

# **ИННОВАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ 3D КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, В ТЕХНОЛОГИЯХ РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, А ТАКЖЕ В ИССЛЕДОВАНИЯХ СКВАЖИН И ПЛАСТОВ**

Э.С. Закиров  
ИПНГ РАН

За последние 5–7 лет сотрудниками лаборатории обоснована новая инновационная концепция эффективного порового пространства. Она привносит соответствующие изменения во многие смежные научные дисциплины. Улучшая современные подходы к 3D геологогидродинамическому моделированию и давая возможность создавать новые технологии разработки нефтяных и газовых месторождений.

Получаемые результаты входили в отчеты лаборатории по бюджетной тематике, Программе Президиума РАН. Кратко коснемся полученных в рамках бюджетной тематики результатов. Получены три основные группы результатов:

- инновации в информационном обеспечении 3D компьютерного моделирования, включая проведение лабораторных исследований на кернах,
- инновации в методах проведения и интерпретации результатов исследований скважин и пластов,
- инновации в технологиях разработки месторождений природных углеводородов.

## **Инновации в информационном обеспечении 3D компьютерного моделирования, включая проведение лабораторных исследований на кернах**

• На основе новой концепции эффективного порового пространства обоснована необходимость устранения понятия неколлекторов применительно к подсчету запасов нефти и газа, созданию 3D геологических и 3D гидродинамических моделей продуктивных пластов и разработки их по новой технологии вертикально-латерального заводнения. В результате возрастают геологические запасы нефти и газа, повышается достоверность 3D компьютерных моделей и эффективность процессов извлечения нефти, газа и конденсата. Соответствующие результаты опубликованы в работах:

1. *Закиров С.Н., Индрупский И.М., Закиров Э.С., Анিকেев Д.П.* Последствия перехода на концепцию эффективного порового пространства // Нефт. хоз-во. 2008. № 6. С. 105–107.

2. *Закиров С.Н., Индрунский И.М., Закиров Э.С., Анিকেев Д.П.* Новые представления в теории и практике разработки месторождений нефти и газа. // Научно-практическая конференция, посвященная 30-летию ООО “Газпром добыча Уренгой” “Обеспечение эффективного функционирования нефтегазодобывающего комплекса”, 26–30 мая 2008, Анапа.

3. *Закиров С.Н., Индрунский И.М., Закиров Э.С., Анিকেев Д.П., Муртазалиев А.Ш.* Новая концепция эффективного порового пространства и ее следствия в теории и практике разработки месторождений нефти и газа // Международная академическая конференция “Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири”, 17–19 сентября 2008. Тюмень.

- Проведение лабораторных экспериментов по определению коэффициентов вытеснения газа водой в рамках новой концепции эффективного порового пространства.

Повсеместно используемая формула А.П. Крылова связывает коэффициент нефтеотдачи с произведением коэффициентов охвата и вытеснения. В настоящее время эта формула используется для оценки коэффициента охвата при известных КИН и коэффициенте вытеснения. При этом коэффициент вытеснения определяется редко, а иногда даже принимается равным значению, определенному для месторождения-аналога.

На основе результатов лабораторных экспериментов, проведенных на искусственных кернах, рассмотрены факторы, влияющие на значения коэффициента вытеснения. При зафиксированном литотипе кернов, когда различия фильтрационно-емкостных свойств керна предопределялись соотношением долей песка и цемента в образце. При этом коэффициенты вытеснения определялись по данным капиллярной пропитки и при помощи традиционных методов исследования по вытеснению. Первый способ определения коэффициента вытеснения может относиться к породам карбонатного типа, а второй – к породам терригенного типа.

Выявлено, что, несмотря на принадлежность всех образцов керна к одному литотипу, значения коэффициента вытеснения изменяются в широких пределах; при этом диапазон изменения проницаемости для всей совокупности кернов оказался достаточно узким, изменившись только на один порядок величины. Отметим, что соответствующая вариация может быть объяснена различными структурой порового пространства и путями фильтрации в нем. Оказалось, что коэффициенты вытеснения слабо коррелируются с фильтрационно-емкостными параметрами. Однако наблюдается некоторая тенденция к

увеличению коэффициента вытеснения при росте коэффициентов пористости или проницаемости.

Отсюда следует, что необходимо проводить большее количество экспериментов по определению коэффициентов вытеснения. Ибо даже при одном литотипе и достаточно близких значениях проницаемости коэффициенты вытеснения могут различаться до 25%.

- Лабораторные исследования фильтрационных процессов в пористых средах в рамках концепций абсолютного (АПП) и эффективного (ЭПП) поровых пространств. Соответствующие экспериментальные работы потребовали создание и отладку специализированного испытательного стенда. Результаты проведенных лабораторных исследований подтверждают указанную целесообразность перехода к концепции ЭПП. С одной стороны, она связана с повышением степени коррелируемости для некоторых корреляционных зависимостей, используемых затем в петрофизике и интерпретации результатов ГИС и т.д. С другой стороны, лабораторные исследования остаются в силе, но на новой методологической основе.

