

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Окуневича Всеволода Станиславовича «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ ПОРОД ДОМАНИКОВОЙ
ФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД»
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.6.9. – Геофизика

Доманиковая формация представляет собой природный объект, сформировавшийся в особых условиях осадконакопления, обусловленных сочетанием высокого содержания органического вещества в осадке и восстановительными условиями его накопления вплоть до перекрытия отложений формации флюидоупорами в девонское время (фаменский ярус в Тимано-Печорской НГП, серпуховский горизонт в Волго-Уральской НГП). Особое сочетание геодинамических, тектонофизических и геохимических процессов, аналогичных доманиковому, в разные стратиграфические периоды реализовывалось и в других осадочных бассейнах России: баженовская свита в Западно-Сибирской НГП– верхнеюрское-нижнемеловое, хадумская свита в Северо-Кавказской НГП– нижне-средне-олигоценное. Примером подобных формаций в Северной Америке являются сланцевые формации EgleFord бассейна Западный Гальф (верхний мел), формация Bakken бассейна Уиллистон (верхний девон-миссисипский период), формация Barnett бассейна FortWorth (миссисипский период-аналог нижнего карбона) в Техасе.

Все указанные формации с одной стороны являются нефтегазоматеринскими, а с другой – содержат нетрадиционные ловушки углеводородов с высоким промышленным потенциалом. Общей проблемой освоения ресурсов в них являются отсутствие воспроизводимой вещественной (литолого-минералого-геохимической) дифференциации пород-коллекторов и флюидоупоров, сложный порового-микропорово-трещинный тип коллекторов, низкая проницаемость 10^{-2} - 10^{-7} мкм² и тектонозависимость пространственного расположения ловушек внутри отложений высокоуглеродистых формаций. Сложность фильтрационно-емкостной модели коллекторов определяется её зависимостью от генерационных процессов в керогене, которые обуславливают как формирование микропоровой составляющей внутри самого керогена, так и динамики изменения фильтрационной модели за счет образования микротрещиной пустотности вокруг минеральных зерен в процессе генерации углеводородов (автофлюидоразрыв по В.П.Соничу). Это затрудняет параметризацию керогеносодержащих пород уже на стадии лабораторных исследований – как известно, трещинная составляющая традиционными лабораторными методами не параметризуется. Несмотря на длительную историю изучения и в последние десятилетия достаточно широкое промышленное освоение нетрадиционных залежей в высокоуглеродистых формациях в разных странах, критерии их поиска и методология параметризации так до конца и не выработаны.

Что касается доманиковых отложений, то история их открытия началась с описания Кайгерлингом в обнажениях по берегам ручья Доманик в 1845 году. Реал распространения отложений доманиковой формации ($D_3dm-D_3f^3-C_1t$) охватывает значительную территорию на востоке Русской платформы в пределах Тимано-Печорской и Волго-Уральской нефтегазоносных провинций. Её исследованиям посвящены многочисленные работы видных советских ученых Н.М.Страхова, Н.П.Юшкина, Я.Э.Юдовича, М.М.Алиева, С.В.Максимовой, М.И.Эйдельсона и других, детально обосновавших доманиковую формацию как нефтематеринскую толщу (НМТ). Открытие промышленно продуктивных залежей в ней, равно как и в других подобных формациях России, осуществлялось, как правило, в связи с разбуриванием нижележащих традиционных продуктивных отложений и/или в поисках аналогов северо-американских сланцев. Изучение геолого-геофизических особенностей и промысловых перспектив доманиковой формации в XXI веке посвящены работы А.П.Завьялова, М.Ю.Карпушина, А.В.Ступаковой, Г.А.Калмыкова, Д.В.Короста и других ученых и специалистов.

Поэтому рассматриваемая диссертантом проблема является **безусловно актуальной** не только для доманиковой формации, но и в целом для поиска эффективных решений геолого-геофизической параметризации нетрадиционных коллекторов в высокоуглеродистых формациях в принципе.

В качестве инструмента параметризации диссертантом выбраны акустические параметры среды, которые рассмотрены в отложениях доманиковой формации в трех масштабах изучения: керн-ГИС-сейсмика. Работа выполнена в русле изучения петроупругих моделей в контексте выбора наиболее эффективных методов математического моделирования, наиболее полно отображающих особенности пород формации и учитывающих переменный характер взаимоотношений компонентов среды, в связи с генерационными процессами в керогене. Работа является логическим продолжением исследований под руководством И.О.Баяк в Институте физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН, посвященных петроупругому моделированию высокоуглеродистых формаций баженовской и хадумской свит.

