

## Применение стохастического моделирования для оценки зависимости коэффициента охвата заводнением от показателей макронеоднородности

В работе рассматривается проблема обеспечения полного охвата пластов процессом заводнения. Выполнена серия расчетов по стохастическим моделям, получена зависимость коэффициента расчлененности от коэффициента песчаности, выполнена оценка влияния размера линз на характер этой зависимости. На основе результатов стохастического моделирования построен график зависимости коэффициента охвата заводнением от коэффициента расчлененности и показано, что коэффициент охвата заводнением пласта зависит как от коэффициента песчаности, так и от коэффициента расчлененности. Это свидетельствует о важности учета влияния этих показателей макронеоднородности пласта при проектировании разработки нефтяных месторождений.

*Ключевые слова:* стохастическое моделирование, неоднородность, коэффициент расчлененности, коэффициент песчаности, коэффициент заводнения, песчаное тело, линза.

Проблема обеспечения более полного охвата пластов процессом заводнения становится с каждым годом все более актуальной. Сложное строение нефтяных залежей затрудняет полное дренирование всего объема залежи, особенно полный охват вытеснением нефти водой через нагнетательные скважины в добывающие. Очень часто нефтеносные пласты состоят из хаотически расположенных проницаемых песчаных (терригенных) или известняковых и непроницаемых слоев, линз и пропластков. Иногда расчлененность пластов достигает 20 пропластков в пределах разреза одной скважины. В частности, горизонт  $D_1$  Ромашкинского месторождения представлен песчано-алевролитовыми продуктивными породами, которые переслаиваются с непроницаемыми глинистыми алевролитами и аргиллитами. Количество проницаемых пластов в скважинах колеблется от 1-2 до 11-12 (при среднем 6-8). Пласты чрезвычайно изменчивы по толщине и не выдержаны по площади. Диаграммы электрокаротажа по двум соседним скважинам, пробуренным на расстоянии нескольких сотен метров друг от друга, часто имеют совершенно различный характер. Такая сложная картина значительно затрудняет корреляцию разрезов скважин (Бадьянов, 1964).

Довольно часто отдельные пропластки, входящие в объекты разработки, могут не охватываться заводнением, и, следовательно, из них не вытесняется нефть. Неравномерное обводнение отдельных нефтяных скважин даже при их строго упорядоченном расположении на нефтеносной площади месторождения приводит к тому, что в пласте остаются нефтенасыщенные зоны, неохваченные заводнением.

Коэффициент охвата заводнением оказывает существенное влияние на коэффициент извлечения нефти в целом. Он зависит от геологических и технологических факторов.

Технологическими факторами являются: система разработки, темп ввода залежи или месторождения в разработку, темп отбора нефти.

Геологическими факторами являются макронеоднородность залежей и изменчивость фильтрационных и емкостных характеристик пласта (пористость, проницаемость). Макронеоднородность характеризуется латеральной изменчивостью эффективной толщины пласта, зна-

чение которой зависит от пространственного распределения коллекторов и неколлекторов в пределах продуктивного горизонта. Основными показателями макронеоднородности служат коэффициент песчаности ( $K_{пес}$ ), показывающий соотношение коллекторов и неколлекторов в общем объеме эксплуатационного объекта, и коэффициент расчлененности ( $K_{рас}$ ), характеризующий вертикальную неоднородность продуктивного горизонта или объекта разработки. Коэффициент расчлененности вычисляется путем подсчета числа прослоев-коллекторов в разрезе скважины. В целом по объекту производят суммирование проницаемых прослоев по всем скважинам, а затем делят их на число скважин. Коэффициент расчлененности равен единице, если весь продуктивный горизонт состоит из одного пласта-коллектора. Чем больше количество проницаемых пропластков в разрезе каждой скважины, тем выше значение  $K_{рас}$ . Это увеличивает вероятность прерывания входящих в пласт пропластков, соответственно снижается выдержанность пласта.

Совместное использование коэффициентов расчлененности и песчаности позволяет составить представление о макронеоднородности разреза. Чем больше коэффициент расчлененности и меньше коэффициент песчаности, тем выше макронеоднородность объекта.

Основная цель работы заключалась в определении степени влияния этих показателей макронеоднородности на коэффициент охвата пласта заводнением.

