

*На правах рукописи*



**РАСПОПОВ Роман Владимирович**

**РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ОЦЕНОК ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
НЕФТЕНОСНОГО КОЛЛЕКТОРА В ТЕХНОЛОГИЯХ ГРУППОВОГО  
ГИДРОПРОСЛУШИВАНИЯ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень – 2015

Работа выполнена на кафедре кибернетических систем  
ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Соловьев Илья Георгиевич**

Официальные оппоненты: **Костюченко Сергей Владимирович**,  
доктор технических наук, ООО «Тюменский  
нефтяной научный центр», старший эксперт

**Толпаев Владимир Александрович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, ОАО «Северо-Кавказский  
научно-исследовательский проектный  
институт природных газов», заведующий  
лабораторией подземной гидродинамики

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Томский государственный  
университет систем управления и  
радиоэлектроники», г. Томск

Защита состоится 28 апреля 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного  
совета Д 212.274.14 при ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный  
университет» по адресу 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15А, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО  
«Тюменский государственный университет» <http://d21227414.utmn.ru/alltransdef>.

Автореферат разослан «            » марта 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Е.А. Оленников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Современные принципы проектирования разработки нефтяных месторождений предполагают обязательное создание и сопровождение постоянно действующих геолого-технологических моделей (ПДГТМ) как на этапе проектирования разработки месторождения, так и в процессе эксплуатации скважин.

Наряду с разработкой программных средств, применяемых на производстве (таких как Eclipse, Petrel, IRAP RMS, Tempest, Техсхема, DV-Geo, Gocad, CMG и другие), развиваются алгоритмы и теоретические подходы к моделированию разработки месторождений:

- большой вклад в развитие теории фильтрации и подземной гидромеханики внесли В.Н. Щелкачев, Б.Б. Лапук, И.А. Чарный, К.С. Басниев, Ю.П. Желтов, Г.Б. Пыхачев, В.М. Ентов, А.П. Телков, М.Л. Карнаухов;
- научные основы разработки нефтяных месторождений совершенствовались под влиянием А.П. Крылова, Р.И. Медведского, И.Т. Мищенко, В.Д. Лысенко, В.И. Грайфера, Г.И. Баренблатта, А.Х. Мирзанджанзаде, Р.Д. Каневской, С.И. Грачева, К. Aziz, L. Durllofsky;
- теория и методы решения обратных задач гидродинамики развивались в работах С.Н. Бузинова, И.Д. Умрихина, Л.Г. Кульпина, М.М. Хасанова, А.В. Стрекалова, В.А. Краснова, Р.Х. Муслимова, В.С. Евченко, И.Г. Соловьева, Ю.А. Ведерниковой, R.N. Horne, R.E. Kalman, G. Naevdal, J.D. Jansen, J.F.M. Doren, S.I. Aanonsen, A.C. Reynolds, P. Sarma и др.

Абсолютное большинство авторов придерживается концепции замкнутого управления на основе ПДГТМ. Однако существует проблема большой размерности моделей, так как количество восстанавливаемых параметров может составлять миллионы (учитывая пространственную детализацию модели и количество переменных). Очевидно, что промысловые данные не в состоянии обеспечить устойчивое определение такого числа параметров.

Путь к повышению достоверности результатов моделирования и прогнозов лежит через сокращение размерности моделей и как следствие их пространственной и временной локализации. При таком подходе размерность моделей максимально согласуется с объемом изначально доступных данных (информативностью), что ведет к повышению надежности результатов параметрического оценивания.

Одним из методов гидродинамических исследований локальных участков нефтеносных коллекторов (ЛУНК) является метод группового гидропрослушивания, который заключается в изменении режима работы возмущающей скважины (включение, выключение или изменение дебита/нагнетания) и наблюдении отклика (изменения давления) в группе соседних реагирующих скважин.

