

МНОГОМАСШТАБНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОВОЙ ГЕОСРЕДЫ, СОПРЯЖЕННОЕ С ФИЛЬТРАЦИОННЫМ СТОКОМ СКВАЖИНЫ

© 2013 В.И. Астафьев¹, М.Г. Кахидзе², В.И. Попков³, А.В. Попкова⁴

Представлено моногармоническое сопряжение взаимодействия горного напряжения порового пространства нефтегазонасыщенных пластов и осредненных гидродинамических стоков вязкой нефти в скважину, полученное на фронте инновационных решений в нефтяной отрасли в целом. В рамках блочно-однородной модели скважины, с использованием трехмерной линейаризованной теории распространения волн по поверхности слоя геофизической эмиссии, представляется математическая постановка проблемы асимметричной фильтрации с конечной скоростью воздействия. Приведены дисперсионные соотношения для вынужденных и резонансных диссипативных структур сдвигового слоя вязкоупругой фильтрации на фронте оторочки вытеснения нефти водой. Представлены результаты перераспределения осредненного профиля притока вязкой ньютоновской фильтрации в асимметричное энергетически устойчивое напряженно-деформированное состояние насыщенного порового пространства при различных граничных условиях: при закрытой или капиллярно-защемленной границе и свободной — на фронте вытеснения или интенсификации вытеснения заводнением застойных зон.

Ключевые слова: системный анализ, геоинформация, геофизические исследования, сейсмическая эмиссия, горное напряжение, петрофизика, геомониторинг, уравнения Навье-Стокса, гидродинамика, фильтрация, продольные, поперечные волны, диффузия, нелинейность, дислокация, вязкоупругость, релаксация, конечная скорость.

Введение

В современной геомеханике нефтегазонасыщенных горных структур сложилось представление о разработке углеводородов (УВ) как о многомасштабном, много-

¹Астафьев Владимир Иванович (vlast@ssu.samara.ru), кафедра теоретической механики Самарского государственного аэрокосмического университета (Национального исследовательского университета), 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

²Кахидзе Мария Гиевна (KakhidzeMG@samnipineft.ru), отдел внедрения новых технологий и инжиниринга добычи, СамараНИПИнефть, 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Вилоновская, 18.

³Попков Вячеслав Иванович (PopkovVI@samnipineft.ru), отдел высоковязких нефтей и природных битумов, СамараНИПИнефть, 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Вилоновская, 18.

⁴Попкова Алевтина Вячеславовна (PopkovaAV@samnipineft.ru), отдел петрофизики, СамараНИПИнефть, 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Вилоновская, 18.

уровневом поляризованном процессе разрушения вязкой структуры порового пространства геосреды. При микросейсмических исследованиях поиска, разведки, разработки УВ, притока трещин гидроразрыва пласта (ГРП), геолого-гидродинамических исследованиях скважин, оптимизации глубинного бурения и заканчивания скважин проектировании геофизических приборов контроля притока системой дроссель-клапанов широко применяются методы геофизических поляризационных исследований твердых, жидких и пластических материалов с внутренней многомасштабной микроструктурой: гидрофобных, гидрофильных горных пород, цемента, глин, "суспензий", "микроморфных" жидкостей, поверхностно-активных веществ, вязкоупругих систем и др., что ведет к необходимости их научного изучения и параметризации для целей интеллектуального проектирования разработки сложноорганизованных коллекторов многоуровневой системой горизонтальных и вертикальных скважин. Глобальные методы построения моделей многомасштабных сплошных сред, основанные на обобщенном вариационном принципе, развиты в известных работах Л.И. Седова, блочной солитонной геомеханике литосферы — трудах А.Н. Дмитриевского, комплексных, сопряженных с разработкой УВ и специальных исследований геофизических полей — в "учении о нефтяном пласте" С.Дж. Пирсона.

Вопросам кинетики поражения и влияния состояния околоскважинной зоны пласта (ОЗП) на величину коэффициента извлечения нефти (КИН) посвящены работы В.Н. Щелкачева, Н.М. Дмитриева, В.М. Максимова, Л.Х. Ибрагимова, В.И. Щурова, Н.Н. Михайлова, И.Т. Мищенко, В.М. Люстрицкого и др. Вопросам смачиваемости, противоточной пропитки, полярности, поляризации фильтрации, блочной сегментации пласта посвящены работы М.Л. Сургучева, А.М. Кузнецова. Зависимости предельных градиентов давления и скорости от проницаемости коллектора — исследования В.А. Байкова, мгновенной скорости деформации от предельной стартовой скорости и времени запаздывания — работы Ю.М. Молоковича.

Состояние ОЗП предопределяет условия фильтрации не только в этой ограниченной области, но и формирует избирательность движения пластовых жидкостей в удаленной зоне пласта (УЗП). Модель сложно организованного коллектора и матрицы предложили П. Поллард, С. Пирсон (P. Pollard, 1959, S.J. Pirson, 1961), С.А. Христианович. Динамические условия синергетики ОЗП и УЗП исследовались В.В. Кадетом. Сопряжение аналитических разномасштабных функций скин-фактора трещины и проводимости "пласт — трещина ГРП" приведено в комплексированном решении [1], которое соответствует известным экспериментальным данным.

В геофизических и экспериментальных исследованиях геосреды и сплошных сред замечено, что в их поведении присутствуют различные эффекты, зависящие от масштабного фактора. Эти эффекты характерны не только для твердых материалов, обладающих микроструктурой в явном виде, но и для аморфных и жидких сред, в т. ч. воды и газа. Под микроструктурой среды в широком смысле слова понимается наличие у нее нескольких масштабов (структурных уровней), их самосогласованное взаимодействие и наличие возможности передачи энергии с одного уровня на другой. Известно, что около твердой поверхности жидкости образуют граничные слои толщиной 20–50 нм, в которых возникает специфическое расположение молекул. Это обуславливает особые механические, реологические, термодинамические и оптические свойства тонких граничных слоев жидкости. В тонком граничном слое вязкость перестает быть материальной характеристикой жидкости. Она зависит от размера и энергии активации. При реализа-

ции водоотталкивающих технологий гидроизоляции ОЗП, скважин с созданием полярных цементных, гелевых экранов замечено, что граничные молекулярные слои контактов различных материалов, компонентов и фаз работают по правилам моментов с многократным усилением поверхностных сил в резонансном режиме дислокации, формируя поляризованные зоны концентрации напряжений, не описываемые классическими моделями распределения нормальных напряжений.