Актуальность данных исследований связана с тем, что традиционные лабораторные эксперименты в области нефтегазового пласта проводят в рамках концепции АПП. Приходящая ей на смену новая концепция ЭПП призвана оказать заметное и положительное влияние на теорию и практику разработки месторождений нефти и газа. Соответственно возникает необходимость как в лабораторных, так и в теоретических исследованиях в рамках концепции ЭПП.

По результатам этой части работы можно отметить, что переход к концепции ЭПП позволил получать более плотные корреляционные зависимости для параметров, определяемых по результатам керновых исследований.

- Обоснование методики лабораторных экспериментов и интерпретации результатов исследований с целью определения тензора абсолютной проницаемости на керновой колонке.

Актуальность этой части исследований связана с тем, что анизотропия проницаемости является одним из ключевых факторов при построении 3D геологической и гидродинамической моделей продуктивного пласта и обосновании технологий разработки залежи нефти или газа. Под анизотропией проницаемости здесь понимается различие коэффициентов проницаемости в плоскости  $XOY$  ( $k_x$ ) и вдоль вертикальной координаты  $OZ$  ( $k_z$ ). Также возможно наличие ненулевых внедиагональных элементов в

матрице тензора проницаемости ( $k_{xz}$ ) применительно к естественной геологической системе координат. Это означает, что перепад давления вдоль вертикальной координаты может создавать потоки флюидов в плоскости XOY, и наоборот.

Измерение проницаемости на отобранном из пласта керновом материале является единственным прямым способом оценки его фильтрационных характеристик. Для исследования проницаемости на керновом материале используются лабораторные установки. Традиционно определяемые величины проницаемости на малых образцах цилиндрической формы (3 см в длину и 3 см в диаметре) затруднительно переносить в 3D гидродинамическую модель из-за фактора масштабности и точности измерений.

В рамках проведенных исследований анизотропию проницаемости предлагалось исследовать с помощью лабораторной установки на отобранной из пласта керновой колонке. Под термином “керновая колонка” следует понимать отпиленный от выбуренной керновой колонны отрезок длиной около 1 м, совпадающий по диаметру с диаметром керновой колонны.

Предложенный в рамках НИР многосекционный кернодержатель позволяет снимать профилограмму проницаемости вдоль элементов керновой колонки.

Специализированные эксперименты и методика интерпретации позволяют определять анизотропию пласта, включая внедиагональные компоненты тензора абсолютной проницаемости. Новый кернодержатель и методика проведения экспериментов обеспечивают повышение степени достоверности исходных данных для проектирования разработки месторождений нефти и газа на основе 3D компьютерного моделирования.

На конструкцию кернодержателя и методику проведения экспериментов получен патент РФ на изобретение (№ 2407889).

### **Инновации в методах проведения и интерпретации результатов исследований скважин и пластов**

- Обоснована технология проведения 3D гидропрослушивания продуктивных пластов и методология интерпретации результатов исследования. Эта технология повышает степень достоверности создаваемых 3D геологических и 3D гидродинамических моделей пластов, а также способствует внедрению перспективной технологии вертикально-латерального заводнения. Впервые соответствующие технологии

проведения и методология идентификации реализованы на Новогоднем месторождении (Западная Сибирь) и Памятно-Сасовском месторождении (Волгоградская область). Соответствующие результаты опубликованы в работах:

1. *Закиров Э.С., Индрупский И.М., Левченко В.В., Брадулина О.В., Цаган-Манджиев Т.Н., Закиров С.Н.* Вертикальное и 3D гидропрослушивание продуктивных пластов // Труды VII Международного технологического симпозиума “Новые технологии освоения и разработки трудноизвлекаемых запасов нефти и газа и повышение нефтеотдачи”, Москва, 18–20 марта, 2008. Российская академия государственной службы при Президенте РФ. М., 2008. С. 49–63.

2. *Брадулина О.В.* 3D гидропрослушивание на Памятно-Сасовском месторождении // Геология, геофизика и разраб. нефт. и газовых месторождений. 2008. № 12.

- Создание методики интерпретации результатов вертикального гидропрослушивания (самопрослушивания скважины). Интерпретация результатов такого исследования скважины должна позволить в пластовых условиях определять коэффициенты проницаемости вдоль и поперек напластования, что необходимо для достоверного построения 3D компьютерных моделей. В рамках проведенных исследований на примерах показано, что для реальных слоисто-неоднородных пластов традиционные методики позволяют оценить лишь интегральную величину эквивалентной горизонтальной проницаемости. А значение эквивалентной вертикальной проницаемости не идентифицируемо на основе традиционных методик. Обработка по новой методике измеряемых динамик давления позволяет определять распределения проницаемости по разрезу пласта, тогда как с использованием традиционных процедур интерпретации указанное распределение определять не в состоянии.

