L^3 v = F^3(v, \vec{r}, t); \\ l_0^3 v = f_0^3(\vec{r}, u(\vec{r}, t_{i+1})); \\ l_{\partial G}^3 v = f_{\partial G}^3(\vec{r}, u, t). \end{array} \right. \\
 t \in [t_i, t_{i+1}] & & t \in [t_{i+1}, t_{i+2}] & & t \in [t_{i+2}, t_{i+4}] \\
 & \nwarrow \text{эволюция} & & \nwarrow \text{взаимодействие} & \\
 \left\{ \begin{array}{l} L^1 u = F^1(u, \vec{r}, t); \\ l_0^1 u = f_0^1(\vec{r}); \\ l_{\partial G}^1 u = f_{\partial G}^1(\vec{r}, t). \end{array} \right. & \xrightarrow{\text{взаимодействие}} & \left\{ \begin{array}{l} L^4 u = F^4(u, v, \vec{r}, t); \\ l_0^4 u = f_0^4(\vec{r}, v(\vec{r}, t_{i+3})); \\ l_{\partial G}^4 u = f_{\partial G}^4(\vec{r}, v, t). \end{array} \right. & \xrightarrow{\text{эволюция}} & \left\{ \begin{array}{l} L^3 v = F^3(v, \vec{r}, t); \\ l_0^3 v = f_0^3(\vec{r}, u(\vec{r}, t_{i+4})); \\ l_{\partial G}^3 v = f_{\partial G}^3(\vec{r}, u, t). \end{array} \right. \\
 t \in [t_{i+1}, t_{i+3}] & & t \in [t_{i+3}, t_{i+4}] & & t \in [t_{i+4}, t_{i+6}]
 \end{array}$$

Здесь L^i — дифференциальный оператор, l_0^i — оператор начальных условий, $l_{\partial G}^i$ — оператор граничных условий, $0 = t_1 < t_2 < \dots < t_i < t_{i+1} < \dots < t_N = T$.

Сформированная система имеет время отклика на собственные изменения. Для того чтобы созданная таким образом гидродинамическая модель отражала пласт с требуемой точностью, необходимо, чтобы формализованная физическая модель могла отличать различные пласты по их распознаемому образу [7], по сути, предсказывая каждому индивидуальному объекту класса единственное представление некоторым набором характеристических функций с возможностью обратной идентификации. Между тем непосредственный анализ динамики геолого-промысловых данных и показателей разработки значительной части нефтяных и газовых месторождений позволяет говорить о том, что все коллекторы, независимо от литологии, идентичны по фильтрационно-емкостным свойствам и содержат углеводороды в трещинной и поровой средах. Поэтому для однозначной идентификации пласта необходимо, чтобы существенные индивидуальные отличия пластовой системы могли быть однозначно определены на базе того спектра описательных функционалов системы, которого достаточно для построения адекватной модели имитируемого явления. В этом случае для однозначной идентификации пластовой системы по фильтрационным характеристикам необходимо установить границу распространения импульса системы, хотя бы и расширяющуюся во времени, так как если пренебречь данным видом ограничений, построенных на базе некоторых физических посылок, то получаемые «различные» решения не позволяют отличить одну техногенно-естественную систему «пласта» от другой.

Системный анализ и мониторинг разработки позволяют выделить каналные потокообразующие и водоотклоняющие фильтрационные эффекты на фоне матричной фильтрации, тем самым они создают фрактальный образ объёмной фильтрации в пространстве [1, 3]. Предлагаются новые подходы к изучению нефтенасыщенных объектов как динамических систем с быстроменяющимся состоянием, то резко «возбуждённым», то близким к стабильному, что особенно характерно в период наложенных техногенных процессов (разведка и разработка) [2]. В период разведки месторождения, особенно в

процессе бурения значительного количества скважин, за счёт репрессий, депрессий и других факторов пластовая природная система претерпевает большие изменения и, по существу, становится природно-техногенной. Безусловно, требуется выделить и оценить техногенное влияние на состояние, свойства и структуру в начальном состоянии геологического объекта продуктивного пласта и природной нефтегазонасыщенной системы в целом.

Выводы.

1. При системно-интегрированном проектировании основные усилия направлены на решение концептуальных задач оптимального планирования и его эффективного контроля.