1. Теоретический анализ

В начальный период становления и развития основ механики сплошной среды классики науки уделяли существенное внимание изучению и моделированию микроструктуры деформируемых тел и ее влиянию на свойства сопротивления тел деформированию. Особо выделены подходы, предложенные Пуассоном (S.D. Poisson, 1842), Фойгтом (W. Voigt, 1887) и Кельвином (W. Thomson, 1890), братьев Коссера (E. Cosserat, F. Cosserat, 1909), обращающие внимание на возможное наличие структурных элементов, являющихся носителями дополнительных к классическим степеней свободы в виде дополнительных поступательных или вращательных форм движений и соответствующих им внутренних взаимодействий.

Классическая гидродинамика не описывает размерный (масштабный) эффект вязкости, и по этой причине он рассматривается как аномальный. Возросшее за последнее время количество публикаций, посвященных различным аспектам гидродинамики, построенной в рамках континуума Коссера, свидетельствует о возрастании интереса к ней. Этот интерес обусловлен расширением области практического применения моментной гидродинамики для описания и понимания явлений, протекающих в граничных слоях и определяющих физическую сущность многих практически важных технологических процессов, таких как поиск, разведка, инверсия условий глубинного генезиса углеводородов, неотектоника (в связи с нефтегазоносностью), сейсмическая геофизика, разработка нефтяных и газовых месторождений, флотация, коагуляция, устойчивость дисперсных и коллоидных систем, тепломассоперенос, трение, биотехнологические процессы в различных структурах порового пространства и т. д.

Для жидкой среды часть этих эффектов можно объяснить с помощью общепринятой теории Навье-Стокса и уравнения энергии: это, например, температурные скачки и наличие скорости скольжения потока [2]. Ряд других не поддается описанию с помощью традиционной теории, например отличные от классической теории многомасштабного коллекторного притока, сопряженного с матрицей техногенными каналами и трещинами, с сопутствующими временами запаздывания, коэффициентами трения, капиллярными эффектами, изменениями вязкости и других поверхностных эффектов [3]. Одной из альтернативных теорий континуума является так называемая теория микрополярных сред (среда Коссера), которая основана на уравнениях сплошной среды: уравнение сохранения массы, количества движения и неразрывности в постановке многомасштабного континуума и энергетического сопряжения напряженно-деформированного состояния [4].

В случае стационарного движения вдоль линии тока l уравнения движения и неразрывности представляют систему уравнений в частных производных скорости и давления:

$$\rho \left[v_l \frac{\partial v_l}{\partial l} + \tau v_l \frac{\partial}{\partial l} v_l \frac{\partial v_l}{\partial l} \right] = - \left(\frac{\partial p}{\partial l} + \frac{h^2}{6} \frac{\partial^3 p}{\partial l^3} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\mathbf{v}l_k) + \frac{h^2}{6} \frac{\Delta \partial}{\partial x_k}(\mathbf{v}l_k) = 0, \quad (2)$$

где h — масштаб микроструктуры, τ — время релаксации.

Дифференциальное уравнение (1) может быть представлено в виде

$$dT + \tau v \frac{d}{dt} dT = -(dP + \frac{h^2}{6} \frac{d^2 dP}{dl^2}), \quad (3)$$

где $dT = d(\rho v^2/2)$ — приращение кинетической энергии.

Для решения поставленной задачи необходимо задать начальные условия для скорости и ускорения, давления и скорости на границе, а также их первые и вторые производные по нормали к границе. Эти ДГУ позволят учесть граничные эффекты от введения микроструктуры. Решения моментных уравнений (1), (2) должны удовлетворять граничным условиям, заданным на поверхности тела. Геометрические граничные условия, определяющие характер закрепления тела, накладываются непосредственно на перемещения v_l . Статические граничные условия, определяющие характер нагружения тела поверхностными силами, записываются следующим образом: $t_\alpha = T_\alpha$ ($\alpha = 1 - 3$). Здесь T_α — проекции поверхностной нагрузки на оси α, β, γ ; $t_\alpha = \sigma_\alpha l_\alpha + \tau_{\alpha\beta} l_\beta + \tau_{\alpha\gamma} l_\gamma$, где $\sigma_\alpha, \tau_{\alpha\beta}, \tau_{\alpha\gamma}$ — напряжения в соответствующей точке граничной поверхности; $l_\alpha = \cos(\angle n\alpha)$ — направляющий косинус нормали к этой поверхности.

Приведенные уравнения могут быть получены из вариационных принципов как условие минимума некоторых энергетических функционалов. Вариационные принципы устанавливают энергетические критерии, по которым истинное состояние тела, имеющее место при заданных нагрузках и условиях закрепления, можно выделить из всех возможных его состояний. Очевидно, что существует множество систем перемещений $u_\alpha(\alpha, \beta, \gamma)$, составляющих совокупность кинематически возможных состояний тела. Вариационные принципы устанавливают энергетические критерии, которые позволяют выделить истинные системы перемещений или напряжений из возможных [5]. Истинная скорость фильтрации динамической поровой структуры: разуплотненной, уплотненной и застойных диффузионных зон сдвиговых напряжений ассоциируется с эффективной проницаемостью k_α ($\alpha = 1 - 3$) различных масштабов анизотропности, рис. 1.

Уравнение (3) свидетельствует о том, что в классическом случае, при $\tau = 0$, функция давления связана только с приращением кинетической энергии, а при наличии релаксации еще и с переносом градиента кинетической энергии со скоростью v . Таким образом, учет времени релаксации ведет к уменьшению приращения кинетической энергии в случае ее возрастания и замедления падения в случае ее убывания по сравнению с классическим случаем. Следовательно, сам эффект релаксации учитывает историю изменения кинетической энергии. Многомасштабность релаксационных процессов ОЗП и УЗП подтверждается энергетически сопряженными геофизическими решениями уравнений Навье-Стокса в напряженно-деформируемой горной среде [6-8].

2. Поляризация микроструктуры поровой геосреды, симметрии вязких фильтрационных деформаций УВ и упругого порового пространства геосреды

В работах А.И. Тимурзиева [9; 10] при расчете напряженно-деформированного состояния ячеек дефлюидизации Земли представлена увязка касательного и нор-

мального напряжений горной породы с наклоном структурной поверхности. При касательном напряжении τ , большем нормального напряжения σ , угол сдвига $\gamma = \operatorname{tg} \alpha = \tau/\sigma$, тогда $G = \operatorname{grad} f_z = r(2E/\lambda)^{1/2}$, где f_z — высота рельефа структуры пласта, r — единичный вектор, E — энергия деформации, λ — модуль упругости породы. С увеличением градиента поверхности возрастает энергия деформации на растяжение, следовательно, увеличивается не только плотность сколов, разломов и радиального притока, но и микротрещин, мини-ГРП при заводнении пласта. Повышается проницаемость породы в вертикальном направлении, амплитуды собственных массовых выбросов, понижается вертикальная анизотропия до минимальных уровней диссипации, формируя сверхпроводящие разломы и наклонные разуплотненные каналы [8].