Подготовка наукоемкой методики интерпретации результатов вертикального гидропрослушивания предполагает разработку и реализацию специализированного численного алгоритма решения прямой задачи для моделирования процесса вертикального гидропрослушивания. Интерпретация результатов вертикального гидропрослушивания должна позволить в пластовых условиях определять коэффициенты проницаемости вдоль и поперек напластования, что необходимо для достоверного построения 3D компьютерных моделей.

Результаты этой части работы позволили следующее.

◆ Провести анализ особенностей динамик замеров забойного давления и эффективности традиционных методов их интерпретации.

◆ Приведены примеры, которые демонстрируют, что для реальных слоисто-неоднородных пластов традиционные методики позволяют оценить лишь интегральную величину эквивалентной горизонтальной проницаемости. Значение эквивалентной вертикальной проницаемости может являться не идентифицируемым на основе использования традиционных методик интерпретации.

◆ При использовании новой методики измеряемые динамики давления становятся более информативными. Их обработка позволяет определять распределения проницаемости по разрезу пласта. Традиционные процедуры интерпретации для определения указанного распределения не годятся.

- Создание методики совместной интерпретации результатов исследований нефтяных и газовых скважин при различных режимах фильтрации.

Актуальность данной части исследований связана с созданием методики совместной интерпретации результатов исследований нефтяных или газовых скважин при стационарных и нестационарных режимах фильтрации.

Разработка месторождений нефти и газа начинается с исследования разведочных и эксплуатационных скважин. Без этих исследований нельзя планировать применение методов увеличения нефте-, газо-, конденсатоотдачи пластов, а также методов интенсификации притока нефти (газа) к скважинам и приемистости нагнетательных скважин. Обязательны периодические исследования скважин при контроле за процессом разработки месторождений нефти и газа.

Известно, что самыми распространенными являются исследования скважин при установившихся и неуставившихся режимах фильтрации. Раздельная оценка параметров пласта только по данным стационарных режимов фильтрации часто приводит к результатам, противоречащим данным нестационарных режимов. И наоборот. Созданная методика совместной интерпретации позволяет получать более достоверные и согласованные значения оцениваемых параметров пласта. При этом на основе решения обратной задачи в оптимизационной постановке одновременно приближаются расчетные и измеряемые давления на стационарных и нестационарных режимах фильтрации. Получаемые по новой методике результаты позволяют более предметно выбирать скважины и адекватные к ним геолого-технические мероприятия и технологии.

## **Инновации в технологиях разработки месторождений природных углеводородов**

- Обоснование технологии вертикально-латерального заводнения месторождений нефти, включая залежи легкой нефти.

В связи с ростом глубин вводимых в разработку месторождений возрастает число залежей легкой нефти, нередко с околоскритической нефтью. Такие залежи приурочены к ачимовским, юрским и более глубокозалегающим отложениям. Эти залежи отличаются высокими термобарическими условиями, неоднородными и низкопроницаемыми коллекторами. Поэтому они зачастую рассматриваются в качестве залежей с трудноизвлекаемыми запасами.

Опыта разработки таких залежей явно недостаточно. Поэтому актуальна проблематика исследования особенностей их разработки. Ибо только на основе теоретических исследований можно рассчитывать на обоснование эффективных технологий разработки нового, для отечественной нефтяной промышленности, типа залежей.

В качестве объекта исследований принята залежь легкой нефти в отложениях Ю<sub>1</sub><sup>1</sup> Новогоднего месторождения.

Методология исследований основывалась на секторном 3D компьютерном моделировании фильтрационных процессов в многокомпонентной постановке. Под секторным моделированием понимается проведение многовариантных расчетов применительно к характерному элементу разработки.

При обосновании практических рекомендаций 3D компьютерное моделирование осуществлялось на реальном участке пласта Ю<sub>1</sub><sup>1</sup> Новогоднего месторождения.

Постановка задач заключалась, с одной стороны, в решении фильтрационных задач, позволяющих понять особенности фильтрационных процессов при разработке залежей нефти при различных воздействиях на пласт. С другой стороны, на основе результатов 3D компьютерного моделирования необходимо было обосновать рекомендации прикладного характера. Сопоставлялась эффективность разработки залежи легкой нефти

- ◆ в режиме истощения,
- ◆ при заводнении пласта,

◆ при водогазовом воздействии с целью увеличения коэффициента извлечения нефти.

В результате были обоснованы практические рекомендации по повышению эффективности разработки залежей легкой нефти.