В работах (Бадьянов, 2010; Бадьянов и др., 1984; Методическое руководство по расчету коэффициентов..., 1986) представлена формула для определения коэффициента охвата заводнением:

$$K_{зав} = 1 - \frac{Z}{3} \frac{P(1-P)(0.427 + 0.733P - 0.826P^2)}{\exp[13.19(P - 0.60)^2]},$$

$$\begin{cases} 0 \leq Z \leq 3 \\ 0 \leq P \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

где  $P$  – вероятность наличия коллектора (коэффициент песчаности);  $Z$  – безразмерное расстояние между зоной нагнетания и отбора.

Аналитическая формула была получена А.Н. Юревым (Бадьянов и др., 1984) путем моделирования на стохастических моделях (моделировалась четырехкратная про-

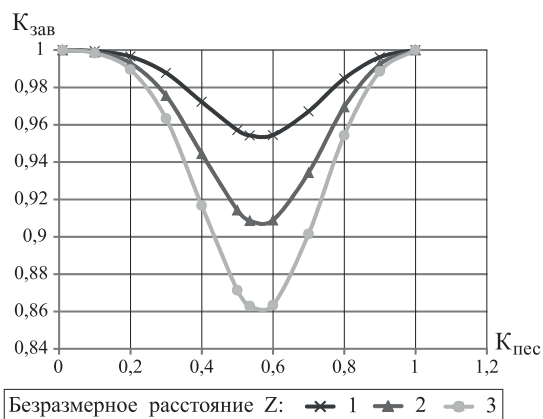


Рис. 1. Зависимость коэффициента заводнения от коэффициента песчаности.

мывка объема пор). Коэффициент заводнения был получен аппроксимацией отношения добытой нефти к запасам в связанной области пласта при различных значениях  $P$  и  $Z$ . Представленная зависимость наглядно показывает влияние геологического фактора (коэффициент песчаности  $P$ ) и технологического фактора (безразмерное расстояние между зоной нагнетания и отбора  $Z$ ) на эффективность разработки, в данном случае на коэффициент заводнения. График зависимости представлен на рис. 1. На данном графике видно наличие экстремума при значении коэффициента песчаности примерно 0,53. Это связано с максимальным усложнением геометрии связанной области при данном значении.

Как уже отмечалось, на усложнение геологического строения пластов влияет их расчлененность в совокупности с песчаностью. Поэтому было решено провести анализ зависимости коэффициента расчлененности ( $K_{рас}$ ) от коэффициента песчаности ( $K_{пес}$ ) с применением стохастического моделирования. В качестве метода стохастического моделирования выбран объектный метод Composite, который заключается в случайном распределении литологических тел (объектов) с определенной геометрией и размерами. Примеры объектов для моделиро-

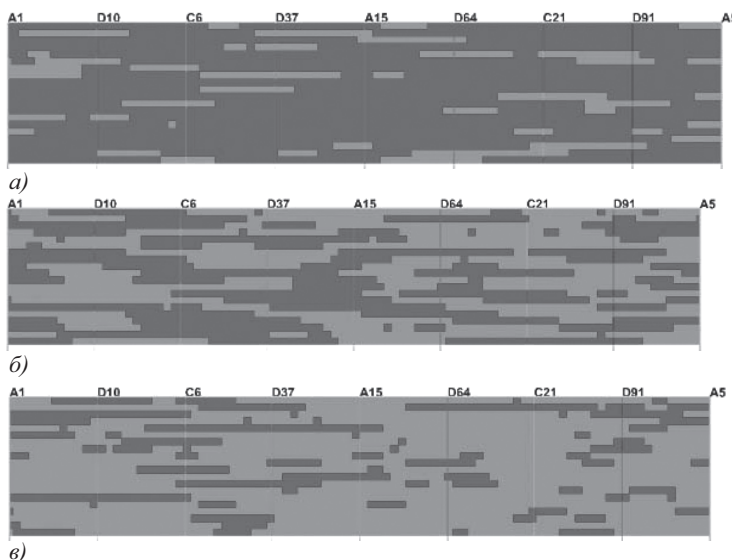


Рис. 2. Пример геологических профилей по линиям скважин с различными характеристиками неоднородности: а)  $K_{пес} = 0,2$ ;  $K_{рас} = 3,1$ ; б)  $K_{пес} = 0,6$ ;  $K_{рас} = 5,11$ ; в)  $K_{пес} = 0,8$ ;  $K_{рас} = 3,85$  (светло-серым цветом – коллектор, темно-серым – неколлектор).