Моментные явления микроуровня, генерации упругих волн вязкого стока скважин и границ геосреды, называемые акустической эмиссией, вызванной внезапной перестройкой в структуре материалов горных пород, находящихся в напряженно-деформированном состоянии, обнаружены при акустических исследованиях поиска, разведки УВ, микросейсмике ГРП и неотектонике разрабатываемых пластов. Помимо появления диссипативных предвестников геоакустической эмиссии (резкое затухание продольных скоростей) на удалении порядка сотни метров от источника деформационных возмущений (скважин), сами сигналы геоакустической эмиссии обладают выраженной анизотропией. В этом случае можно по известным диаграммам направленности акустического излучения сдвиговых источников вычислить их пространственное распределение в предположении, что они ориентированы в направлении максимальных касательных напряжений. R.C.K. Wong and K.T. Chau (Китай/Калгари) [11; 12] при решении задачи Миндлина (R.D. Mindlin, 1936) показали, что при интенсификации нагнетания всегда существует сейсмическая проблема оценки поверхностных вертикальных колебаний вследствие расширения продуктивного пласта, вызванного нагнетанием.

В работе [13] получен энергетически сопряженный аналитический вид всех величин, характеризующих напряженно-деформированное состояние в рамках этой задачи. В гидродинамических задачах фильтрации вязких жидкостей в упругой поровой среде использован двухуровневый подход [6] с различием макроуровня и микроуровня трехмасштабной энергетической модели Кармана. Из анализа решения данной задачи можно установить макропараметры, которые откликаются на "моментные" свойства материала. В качестве таких параметров можно выбрать величины, которые были измерены в экспериментах доступными и достаточно надежными методами [5] и коррелируются с фазовыми углами смещений и деформаций моментной напряженно-деформируемой поровой геосреды, рис. 1.

1. Величина D_1 , характеризующая степень искажения контура кругового отверстия скважины от действия одноосной нормальной нагрузки: $D_1 = |u_r(R_0, \pi/2)/u_r(R_0, 0)|$. В классическом случае для плоско-деформированного и плоско-напряженного состояния эта величина не зависит от материальных констант горной породы, радиуса скважины и равна трем.

2. Величина D_2 , характеризующая степень изгиба (неоднородность деформации, смещений) поверхности в окрестности отверстия скважины: $D_2 = |\varepsilon_{zz}(R_0, 0) - \varepsilon_{zz}(R_0, \pi/2)|$. Для классической теории упругости эта величина также не зависит от материальных констант породы геосреды и радиуса скважины.

Анализ напряженно-деформированного состояния геосреды показывает [14], что в наклонном под углом α насыщенном поровом пласте организуется де-



Рис. 1. Высота рельефа D_1 и деформаций D_2 разуплотненной (1), уплотненной (2) и застойной (3) зон при одноосном нагружении поровой структуры проницаемости k_α вязким стоком скважины

формация структуры притока в круговое отверстие скважины, рис. 1. Вдоль главной оси нормального нагружения, вдоль склона, касательные напряжения могут превышать нормальные. Формируются фильтрационные каналы суперколлектора 1-го типа, связанные с разуплотнением породы и максимальной деформацией рельефа, параметров D_1 и D_2 . Макроскопический канал дефлюидизации, генетически связанный с основным руслом, имеет пограничную с коллектором 2-го типа оболочку, зону минимальных деформаций D_2 , масштаба микроуровня, моментный слой сдвиговых напряжений и деформаций.

Второстепенный сток самоорганизованной оболочки пограничного упругого слоя геосреды связан с зоной уплотнения, расчлененности коллекторов, относится ко 2-му динамическому типу коллектора. Сектор, ортогональный оси основного русла, характеризуется повышенной трещиноватостью мини-ГРП неотектонического характера. Трещиноватость порового коллектора, являясь живым изломом структуры, в отличие от высокопористых каналов, не имеет пограничной оболочки. Этот пограничный слой основного русла, слой минимальных продольных и максимальных поперечных деформаций, максимального энергетического уровня самоорганизации структуры, является объектом данного исследования.

Зона минимальных продольных смещений и деформаций коллектора 3-го типа сопряжена с основным коллекторным стоком скважины узким конвективно-диффузионным слоем неравновесной сейсмической эмиссии энергетического эволюционного преобразования продольных волн в поперечные. Динамически неравновесный сдвиговый слой, формируя "пригожинские структуры" [15], обладает максимальным уровнем резонансного накопления и диссипации энергии типа лазера.

Напряженно-деформированное состояние поровой среды формирует асимметричный тензор упругой деформации и матричной проницаемости поровой геосре-

ды на рельефных склонах нефтегазонасыщенной структуры. Неотектонические трещины и мини-ГРП, имея анизотропную направленность, усиливают вертикальную гидродинамическую связь, многоуровневую расчлененность пластов и глобальную блочную самоорганизацию литосферы Земли.

3. Энергетическое сопряжение вязкой фильтрации и диффузионного движения поровой геосреды

На рис. 2 изображены профили структуры притока нефти осредненной скважины при разработке нефтегазонасыщенных пластов. Выделяются три основных динамических блока энергетической структуры: 1 — эксплуатация на максимально эффективных потенциальных дебитах; 2 — переходный, предполагающий поддержание пластового давления, интенсификацию и восстановление потенциальных уровней по жидкости; и 3 — минимальных дебитов по нефти, вытеснения из капиллярно-защемленных межскважинных и удаленных зон, трудноизвлекаемых участков завершающей стадии разработки или начальной — для высоковязких нефтей.