• Применительно к трудно извлекаемым запасам нефти в низкопроницаемых ачимовских и юрских отложениях Западной Сибири на основе 3D компьютерных экспериментов обоснована новая технология их разработки. Доказано, что, вопреки традиционным представлениям, сначала надо вводить в эксплуатацию нагнетательные скважины, а затем, через 1–6 месяцев осуществлять добычу нефти из добывающих скважин. Такой подход увеличивает начальные дебиты скважин по нефти и накопленные объемы извлекаемой нефти за первые годы эксплуатации, что важно с точки зрения окупаемости затрат. Технология рекомендована для реализации ОАО “Ноябрьскнефтегаз”. Соответствующие результаты опубликованы в работе: *Индрупский И.М.* Опережающее заводнение для залежей с низкопроницаемыми коллекторами и высоким газосодержанием пластовых нефтей // Газовая пром-сть. 2009. № 3. С. 29–32.

• Обоснование технологии и технологических решений применительно к нефтяным месторождениям с крайне неоднородными по фильтрационно-емкостным свойствам (при наличии суперколлектора) продуктивными коллекторами.

В отечественной практике недропользования понятие суперколлектора появилось впервые в связи с вводом в разработку Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения. Известны также и другие примеры проявления данного фактора на различных месторождениях страны. Один из наиболее проблемных случаев – Талинское нефтяное месторождение. Текущие невысокие коэффициенты нефтеотдачи при предельной обводненности добываемой продукции связываются именно с наличием в продуктивном разрезе суперколлектора.

В современном понимании суперколлектор – это некий высокопроницаемый прослой в продуктивном разрезе залежи. Он обычно характеризуется небольшой, до нескольких десятков сантиметров, толщиной. Поэтому его затруднительно идентифицировать по данным ГИС. Опыт показывает, что и по керновым данным его не просто установить, ибо керн из суперколлектора почти не выносится, он часто рассыпается.

При традиционной реализации заводнения на основе вертикальных скважин суперколлектор положительно проявляет себя в добывающих скважинах повышенной продуктивностью. Однако при закачке воды он служит основным источником обводнения добываемой продукции. А из-за повышенной продуктивности данного прослоя обводненность быстро может достигать предельно нерентабельного уровня, приводя к необходимости закрытия добывающей скважины, несмотря на значительные остающиеся в пласте неохваченные вытеснением и дренированием запасы нефти. Поэтому нефтеотдача месторождений с суперколлекторами часто остается невысокой.

Высказываемая А.А. Боксерманом с соавторами технология разработки при наличии суперколлекторов состояла в использовании слоистой неоднородности. При этом один из суперколлекторов предлагается эксплуатировать с целью закачки воды, а другой – для добычи нефти.

Идея организации вертикально-латерального вытеснения высказывалась сотрудниками нашей лаборатории ранее при реализации заводнения в случае наличия в продуктивном разрезе низкопроницаемых коллекторов. Были проведены исследования, направленные на повышение охвата вытеснением при наличии в продуктивном разрезе суперколлекторов. Исследование значительного числа влияющих факторов позволило рекомендовать типы скважин и соответствующий способ расстановки скважин по площади и вертикали, применение которого позволяет превзойти результаты традиционной латеральной системы заводнения с точки зрения нефтеотдачи.

Результаты данного направления исследований опубликованы в обобщающей монографии: *Закиров С.Н., Индрупский И.М., Закиров Э.С., Закиров И.С., Абасов М.Т., Р.Н. Фахретдинов, Д.П. Анিকেев, И.В. Рощина, А.А. Контарев, Я.А. Северов, А.А. Роцин, Мамедов Э.А., Брадулина О.В., Лукманов А.Р.* Новые принципы и технологии разработки месторождений нефти и газа. М.; Ижевск: Ин-т компьют. исслед., НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2009. Ч. 2. 484 с.

За последние 5 лет по бюджетной тематике опубликовано 3 монографии, 103 статьи (в том числе выступления на российских и международных конференциях), получено 18 патентов РФ на изобретения. Сотрудниками, соискателями и аспирантами лаборатории успешно защищено 7 кандидатских диссертаций (Д.П. Анিকেев, Я.А. Северов, А.А. Роцин, И.В. Рощина, В.В. Булаев, О.В. Брадулина и Э.А. Мамедов) и 2 докторских (И.С. Закиров и И.М. Индрупский).

В выполнении бюджетных работ приняли участие следующие сотрудники лаборатории: С.Н. Закиров, Э.С. Закиров, И.М. Индрупский, М.Н. Баганова, Д.П. Аникеев, Т.Н. Цаган-Манджиев, З.Т. Мамедов, О.А. Лобанова, А.Ш. Муртазалиев, Д.С. Климов, А.Д. Лысенко, Э.С. Анিকেва.