Однако данный метод обладает рядом ограничений, которые затрудняют его использование в режиме текущей эксплуатации. Во-первых, это специальный вид возмущающего воздействия – скачкообразное изменение

дебита в возмущающей скважине, что влечет за собой экономические потери, связанные с выводом скважины из режима текущей эксплуатации. Во-вторых, необходимо создать стационарные краевые условия, т.е. стабилизировать режимы работы всех скважин, находящихся в исследуемой области, и обеспечить невозмущенность краевых условий во время проведения испытаний. На практике реализовать данное требование оказывается довольно сложно.

Предлагаемый подход локального анализа с идентификацией параметров порождающих уравнений снимает указанные ограничения и при достаточной информативности данных позволяет оценить фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) межскважинного пространства ЛУНК.

#### **Цель исследования**

Разработка численного метода, алгоритмов и программ обработки данных с учетом натурных измерений для устойчивого оценивания ФЕС локальных участков нефтеносных коллекторов.

#### **Задачи исследования**

1. Обоснование использования моделей минимальной размерности для математического описания гидродинамики участков нефтеносных коллекторов.

2. Разработка алгоритма контроля среднезонального давления по данным о забойных давлениях и дебитах скважин.

3. Разработка численного метода повышения устойчивости оценок за счет редукции модели на основе образов симметрии анизотропии ФЕС.

4. Разработка программного комплекса для идентификации параметров моделей ЛУНК и тестирования результатов оценивания в условиях действия случайных возмущений.

**Объектом исследования** являются гидродинамические модели локальных участков нефтеносных коллекторов, дренируемых регулярной сеткой скважин.

**Предметом исследования** являются методы редуцирования конечномерных моделей гидродинамики ЛУНК и правила устойчивого оценивания их параметров.

**Методы исследования.** При проведении исследования использовались методы математического моделирования, линейной алгебры и вычислительного анализа. Для проектирования и реализации программного комплекса применялись методы системного анализа, функционального и объектно-ориентированного программирования.

**На защиту выносятся** следующие результаты, соответствующие трём пунктам паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по техническим наукам:

*Пункт 4: Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента:*

1. Алгоритм, вычислительная схема и инструментальная среда редуцирования гидродинамики коллектора с детальной сеткой конечных элементов до модели минимального порядка с точным совпадением среднезональных давлений в статике. Схема дооснащения минимальной модели зонами малого окаймления скважин, обеспечивающая воспроизведение наблюдаемой динамики давления в забое с приемлемой точностью.

*Пункт 6: Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента:*

2. Численный метод регуляризации МНК-оценок параметров центральной зоны участка на основе комбинаторного перебора геометрических образов симметрий модели минимального порядка с последовательным снижением показателя обусловленности и огрублением результата. А также зависимость показателей корректности решения обратной задачи группового гидропрослушивания центральной зоны участка от факторов темпоральной различимости динамики зон окаймления и степени информативности сигналов возмущений скважин центральной и периферийных зон окаймления.

*Пункт 7: Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели:*

3. Алгоритм, вычислительная процедура и инструментальные средства адаптивного наблюдения среднезональных давлений модели минимального порядка по контролю переменных состояния забоя скважин на основе темпоральной декомпозиции динамики малых и центральных зон осреднения. Разработанный программный комплекс «СимЛУНК» внесен в Реестр программ для ЭВМ (№ 2013615691).

Таким образом, в соответствии с формулой специальности 05.13.18 в диссертации представлены оригинальные результаты одновременно из трех областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

**Научная новизна** полученных результатов по трем областям специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ – отражена в следующем:

*В области математического моделирования*

– Обоснованы пространственные образы и структурно-параметрическое описание гидродинамической модели локального участка коллектора минимального порядка с зонально-темпоральной динамикой притока, как главный инструмент регуляризации решений обратных задач. Разработан соответствующий алгоритм редуцированных преобразований.

*В области численных методов*

– Численный метод ортогонального МНК-оценивания, реализованного по схеме ведущего элемента с контролем информативности выборки данных, распространен на задачу идентификации гидродинамических

параметров участка коллектора с последовательным перебором пространственных симметрий модели минимального порядка.

*В области создания и реализации комплексов программ*

– Спроектирован и реализован в среде LabVIEW программный комплекс для идентификации гидродинамических параметров моделей локальных участков нефтеносных коллекторов по данным натурных измерений забойных давлений и дебитов скважин и для тестирования результатов оценивания в условиях действия случайных возмущений.