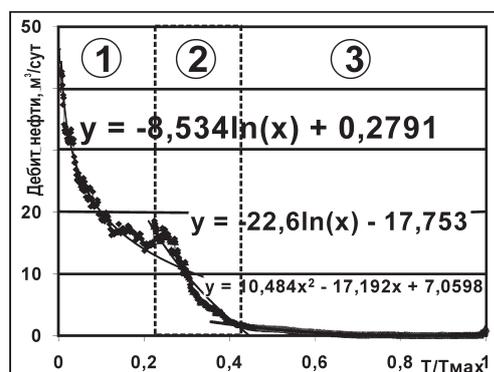


Рис. 2. Трехмасштабная (по Карману) пространственно-временная геофлюидная структура притока нефти в осредненную скважину из реальной многомасштабной залежи углеводородов

Рассматриваемая сплошная среда представляет собой область потенциального стока дебита Q и радиальной скорости притока U в скважину радиуса R_w из деформируемой области вязкой фильтрации — радиуса R_0 и диффузионного разрушения вязкоупругой поровой геоструктуры толщиной h (рис. 3) при минимально возможной динамической скорости u_* капиллярной пропитки масштаба $l^* = \nu/u_*$, где ν — кинематический коэффициент вязкости.

На границе проницаемого порового пространства (сегмент 1), на оторочке фронта вытеснения, за счет времени релаксации разрушения структуры формируются избыточные давление δp , дебит δq и фазовые траектории радиальных и сдвиговых скоростей фильтрации с комплексными фазовыми углами скоростей деформаций. Капиллярным гравитационным фазовым защемлением, противоточной пропиткой (2) из дренажа исключаются застойные блоки (3), приводя к обводнению скважин (языки обводнения 1') и ограничению вытеснения нефти.

4. Основные уравнения и граничные условия

Задача определения кинематических и динамических характеристик вязкоупругого конвективно-диффузионного сдвигового слоя, подверженного нормальным пульсационным нагрузкам давления, ставится следующим образом [7; 14].

Решаются уравнения деформаций непрерывной многослойной геосреды в напряжениях

$$\sigma_{ij,j}^q = \rho^q \frac{\partial^2 \xi_i^q}{\partial t^2}; \quad \sigma_{ij}^q = \mu^q (\xi_{i,j}^q + \xi_{j,i}^q) + \lambda^q \delta_{ij} \xi_{i,i}^q, \quad i, j = 1-3; q = 1-N, \quad (4)$$

где ξ_i^q — смещения; λ^q, μ^q, ρ^q — параметры Ламе и плотность слоев.

Внешняя поверхность неподвижная

$$\xi_i|_{y=0} = 0$$

или свободная

$$\sigma_{ij}|_{y=0} = 0. \quad (5)$$

Движения вязкой несжимаемой жидкости в поровой геосреде описываются уравнениями Навье-Стокса и неразрывности:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j v_{i,j} - \langle v_j v_{i,j} \rangle + v_j U_{i,j} + U_j v_{i,j} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 v_i;$$

$$v_{i,i} = 0; \quad \nu U'_y = u_*^2 + \langle v_x v_y \rangle,$$

где $\langle v_j v_{i,j} \rangle = 1/4(v_{i,j} v_j^* + v_{i,j}^* v_j)$, * — комплексное сопряжение, v_i, U_i — пульсационные и осредненные скорости; p — давление; ν, m, ρ_f — кинематическая вязкость, пористость и плотность жидкости.

ДГУ при $\eta = (R_0 - r)u_*/\nu$:

$$p = \frac{\sigma_{xx}}{\rho_a} u_*^2, \quad u = \frac{\partial \xi_y}{\partial t} - \xi_x U',$$

$$v = \frac{\partial \xi_x}{\partial t}, \quad w = \frac{\partial \xi_x}{\partial t} \sin \theta. \quad (6)$$

Уравнения (4), (6) допускают решение в виде продольных и поперечных волн

$$s = s(y) \exp[i(k_x x + k_z z) - i k c t], \quad s = \phi, \psi, v_i, p;$$

где $k_i, k = [k_x^2 + k_z^2]^{1/2}$ — волновые числа, c — фазовая скорость.

Подставляя решение в систему уравнений (4), (6) и пренебрегая квадратичными членами пульсаций скоростей, получаем решение в виде

$$v_i(\eta) = \frac{1}{k} \int G_i(t) \operatorname{sh} k(\eta - t) dt + c_i e^{-k\eta},$$

$$p(\eta) = \frac{1}{ik} \int G(t) \operatorname{sh} i k(\eta - t) dt + c_4 e^{-ik\eta}, \quad U' = 1 + \langle v_1 v_2 \rangle \quad (7)$$

где $G_1 = \Theta_1 + v_2 U' + ik_x p$, $G_2 = \Theta_2 + p'$, $G_3 = \Theta_3 + ik_x p$, $\Theta_i = -ik c v_i$, $G = -ik_x U' v_2$. Здесь переменные обезразмерены с помощью динамической скорости u_* и микромасштаба $l^* = \nu/u_*$.

Из условий гладкого сопряжения осредненного фильтрационного стока Дюпюи $U = Q/(2\pi R H m) = 1/\alpha \ln \eta + C_{\alpha}$ с диффузионным (8) в некоторой точке R фазовой границы Σ_R дренирования скважины находим параметры буферной зоны $\alpha = m/RU'(R)$ и $C_{\alpha} = U(R) - \ln R/\alpha$, где — толщина пласта.

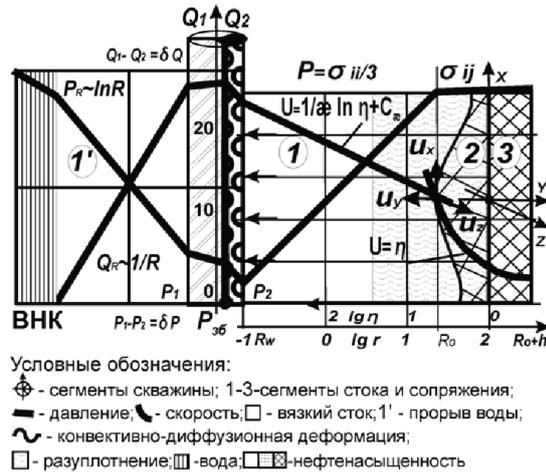


Рис. 3. Энергетическое сопряжение вязкого стока скважины (1), диффузионной деформации (2,3) и самоорганизованного канала прорыва воды (1') из водонефтяного блока (ВНК)

Из уравнений Гиббса следует [14], что пористость, не будучи параметром состояния, является частью объемной деформации и может быть исключена из уравнений баланса масс. При динамическом сопряжении скорости фильтрации и реальной осредненной пористость вошла в константу α . Энергетически самоорганизованная граница Σ_R многомасштабной структуры порового пространства формирует динамически неоднородную анизотропную проницаемость вязкого стока скважин.