2. Наличие детальной флюидо-геологической модели важно для понимания строения нефтегазовых залежей и их эволюции.

3. Предложенная численная модель гидродинамической интеграции показывает, что регулирование разработки и её оптимизация возможны лишь при учете реальных скоростей и физических процессов, стоящих за ними.

4. Вышеизложенный метод дает возможность отразить в гидродинамических моделях процессы, реально происходящие в пластах, и повысить достоверность получаемых результатов и прогнозных показателей.

5. Введение в рассмотрение объектов численного анализа полей скоростей намечает пути регулирования разработки и определяет категорию трудно-извлекаемых запасов как запасов, которые существующими градиентами не извлекаются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические указания по созданию постоянно действующих геологотехнологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений. Часть 1. Геологические модели. — М.: ВНИИОЭНГ, 2003. — 164 с.
2. Попков В. И., Зацепина С. В., Шакишин В. П. Полудискретная математическая модель гидродинамических процессов залежей нефти и газа // *Извест. СНЦ РАН. Спец. вып. «Проблемы нефти и газа»*, 2007. — С. 125–133.
3. Ахметов А. Т. Новое свойство эмульсий, играющее основную роль в потокоотклоняющих технологиях глушения скважин // *Интервал*, 2008. — № 3(110). — С. 46–49.
4. Михайлов Н. Н. Физико-геологические проблемы остаточной нефтенасыщенности. — М.: Недра, 1993. — 152 с.
5. Попков В. И., Корягин В. В., Шакишин В. П. Адаптированное формирование модели пластовых залежей на основе гидродинамической чувствительности. Ч. I // *Извест. СНЦ РАН. Спец. вып. «Проблемы нефти и газа»*, 2003. — С. 5–15.
6. Косентино Л. Системные подходы к изучению пластов. — М.-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований—РХД, 2007. — 400 с.
7. Мирзаджанзаде А. Х., Кузнецов О. Л., Басниев К. С., Алиев З. С. Основы технологии добычи газа. — М.: Недра, 2003. — 880 с.
8. Трапезников М. А., Белоцерковская М. С., Четверушкин Б. Н. Аналог кинетически-согласованных схем для моделирования задачи фильтрации // *Математ. моделирование*, 2002. — Т. 14, № 10. — С. 69–76.
9. Монахов В. Н. Сопряжение основных математических моделей фильтрации двухфазной жидкости // *Математ. моделирование*, 2002. — Т. 14, № 10. — С. 109–115.
10. Монахов В. Н., Хуснутдинова Н. В. О сопряжении канальных и фильтрационных течений вязкой несжимаемой жидкости // *ПМТФ*, 1995. — № 1. — С. 95–99.
11. Бочаров О. Б., Телегин И. Г. Сравнение модели фильтрации несмешивающихся жидкостей с фазовыми подвижностями с моделью Маскета—Левретта // *Теплофизика и аэромеханика*, 2004. — Т. 11, № 4. — С. 1–9.

Поступила в редакцию 17/ХП/2008;
в окончательном варианте — 03/ІІІ/2009.

MSC: 76S05, 76N25

INTEGRATED GEOLOGICAL AND HYDRODYNAMIC MODELING IN THE MANAGEMENT SYSTEM OF OIL AND GAS PRODUCTION

V. I. Popkov^{1,2}, V. P. Shakshin²

¹ Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100.

² SamaraNIPIneft Company
52, Michurina str., Samara, 443096.

E-mails: popkovvi@samnipineft.ru, shakshinvp@samnipineft.ru

The most important research results based on innovational solutions in the oil and gas industry for hydrodynamic modeling are presented. A formally logical approach to definition of the system in category theory terms and final results for the facial modeling of the fields are presented. In addition approaches for development of existing knowledge system about oil and gas production into a unified model-conception of the field system.

Key words: *filtration, hydrodynamics, system analysis, category theory, evolutionary model, hydrodynamic research.*

Original article submitted 17/XII/2008;
revision submitted 03/III/2009.

Popkov Vyacheslav Ivanovich, Ph. D. (Phys. & Math.), Ass. Prof., Dept. of Oil & Gas Fields Development and Explotation.

Shakshin Vadim Petrovich, Branch Manag., Dept. of Automatized Solutions.