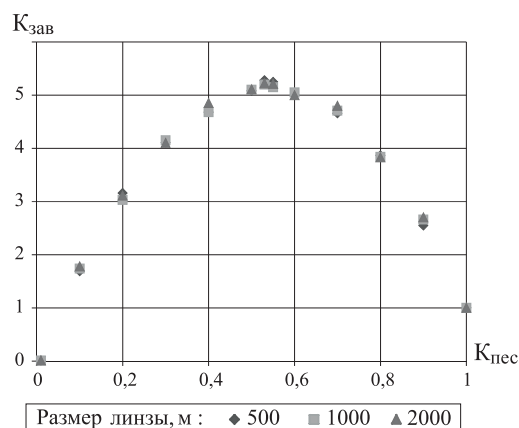


Рис. 3. Зависимость коэффициента расчлененности от коэффициента песчаности.

вания: литологические и фациальные тела (конусы, эллипсы, прямоугольники), каналные русловые структуры. В качестве параметра моделирования использовался дискретный параметр литологии (0 – неколлектор, 1 – коллектор). Куб литологии формировался случайным образом, но с учетом таких важных параметров неоднородности, как песчаность и размеры песчаных тел (линз). В качестве геометрической формы объекта был принят эллипс. Шаг сетки модели равнялся 50 м, количество слоев – 20. Первоначально расстояние от кровли до подошвы составляло 20 м. Геометрические размеры линз (длина, ширина, высота) распределялись по нормальному закону. В качестве средних значений вероятностного распределения принимались принятые характерные размеры. Коэффициент песчаности изменялся в пределах от 0 до 1, в качестве характерных (средних) размеров линз принимались значения от 500 до 2000 м. Высота линзы фиксировалась значением в один метр.

Скрипт для вычисления коэффициента расчлененности написан на встроенном языке программирования IPL пакета Irap RMS. Расчлененность определялась в каждом вертикальном наборе ячеек куба путем суммирования количества пропластков и представлялась в виде поля. Осреднением этого поля получали искомое среднее значение коэффициента расчлененности в целом по кубу.

Примеры геологических профилей кубов литологии с различными значениями коэффициента песчаности наглядно демонстрируют зависимость коэффициента расчлененности от этого параметра неоднородности (Рис. 2). Самая сложная геометрия связанной области коллектора представлена на рис. 2, б.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 3. Как видим, наблюдается четкая взаимозависимость этих параметров макронеоднородности пласта. Причем зависимость не зависит от размеров линз. Это говорит о масштабной инвариантности (фрактальности) прерывистых пластов (Мирзаджанзаде и др., 2004).

Все остальные эксперименты по определению взаимовлияния коэффициентов было решено проводить при размере линз 500 м. Другим параметром, влияющим на расчлененность является толщина пласта. Толщина пласта изменялась от 1 до 30 м. Полученные графики представлены на рис. 4.

В результате многочисленных экспериментов была

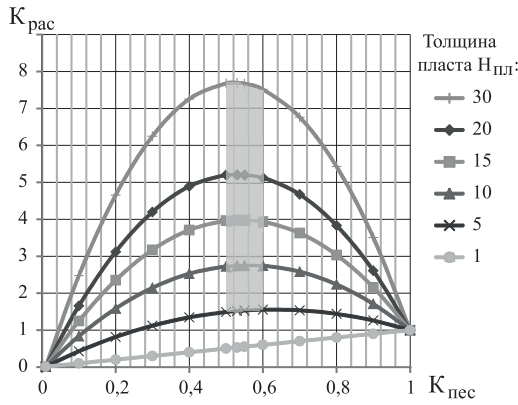


Рис. 4. Зависимость коэффициента расчлененности от коэффициента песчаности при различных значениях толщины пласта ( $h_l = 1$ ).