Корреляция пульсаций давления с продольной скоростью $\langle pv \rangle$ определяет диффузию пульсационной энергии. Сдвиговые напряжения, совпадающие по направлению со скоростью распространения волн давления, т. е. если крутящий момент совпадает с направлением фильтрационного потока, увеличивают диффузионный поток $\langle pv \rangle$ и скорость пропитки $\langle uv \rangle$. В обратном случае — уменьшают, тем самым вязкоупругий слой на фронте вытеснения становится перераспределяющим. При отсутствии напряжений сдвига на границе вязкоупругого слоя поток энергии $\langle pv \rangle$ уравнивается скоростью диссипации

$$\Phi = \frac{\omega}{4} \int i \{ [\lambda^*(\omega) - \lambda(\omega)] \varepsilon_{ii} \varepsilon_i^* + [\mu^*(\omega) - \mu(\omega)] \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}^* \} dx, \quad (8)$$

т. е. коэффициент диффузионного потока $Y_q = \langle pv \rangle / \Phi = 1$ на всех частотах.

На основании решения поставленной задачи получены напряженно-деформированное состояние слоя сейсмической эмиссии, скорость диссипации, потенциальная и кинетическая энергии эластичного сдвигового слоя диссипативной структуры типа Кельвина-Фойхта и обобщенной, в зависимости от волнового числа, фазовой скорости, толщины и геомеханических параметров слоя. При гармоническом законе нагружения вязкоупругая модель описывается динамическими модулями сдвига и упругости $\mu(\omega) = \mu_0 - i\omega\eta_s$, $\lambda(\omega) = \lambda_0 + i2/3\omega\eta_s$, где μ_0 , λ_0 — статические модули; η_s — сдвиговая вязкость.

Функция релаксации обобщенной модели представлена суммой экспонент $\mu(t) = \mu_0 + \sum_{j=1}^n \mu_j e^{-t/\tau_j}$ и динамическими модулями:

$$\mu(\omega) = \mu_o + \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j (\omega\tau_j)^2}{(1 + (\omega\tau_j)^2)} - i \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j \omega\tau_j}{(1 + (\omega\tau_j)^2)},$$

$$\lambda(\omega) = \lambda_o - \frac{2}{3} \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j (\omega\tau_j)^2}{(1 + (\omega\tau_j)^2)} + i \frac{2}{3} \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j \omega\tau_j}{(1 + (\omega\tau_j)^2)}.$$

Расчет проводился при следующих значениях параметров: $\lambda_o = 10^8 \text{ н/м}^2$, $\rho_q = 2500 \text{ кг/м}^3$; $\mu_o = 7 * 10^5 \text{ н/м}^2$ для модели Кельвина-Фойхта и $\mu_o = 3,5 * 10^5 \text{ н/м}^2$ — для обобщенной. Коэффициент сдвиговой вязкости варьировался от $\eta_s = 10$ до $\eta_s = 10^5 \text{ н/м}^2$. Профили поперечных и затухающих нормальных напряжений, рис. 6, в закрепленном слое с параметрами: $h = 0,02 \text{ м}$, $\mu_0^2/\mu_0^1 = 5$, $\rho_s^1 = \rho_s^2$, $\tilde{\alpha} = 0,04$ (1); 0,5 (2); 1 (3); 2,5 (4); 5 (5); 10 (6), где $\tilde{\alpha} = kh$, четко проявляют внутреннюю структуру геосреды и используются в ГИС, инверсии 3D-сеймики.

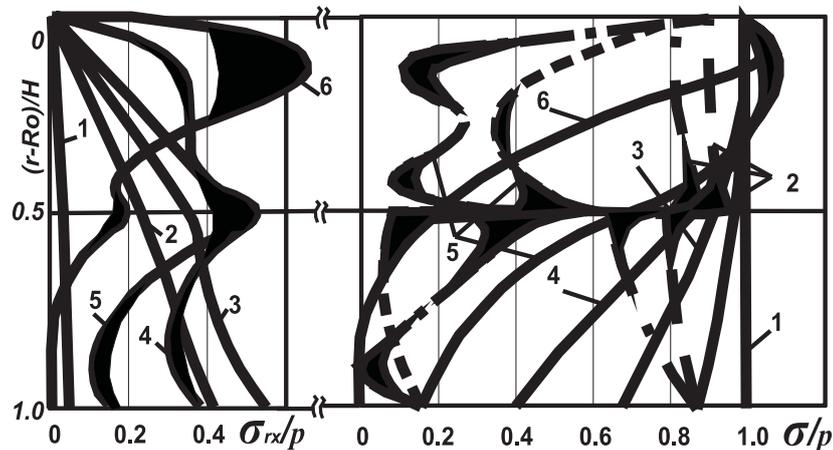


Рис. 4. Динамическая поляризация нормальных напряжений стока скважины в поровой структуре вязкоупругой геосреды

Наибольшие нормальные напряжения имеют место на поверхности, а внутри слоя принимают минимальные значения, т. е. радиальные составляющие напряжений и смещений закономерно затухают. Для касательных напряжений закономерность иная: максимумы находятся на некоторой глубине или на поверхности, т. е. происходит закономерное перерождение радиальной составляющей движения в касательные, пленочные: симметричные напряжения давления расщепляются на тензор напряжений с изменением фазы радиальных скоростей притока на вертикальные. Коэффициент вертикальной анизотропии относительной фазовой проницаемости (ОФП), применяемый в разработке, сдвигового блока фильтрации уменьшается и становится < 1 .

Результаты расчета разности фазовых углов сдвига нормальных радиальных и поперечных смещений поверхности вязкого подслоя показывают, что при фазе касательного напряжения $\phi_\xi > \pi/2$ разность фаз $|\phi_2 - \phi_1| > \pi/2$. В этом случае возникает отрицательный сдвиг фаз на низких частотах до 0.4 длинных волн геологического и прогнозного времени, который приводит к возникновению мощного отрицательного потока через границу. На тех же частотах, в случае $\phi_\xi < \pi/2$, на поверхности генерируется положительное касательное напряжение, которое приводит к увеличению сопротивления трения, угнетению фильтрации и капиллярному заземлению фаз.

5. Анизотропная проницаемость и ОФП вязкого стока скважины, частотно-резонансный метод вертикального зондирования

При определении диффузионных и диссипативных свойств межфазальных, межфазных сдвиговых слоев, возбуждаемых нормальной пульсационной нагрузкой вязкого стока, перемещающейся с некоторой скоростью, обратимся к изучению собственных колебаний и поведения структуры в районе собственных частот. На примере численного исследования дисперсионных соотношений для собственных форм колебаний вязкоупругого цилиндрического слоя при несимметричных волновых граничных условиях на основе анализа корней дисперсионного уравнения рассмотрен характер распространения нормальных волн в зависимости от функций потерь в материале и вида граничных условий.