В Главе 1 приведены граничные значения параметров пустотности керогенонасыщенных пород доманика в целом (до 5 % об.) и наблюдаемые экспериментально проницаемости, не превышающие десятых долей мкм². Основная задача автора на этом этапе заключалась в рассмотрении методов теории эффективных сред для построения петроупругих моделей и выборе наиболее эффективных, с его точки зрения, подходов, учитывающих особенности, присущие доманиковым породам: наличие керогена, форму его нахождения в породе (матрица и/или включения), степень его связности; наличие хаотических и ориентированных трещин, слоистость, наличие литокластов и стяжений.

Таким образом, поставлена задача поиска практического инструмента для среды с многофакторной зависимостью акустических параметров. Индикатором процессов, определяющих текущие акустические параметры доманиковых пород в керне установлен кероген: его микропористость, масштаб автофлюидной микротрещиноватости, определяемые генерационными процессами в НМТ. Зависимость акустических параметров керогена от его типа и глубины процессов преобразования, определенные на керне, позволяют путем изучения волнового процесса в скважинах и отраженных сейсмических волнах (скорости продольной и поперечных волн) уточнить характер связи с учетом разного масштаба акустических параметров.

Рассмотрены методы теории эффективных сред, максимально учитывающие их особенности. Учитывая сложность строения пород и разнообразие форм элементов матрицы, рассмотрены математические инструменты теории эффективных сред учитывающие форму рассматриваемого композита (метод Кастера-Токсоза и метод самосогласования Берримана), а также методов, позволяющих получить усредненные (в пределах установленных границ) значения эффективных упругих модулей без детализации формы компонентов композиции (метод Хашина-Штрикмана и метод Фойгта-Ройсса-Хилла). Указанная вариативность математических методов присутствует на всех стадиях разномасштабного петроупругого моделирования.

Этот комбинированный подход представляется оппоненту логичным и целесообразным с учетом сложности объекта исследования.

Единственным объективным и наблюдаемым носителем детальной информации о керогенонасыщенных доманиковых отложениях является керн. Современных лабораторные методы позволяют исследовать вещественный состав, геохимическую преобразованность и текстурно-морфологические особенности матрицы и керогена на различных этапах преобразования породы, емкостные и фильтрационные (кроме трещиноватости) кондиции.

Базовая петроупругая модель доманика анализируется автором по керну на коллекции из пяти образцов. Следует отметить, что с этой целью могли использоваться образцы только «свежего» керна, поскольку в процессе хранения некоторые свойства пород утрачиваются.

Коллекция представляет собой достаточно компетентный набор образцов, характеризующихся близкими, но дифференцированными геохимическими параметрами керогена (ТОС 0.51-4.4 % масс, S₂ 0.53 -23.79 мгУВ/гОВ, T_{max} 441-452 °С пиролиза ОВ), которые свидетельствуют о разной керогенонасыщенности, степени генерации УВ и, как следствие, его зрелости. Обращает на себя внимание наличие в коллекции образцов с повышенными показателями минерального состава: D-167 с аномальным содержанием терригенной составляющей (минеральные включения кварц+КПШ – 20 %) и образца D-9-1 с высокой глинистостью (минеральные включения Иллит+Каолинит+Смектит – 18.5 %). Путем сопоставления расчетных параметров модуля сжатия (K) и модуля сдвига (μ) с опубликованными данными петроупругой модели керогена I типа по Хашину-Штрикману автор сформировал состав начальной модели коллекции экспериментальных образцов доманика: были уточнены упругие параметры минеральных включений, определена пористость. На этом этапе определить заполнитель микропустот керогена не удалось, но определены пределы, в которых должно лежать решение прямой задачи.

На следующем этапе был выполнен учет геометрии пустот и включений с их рассчитанными параметрами методами моделирования Кастера-Токсоза, самосогласования и дифференциальной эффективной модели. В результате для каждого включения были подобраны аспектные отношения, характеризующие его форму, установлен характер заполнения пор керогена (нефть) и получены в результате моделирования для всех образцов их упругие свойства – скорости продольной и поперечной акустических волн, соответствующие в пределах установленной ошибки измеренным значениям, подтверждено косвенными методами наличие пористости в керогене.