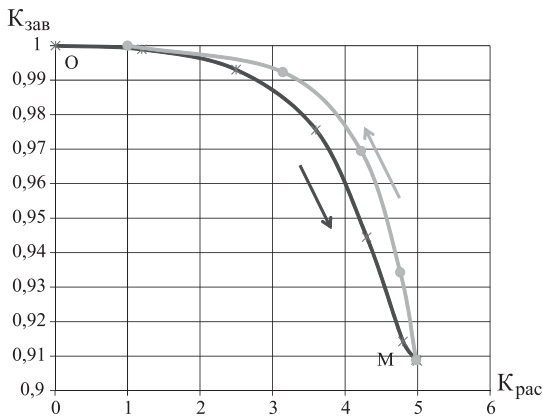


Рис. 5. Зависимость коэффициента охвата заводнением от коэффициента расчлененности.

получена аналитическая формула:

$$K_{рас} = \frac{(H_{пл} - h_l)}{h_l} (1,02 K_{пес} - 1,01 K_{пес}^2 - 0,01) + K_{пес}, \quad (2)$$

где  $H_{пл}$  – толщина пласта, м;  $h_l$  – минимальная высота линзы, представляющей продуктивный пласт, м;  $K_{пес}$  – коэффициент песчаности, д. ед.

На графиках (Рис. 4) видно, что одно и то же значение  $K_{рас}$  возможно при двух значениях  $K_{пес}$ , кроме максимального значения расчлененности. Экстремум функции при  $H_{пл} \rightarrow \infty$  достигается при  $K_{пес} = 0,5$ . Изменение толщины пласта до 5 м незначительно смещает положение экстремума вправо (на рис. 4 отмечено областью серого цвета). Как мы видим, диапазон экстремумов этой функции совпадает с экстремумом функции (1). Это подтверждает максимально сложное строение связанной области в точках экстремумов. Начиная с толщины пласта 5 м и до 1 м, максимальное значение функция принимает при изменении  $K_{пес}$  от 0,6 до 1 соответственно. Коэффициент расчлененности равен единице при полном заполнении пласта коллектором ( $K_{пес} = 1$ ). При толщине пласта, равной толщине линзы, график зависимости представляет из себя прямую. Это самый нижний график на рис. 4. Коэффициент расчлененности в этом случае будет равен коэффициенту песчаности и не опустится ниже значения  $K_{пес}$ .

Исходя из уравнений (1) и (2) можно построить график зависимости коэффициента заводнения от коэффициента расчлененности (Рис. 5). График этой зависимости напоминает петлю гистерезиса. Стрелками обозначено увеличение песчаности. Сначала, от точки О происходит уве-

личение песчаности от 0 до критического значения расчлененности, при котором наблюдается максимальное усложнение литологического строения пласта. Это светлая кривая графика. При дальнейшем увеличении песчаности увеличение происходит не по прежней траектории, а по траектории со значениями выше прежних значений и сходится в одной точке при  $K_{пес} = 1$ . Этой траектории соответствует темная кривая графика. Важной точкой на этом графике является точка М. Она соответствует минимальному значению коэффициента заводнения по формуле (1) и максимальному значению коэффициента расчлененности по формуле (2). Этот график был построен для безразмерного расстояния между зоной нагнетания и отбора  $Z = 2$ , толщины пласта  $H_{пл} = 20$  м и толщины линзы  $h_l = 1$  м. Изменение этих параметров изменит положение точки М на графике. Но характер зависимости коэффициента заводнения от коэффициента расчлененности остается всегда неизменным.

### Выводы

1. В результате стохастического моделирования получено уравнение зависимости коэффициента расчлененности от коэффициента песчаности прерывистого пласта при фиксированной толщине литологического тела (линзы).

2. Определено, что размер линзы не влияет на характер этой зависимости, что говорит о масштабной инвариантности (фрактальности) прерывистого пласта.

3. Подтверждено наличие экстремума (максимального значения  $K_{рас}$ ) при  $K_{пес} = 0,53-0,6$ , что подтверждает сложное строение коллектора при этих значениях.

4. На основе результатов стохастического моделирования построен график зависимости коэффициента охвата заводнением от коэффициента расчлененности.

5. Показано, что коэффициент охвата заводнением пласта зависит как от коэффициента песчаности, так и от коэффициента расчлененности. Это свидетельствует о важности учета влияния этих показателей макронеоднородности пласта при проектировании разработки нефтяных месторождений.