Записывая уравнения (4) в цилиндрической системе координат, получаем систему дифференциальных уравнений типа Бесселя, а решение в виде

$$s(z_s) = c_i J_{i-1}(z_s) + c_{i+1} Y_{i-1}(z_s),$$

где $z_s = k_s r$, $i = 1$, $s = \phi$; $i = 2$, $s = \psi$, $k_\phi^q = k[(c/a_\lambda^q)^2 - 1]^{1/2}$;

$$k_\psi^q = k[(c/a_\mu^q)^2 - 1]^{1/2}; a_\mu^q = [\mu^2/\rho^q]^{1/2}; a_\lambda^q = [(\lambda^2 + 2\mu^2)/\rho^q]^{1/2}.$$

При удовлетворении граничным условиям (5) получаем трансцендентную систему уравнений четвертого порядка и характеристическое уравнение $\det [A] = 0$ для нахождения собственных комплексных волновых чисел $\gamma = \alpha + i\beta$ геофизической эмиссии, слоя преобразования продольных скоростей в поперечные с резонансными пластическими вбросами и разуплотнением породы.

Резонансные частоты вязкоупругой диффузионной фильтрации вычислялись при приведенных значениях равновесных параметров μ_0 , λ_0 , ρ , $R_0 = 60$ м, $h = 0.02$ м. Варьировались параметры вязкоупругого слоя; время релаксации материала — от ∞ до 0 при динамическом модуле релаксации $\mu_1 = 10$. Исследовалась структура со спектром времен релаксации, равномерно распределенным на рассматриваемом интервале частот. При $\tau \rightarrow 0$ геосреда равновесно упругая, при $\tau \rightarrow \infty$ — упругая, но упрочняющаяся. При малых временах релаксации вязкость сказывается только на высоких частотах, и, наоборот, при больших τ вязкость проявляется на малых частотах. При спектре времен релаксации модуль потерь практически равномерно распределен на диапазоне частот от $1/\tau_{\max}$ до $1/\tau_{\min}$.

На рис. 5 приведены значения безразмерной фазовой скорости $c_\Phi = c/c_0$ (сплошная), где $c_0 = [\mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu)\rho_s]^{1/2}$, и коэффициентов затухания δ (пунктирная) свободного слоя в зависимости от частоты $\omega_K = \omega h/c_0$ при спектре времен релаксации. Практически с нулевой частоты появляется изгибная волна, распространяющаяся со скоростью, определяемой модулем Юнга. При увеличении частоты фазовая скорость стремится к скорости распространения поперечной волны. На собственных частотах наблюдается резкое снижение коэффициентов затухания.

При переходе через собственную частоту амплитуды становятся значительно больше толщины вязкого подслоя, а в районе собственной частоты $\omega_K \sim 1$ — в несколько десятков раз, с мощным поперечным вбросом флюидов и прихваченной литологии даже в слабых геофизических полях. Коэффициент анизотропии в блоке снижается ниже 1, увеличивая вертикальные смещения, водоперетоки, образуя неравновесные мениски наклонных контактов ГНК и ВНК, волновые

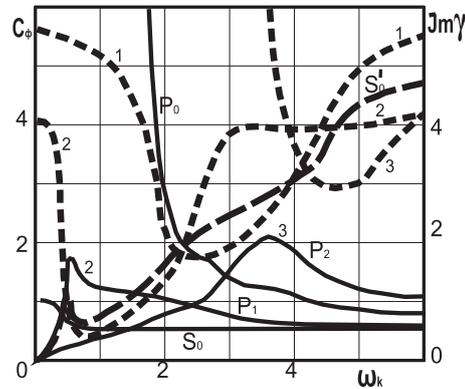


Рис. 5. Фазовые скорости и коэффициент затухания изгибной и первых поперечных мод от частоты для вязкоупругого свободного слоя

намывы углисто-слоидных, глинистых частиц по границам нефтемещающей поровой структуры, вертикальные прорывы воды при интенсификации заводнения. Тангенциальные напряжения фазовых волновых "всплесков" формируют наблюдаемые в геофизике короны дрейфа контактов, фациальные оболочки жильных суперколлекторов. Наклонные контакты, фазовые мениски плотностей и насыщенностей поперек каналов генезиса УВ являются сейсмическими атрибутами поиска и разведки жильных залежей и суперколлекторных каналов генезиса. Резонансно-волновые уплотнения и разуплотнения породы приводят к самообразованию наклонно-вертикальных каналов, порово-кавернозных, фрактальных систем вторичных напластований, не совпадающих по направлению с первичной структурой палеосадков.

Следует отметить, что в незакрепленных вязкоупругих слоях скорость диссипации и потенциальная энергия при малых волновых числах существенно выше соответственно тех же энергетических параметров в закрепленном слое. При волновых числах $\alpha H \geq 10$ эти характеристики практически не зависят от способа закрепления. Хотя в незакрепленном слое с высокой энергетической пропускной способностью скорость диссипации выше, чем у закрепленного с узким пропускным каналом, но в то же время и амплитуды колебания энергетического массопереноса поверхности существенно выше, чем у закрепленного с упруго-запертой границей. Этим объясняется увеличение гидродинамического сопротивления трения в пленочных сдвиговых слоях, так как пренебречь интенсивностью пульсационной энергии, генерированной поверхностью, нельзя.

При рассмотрении спектральных характеристик диссипативного пульсационного потока в поровом пространстве для динамического уравнения энергетического спектра можно пользоваться полученной зависимостью $\Phi(\alpha)$ с соответствующей модификацией функции переноса ОФП в районах блочных границ защемления, замещения коллекторов, низкой матричной проницаемости или застойных зон фильтрации.