Была построена сейсмическая петроупругая модель, для которой рассчитаны коэффициенты отражения по Цеприттцу для продольной и поперечной волн. Установлено, что изменение зрелости (пористости) керогена влияет на контрастность волновых форм. К ней оказываются чувствительными и другие параметры отражений. Это подтверждает практический опыт по обнаружению устойчивой тенденции корреляции параметров пиролиза керогена с частотными характеристиками сейсмических отражений, полученный при интерпретации отложений баженовской свиты на одном из месторождений Западной Сибири.

Последующее применение сформированного физико-математического инструмента петроупругого моделирования показало его эффективность с учетом физичности расчетных моделей для всех интервалов зависимостей акустических скоростей от заданных (приписанных) параметров среды: пористости, интервальных значений трещиноватости, аспектных соотношений пор и трещин и др. Завершение работы моделью разреза конкретной скважины Волго-Уральской НГП с измеренными по ГИС значениями акустических параметров и их положительное сопоставление с расчетными параметрами на базе разработанной методики петроупругого моделирования показало успешность разработанной методики и логики последовательного применения параметров от базовой петроупругой модели по керну до расчета моделей разрезов по ГИС с учетом литолого-минералого-геохимической дифференциации литотипов и расчета коэффициентов отражения сейсмических волн в сейсмогеологической модели.

Особое внимание обращаю на удержание геологичности расчетных моделей на всех масштабах, несмотря на явные соблазны математики, - периодически в отдельных интервалах параметров, искажающих физичность или геологическую обоснованность расчетных значений, автор всегда ограничивает функциональность (интервал параметров) петроупругой модели объективными рамками её применения вне зависимости от масштаба.

Следует отметить убедительную логику построений на основе теории эффективных сред. Фактически речь идет о формировании теоретической базы для прогнозирования залежей в высокоуглеродистых формациях, являющихся НМТ. Многочисленные эмпирические наблюдения уже привели к пониманию того, что определяющими условиями

для образования ловушек в них являются процессы трансформации керогена с одной стороны и факторы тектонического напряжения, формирующие пространственную трещинную проводимость – с другой. Представленная работа убеждает, что использование акустических моделей позволит упорядочить многочисленные попытки практического сопоставления акустических и геохимических параметров на единой методологической основе. В этом видится **бесспорная практическая значимость выполненной работы**. А, учитывая, что петроупругая модель доманиковых отложений в сквозной линейке масштабов от керна до ГИС и сейсмики выполнена впервые – подчеркивает **новизну предлагаемых решений**.

К сожалению, лабораторное изучение базовой коллекции образцов весьма поверхностно, особенно в части минерального состава и микротекстурных особенностей (петрография+сканирующая микроскопия), а также лабораторных исследований керогена в коллекционных образцах. Известно, что часть минеральной матрицы (кварц, карбонаты) является продуктом минерализации захороненной органики (параллельный процесс «созревания» керогена и всем сопутствующим этому механизмам), а водородный индекс (HI) количественно интерпретирует степень зрелости керогена в сопоставимых выборках. Возможность количественного учета указанных факторов, с точки зрения оппонента, упростили бы для автора задачу построения базовых петроупругих моделей. Например, ограничив рассматриваемый интервал для ТС, поскольку ассоциированность керогена и аутигенной сингенетичной ему минеральной составляющей определяют начальные свойства ТС уже отличными от «мягкой» модели. Это замечание никоим образом не понижает уровень рецензируемой работы, но свидетельствует о недостаточной помощи консультировавших автора специалистов.

Представленная диссертация «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ ПОРОД ДОМАНИКОВОЙ ФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД» является законченным исследованием, выполненным на современном научно-методическом уровне, и полностью соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 (в действующей редакции), а её автор Всеволод Станиславович Окунович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9. – Геофизика.

Заместитель начальника научно-аналитического центра исследований керна ООО «Корэстест сервис» по научной и методической работе, кандидат геолого-минералогических наук



Т.А.Коровина

Контактные данные:

Ф.И.О. полностью: Коровина Татьяна Альбертовна

электронная почта: korovina_ta@coretest.ru;

телефон: +7(912)925 1258;

адрес места работы: Тюменская область, г.Тюмень, ул Ленина, 2а, офис 002

Подпись Т.А.Коровиной заверяю.

Генеральный директор
ООО «Корэстест сервис»
14.10.2025



Е.А.Романов