### Литература

Бадьянов В.А. Методика корреляции продуктивных пластов в условиях значительной фациальной изменчивости (на примере горизонта  $D_1$  Ромашкинского месторождения). *НТС ВНИИ по добыче*. М. 1964. Вып. 24. С. 3-5.

Бадьянов В.А. Методы компьютерного моделирования в задачах нефтепромысловой геологии. Тюмень. 2010. 135 с.

Бадьянов В.А., Ревенко В.М., Юрьев А.Н., Закомолдина Н.М. Исследование влияния прерывистости пласта на коэффициент охвата процессом вытеснения. *Проблемы нефти и газа Тюмени*. 1984. Вып. 61. С. 31-33.

Методическое руководство по расчету коэффициентов извлечения нефти из недр. РД 39-0147035-214-86. М. 1986. 254 с.

Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. Моделирование процессов нефтегазодобычи. Москва-Ижевск: ИКИ. 2004. 368с.

### Сведения об авторах

Арслан Валерьевич Насыбуллин – доктор техн. наук, начальник отдела развития информационных технологий и моделирования пластовых систем.

Рамиль Зайтунович Саттаров – ведущий инженер отдела развития информационных технологий и моделирования пластовых систем.

Институт «ТатНИПИнефть» ОАО «Татнефть» 423230, Бугульма, ул. М. Джалиля д. 32. Тел: (85594) 786-41.

Окончание статьи А.В. Насыбуллина, Р.З. Сатарова «Применение стохастического моделирования для оценки зависимости коэффициента охвата»

## Application of Stochastic Simulation to Estimate the Dependence of Sweep Efficiency on Macroheterogeneity Indicators

A.V. Nasybullin, R.Z. Sattarov

Tatar Oil Research and Design Institute (TatNIPIneft) OAO «Tatneft», Bugulma, Russia, ramsat@tatnipi.ru

**Abstract.** A series of calculations on stochastic models was made. Dependence of number of permeable intervals on net-to-gross ratio was obtained. Impact of lenses size on the character of this dependence was estimated. Based on the results of stochastic simulation dependency diagram of sweep efficiency on number of permeable intervals was built. It is shown that sweep efficiency depend both on net-to-gross ratio and number of permeable intervals. This fact demonstrates the importance of taking into account these of formation macroheterogeneity indicators when designing oilfield development.

**Keywords:** stochastic simulation, heterogeneity, number of permeable intervals, net-to-gross ratio, sweep efficiency, sand body, lens.

### References

Bad'yanov V.A. Metodika korrelyatsii produktivnykh plastov v usloviyakh znachitel'noy fatsial'noy izmenchivosti (na primere gorizonta D1 Romashkinskogo mestorozhdeniya) [Correlation technique for productive formations under the conditions of facies variation (the horizon D1, Romashkinskoye oil field)]. *NTS VNII po*

*dobyche*. Moscow. 1964. Is.24. Pp.3-5.

Bad'yanov V.A. Metody komp'yuternogo modelirovaniya v zadachakh neftepromyslovoy geologii [Methods of computer modeling in the oil-field geology]. Tyumen. 2010. 135p.

Bad'yanov V.A., Revenko V.M., Yur'ev A.N., Zakomoldina N.M. Issledovanie vliyaniya preryvistosti plasta na koeffitsient okhvata protsessom vytesneniya [Influence of discontinuity formation process by a coverage factor of repression]. *Problemy nefti i gaza Tyumeni* [Problems of oil and gas in Tyumen]. 1984. Is.61. Pp.31-33.

RD 39-0147035-214-86. Metodicheskoe rukovodstvo po raschetu koeffitsientov izvlecheniya nefti iz neдр [Methodological guidance on the calculation of the oil recovery coefficients]. Moscow. 1986. 254p.

Mirzadzhanzade A.Kh., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. Modelirovanie protsessov neftegazodobychi [Modelling of processes of oil and gas production]. Moscow-Izhevsk: "IKI" Publ. 2004. 368p.

### Information about authors

*Arslan V. Nasybullin* – Dr. Sci. (Engin.), Head of the Department of Information Technologies and reservoir modeling systems.

*Ramil Z. Sattarov* – Leading engineer of the Department of Information Technologies and reservoir modeling systems.

Tatar Oil Research and Design Institute OAO «Tatneft». 423236, M. Djalil str., 32, Bugulma, Russia. Tel: +7 (85594) 78-627.