Приведенные графики имеют резонансно-оптимальный характер — при возрастании волнового числа (фазовой скорости) диффузионный перенос поперек слоя возрастает. При достижении критической скорости диссипативные параметры слоя достигают максимума, при дальнейшем возрастании скорости происходит спад диффузионных свойств, рис. 6. При частотах выше критической наблюдает-

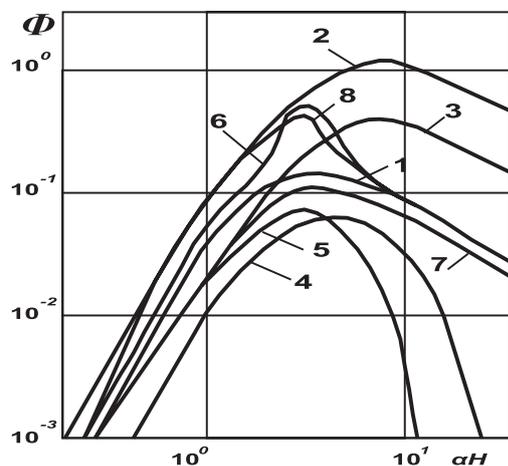


Рис. 6. Зависимость скорости диссипации от параметров вязкоупругой геосреды и волнового числа

Таблица

Параметры диссипативного сдвигового слоя микроструктуры поровой геосреды энергетически сопряженного стока в скважину

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8
слоев	1	2	3	4	5	6	7	8
$\mu_0^1 10^{-5}$	3,5	0,7	0,7	0,7	3,5	3,5	3,5	3,5
$\mu_0^2 10^{-5}$	3,5	0,7	3,5	3,5	3,5	0,7	0,7	0,7
μ_1^1	2	2	2	-	-	2	2	2
$\tau_1^1 10^3$	1,5	1,5	1,5	-	-	1,5	1,5	1,5
μ_1^2	2	2	2	2	2	-	2	2
h_1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
h_2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$\mu_0^1/\rho_0^1/c$	>1	<1	>1	>1	>1	>1	>1	>1
$\mu_0^2/\rho_0^2/c$	>1	>1	>1	>1	>1	<1	>1	<1
c	10	10	5	5	10	10	5	10

ся кризис диссипативных характеристик, т. е. слой демонстрирует отражающие упругие свойства и прекращение диффузионной капиллярной пропитки.

Резонансно-оптимальный характер динамических свойств сдвигового слоя был подтвержден лабораторными экспериментами при вытеснении нефти водой на керне и полевыми испытаниями геоэлектрического резонансного зондирования Земли. При повышении скорости вытеснения на керне наблюдались рост вязкой ньютоновской доли коэффициента вытеснения нефти водой, уменьшение остаточной нефтенасыщенности. При превышении критической скорости наблюдался спад коэффициента вытеснения, тем самым полнота извлечения нефти зависит от темпа заводнения эксплуатационного объекта. При полевых исследованиях геоэлектрическим методом становления короткоимпульсного поля в труднодоступных районах Ванкорского месторождения выявлены резонансные орбитали диссипативных структур геофлюидизации и оптимальные места заложения поисковых скважин.

Выводы

Эксперименты и расчеты показали, что конвективно-диффузионные волны изменяют стационарную часть осредненного макроскопического притока скважин и каналов дефлюидизации Земли. Поверхностные волны слоя сейсмической эмиссии вносят такие возмущения в фильтрационный сток, что динамические величины в них не могут быть представлены в виде простой суперпозиции средних и флуктуирующих с частотой волн полей, т. е. в виде интерференционной картины взаимодействия волн и скважин. Нелинейно изменяется суммарное потенциальное поле давлений, не по принципу аддитивности (не по Дарси), что ограничивает эффективность интенсификации заводнения залежей с сейсмоканалами.

Пульсационное поле давлений и скоростей позволяет определить осредненный за период поток импульса в вертикальном направлении, обусловленный корреляциями между флуктуациями скоростей и давлением, т. е. в конечном итоге — волнами. При макроскопических скоростях стока движутся вязкие слои УВ и воды, в то время как при малых скоростях дрейфа — сдвиговые слои разуплотненной поровой структуры глин, пелитов, карбонатов, доломитов, илистых осадков, что приводит к разбуханию границ, разуплотнению кровли, запечатыванию блоков, капиллярному защемлению и повышению расчлененности с уменьшением радиуса дренирования при интенсификации заводнения.

В зависимости от геологических условий вязкоупругий слой разломов, каналов, суперколлекторов и скважин взаимодействует с широким диапазоном волновых чисел, на котором скорость диссипации (диффузии и массопереноса) практически одинакова либо имеет подчеркнута селективные особенности. При этом максимально диссипирующими будут те границы, которые имеют максимальный коэффициент поглощения при сравнительно меньшем возмущении внешней поверхности.

В зонах сдвиговых дислокаций локализуется высвобождение значительной части потенциальной энергии, осуществляется переход механической энергии в тепловую, резко ускоряются процессы массопереноса в отдельных секторах на фоне относительно стабильных смежных участков. Высвобождение тепловой энергии, тектонодинамические процессы, мини-ГРП многократно активизируют процессы вертикальной и латеральной миграции флюидов, приводя к формированию зон аномально-высоких пластовых давлений, внедрению УВ в коллекторы-ловушки или секторному обводнению скважины.

Диссипативные свойства сдвиговых слоев коррелируют с диффузионным характером капиллярно защемленной фазы. Диффузионные свойства массопереноса капиллярно защемленного сдвигового слоя фильтрации имеют оптимально-резонансный характер по отношению к скорости закачки. При превышении критического волнового числа наблюдается спад диффузионных и диссипативных функций. Запирание массопереноса в пограничном сдвиговом слое фильтрации увеличивает остаточную нефтенасыщенность и снижает коэффициент извлечения нефти при разработке.

Дисперсионный анализ собственных форм колебаний сдвиговых слоев сейсмической эмиссии или оторочки фронта вытеснения и дренирования, вязкоупругие свойства которого характеризуются спектром времен релаксации, показал, что для закрепленных, замещенных, фазово-защемленных слоев не существует действительных фазовых скоростей, что приводит к угнетению и затуханию фильтрации в секторах застойных зон.

В свободном вязкоупругом слое оторочки фронта вытеснения всегда существует распространяющаяся изгибная волна, что приводит к возмущению потока, из-

быточному давлению с асимметричным увеличением ОФП вытесняющей фазы в секторе притока, росту фрактальности фронта вытеснения, ускоренному продвижению вязкой канальной фильтрации и быстрому обводнению скважины.

Тензорный характер горного напряженно-деформированного состояния позволяет сделать инновационный вывод о кардинальном отличии каналов дефлюидизации от системы тектонической трещиноватости. По генетической природе каналы генезиса не относятся к системе тектонической трещиноватости пластов. Корневая система тектонической трещиноватости имеет наклонно ниспадающий характер — от кровли. Живой поровый излом не имеет оторочки, что, в отличие от каналов генезиса УВ, позволяет относить его к непрерывным поровым коллекторам двойной проницаемости и пористости.

Вязкие слои генезиса УВ могут быть гидродинамически связаны с системой тектонической трещиноватости, но их фациальные границы простираются далеко за пределы отдельных куполов залежи и месторождения в целом. Уплотненные границы оболочек канальных фаций не могут быть обнаружены структурным бурением по реперным горизонтам, но диагностируются вертикальным зондированием Земли. Вертикальные деформации вышележащих пластов к поверхности литосферы вдоль разуплотненных поверхностей кровли и уплотненных диффузионных врезов с конвективно-диффузионным уплотнением глинистых и карбонатно-доломитизированных оболочек, волновым намывом углисто-слоидных или кристаллических карбонатов не затрагивают структурную топологию нижележащих палеосадочных отложений и могут иметь противоположные фазы амплитуд структурных смещений.

В настоящее время дефлюидизация мантии и генезис УВ происходят на уровне диффузии. Массоперенос из корневой системы генезиса в кристаллическом фундаменте начинается проводящими разломами в прилегающих к фундаменту литосферных слоях, с маловероятным пластопересечением осадочных ловушек, но большой возможностью самоорганизации резервуара-коллектора и разгрузки тангенциальных напряжений изливом и горизонтальным сжатием глинистых экранов защемления УВ с образованием обширных нефтематеринских битуминизированных ярусов (баженитов). Расширяющаяся к поверхности Земли фрактальная диффузионная корона дефлюидизации имеет больше шансов пластопересечения ловушек с образованием классических залежей УВ.

Литература

- [1] Астафьев В.И., Федорченко Г.Д. Моделирование фильтрации жидкости при наличии трещины гидравлического разрыва пласта // Вестник СамГТУ. Сер.: Физ.-мат. науки. 2007. № 2(15). С. 128–132.
- [2] Вайнберг А.М. Математическое моделирование процессов переноса. Решение нелинейных краевых задач. М.; Иерусалим, 2009. 209 с.
- [3] Михайлов Н.Н. Новые направления повышения информативности геолого-гидродинамического моделирования залежи // Нефтяное хозяйство. 2013. № 3. С. 69–73.
- [4] Вервейко Н.Д., Шашкина С.А. Влияние микроструктуры упругого материала на его деформирование // Вестник СамГУ. 2009. № 4(70), С. 101–113.
- [5] Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.

- [6] Попков В.И., Попкова А.В. Геогидродинамическое сопряженное взаимодействие горных напряжений с вязким стоком скважины // Актуальные проблемы математики и механики: материалы Всерос. науч. конф., посвящ. 75-летию Г.И. Быковцева. Самара, 2013. С. 117–118.
- [7] Voropaev G.A., Popkov V.I. Propagation of axisymmetric waves in a hollow viscoelastic cylinder // International Applied Mechanics. N. Y. 1989. Vol. 25. № 10. P. 973–976.
- [8] Попков В., Шакшин В., Воропаев Г. Блочная самоорганизация дефлюидизации Земли. Кластерная структура пространства времени // Saarbrücken. Germany: Palmarium Academic Publishing, 2012. 410 с.
- [9] Тимурзиев А.И. Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: тектонофизический и флюидодинамический аспекты (в связи с нефтегазоносностью): дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 2009.
- [10] Мельник И.А. Методика выявления перспективных нефтегазонасыщенных участков в тектонически напряженных зонах // Нефтяное хозяйство. 2013. № 3. С. 23–27.
- [11] Mindlin R.D. Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid // Journal of Applied Physics. 1936. V. 7. P. 195–202.
- [12] Wong R.C.K., Chau K.T. Casing Impairment Induced by Shear Slip Along a Weak Layer in Shale Due to Fluid (Steam) Injection // Journal of Canadian Petroleum Technology. 2006. V. 45. № 12. P. 60–66.
- [13] Kulesh M.A., Shardakov I.N. Parametric analysis of analytical solutions to one- and two-dimensional problems in couple-stress theory of elasticity // Z. Angew. Math. Mech. 2003. V. 83. № 4. P. 238–248.
- [14] Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.
- [15] Ванг В.К. Диссипативные структуры в реакционно-диффузионных системах. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований. НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2008. 300 с.

Поступила в редакцию 20/XI/2013;
в окончательном варианте — 20/XI/2013.

MULTI-SCALE STRESS-DEFORMATION STATUS OF POROUS GEOLOGICAL STRUCTURE AS RELATED TO WELL FILTRATION FLOWS

© 2013 V.I. Astafiev⁵ M.G. Kakhidze⁶ V.I. Popkov⁷ A.V. Popkova⁸

Mono-harmonic junction in the interaction of porous space rock stress in oil/gas saturated reservoirs and averaged hydro-dynamic flows of viscous oil towards wells obtained as a result of innovative decisions in oil industry in general is presented. Within the frames of block homogeneous models of a well through the application of 3D linear theory of wave diffusion along the surface of geophysical emission layer, mathematical statement of asymmetrical filtration challenge with finite velocity of effect is presented. Dispersive ratios for constrained and resonant dissipative structures in a shear layer of viscous-elastic filtration at the edge of a slug of water-oil displacement are given. The redistribution results for the averaged inflow profile of viscous Newtonian filtration into asymmetrical energy-stable stress-deformation status inside the saturated porous media at various constraints: in conditions of enclosed or capillary-clamped boundary and in non-constrained conditions – at the frontier of displacement or with stimulation of water-flood displacement in zones of stagnation is presented.

Key words: system analysis, geo-information, geophysical studies, seismic emission, rock stress, petrophysics, geomonitoring, Navier-Stokes equations, hydrodynamics, filtration, longitudinal, transverse waves, diffusion, non-linear effect, dislocation, viscous elasticity, relaxation, finite velocity.

Paper received 20/XI/2013.

Paper accepted 20/XI/2013.

⁵Astafiev Vladimir Ivanovich (vlast@ssu.samara.ru), the Dept. of Theoretical Mechanics Samara State Aerospace University, Samara, 443086, Russian Federation.

⁶Kakhidze Mariya Gievna (KakhidzeMG@samnipineft.ru), the Dept. of Introduction of New Technology and Engineering of Production, SamaraNIPIneft, Samara, 443010, Samara.

⁷Popkov Vyacheslav Ivanovich (PopkovVI@samnipineft.ru), the Dept. of High-Viscosity Oil and Natural Bitumen, SamaraNIPIneft, Samara, 443010, Russian Federation.

⁸Popkova Alevtina Vyacheslavovna (PopkovaAV@samnipineft.ru), the Dept. of Petrophysics, SamaraNIPIneft, Samara, 443010, Russian Federation