**Практическая значимость работы.** Разработанные по результатам исследования алгоритмы и программы ориентированы на применение в системах контроля и управления режимом работы локальных участков нефтеносных коллекторов посредством скважин, оснащенных погружной телеметрией. Предложенные модели и методы предназначены для оценки фильтрационных свойств межскважинного пространства на основе данных текущей эксплуатации скважин, включая данные натурных измерений, получаемые во время производственных ситуаций и геолого-технических мероприятий (ГТМ).

**Достоверность результатов,** содержащихся в диссертационном исследовании, определяется корректным использованием математических методов, выводом утверждений и доказательств. Для решения поставленных задач использовался метод математического моделирования на основе фундаментальных законов упругой фильтрации и закона сохранения объемов и масс. Алгоритмы тестировались на зашумленных данных в ходе многочисленных вычислительных экспериментов, а также на данных исследования по гидропрослушиванию межскважинного пространства пласта Спорышевского месторождения.

**Реализация результатов.** Вычислительные схемы и алгоритмы моделирования и идентификации гидродинамических процессов в локальных участках нефтеносных коллекторов реализованы на графическом языке G в среде программирования LabVIEW. Разработанные инструменты визуально-графического анализа, позволяющие как проводить вычислительные эксперименты, так и обрабатывать данные натурных измерений, могут быть использованы как основа лабораторного практикума в учебном процессе по курсу «Идентификация и диагностика систем».

#### **Апробация научных положений и результатов работы**

Основные положения и результаты работы были доложены на следующих конференциях: III Международная научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании» (Тюмень, 2008 г.); IV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2010 г.); 3-я Российская Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2010), 6-я научная конференция «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010) (С.-Петербург, 2010 г.); V Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2011

г.); XV Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященный 110-летию со дня основания горно-геологического образования в Сибири (Томск, 2011 г.); V научно-техническая конференция «Современные технологии для ТЭК Западной Сибири» (Тюмень, 2011 г.); Международная научно-техническая конференция «Нефть и газ Западной Сибири» (Тюмень, 2011 г.); Региональная научно-техническая конференция «Компьютерное моделирование и системный анализ в нефтегазовой отрасли и образовании» (Тюмень, 2011 г.); VI Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2012 г.); V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании» (Тюмень, 2012 г.); VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Геология и нефтегазоносность Западно-сибирского мегабассейна (опыт, инновации)» (Тюмень, 2012 г.); VIII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2014 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в т. ч. 6 в журналах из перечня ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ, получено авторское свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615691.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение, список принятых сокращений, список условных обозначений, библиографический список из 105 наименований и приложение. Содержание работы изложено на 144 страницах, включает 60 рисунков и 14 таблиц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** рассмотрены современные подходы к моделированию и идентификации нефтеносных коллекторов, информационная обеспеченность процессов нефтедобычи за счет обустройства скважин системами погружной телеметрии и особенности метода группового гидропрослушивания, ограничивающие его применение в системах диспетчерского контроля (стационарность краевых условий и стандартные виды возмущений).

Локальный подход к анализу гидродинамики, применяемый в данной работе, основан на следующих принципах:

- вместо рассмотрения модели целого месторождения выделяются локальные участки нефтеносных коллекторов (ЛУНК) минимальной размерности (к каждой скважине участка приурочена одна зона);

- анализ проводится на периодах времени значительно меньших по сравнению с периодами выработки целого месторождения и ограниченных динамикой переходных процессов по давлению в локальных участках;
- ставится задача контроля локальных свойств гидродинамической связности и анизотропии ФЕС без необходимости контроля вытеснения нефтенасыщенного флюида и выявления застойных зон.

Достижения в области высокоинформативных технологий нефтедобычи, именуемые в научной литературе «Intelligent Well» или «Smart Well», на основе стандартного обустройства скважин системами погружной телеметрии создают предпосылки для использования постоянно накапливаемых глубинных измерений с целью адаптации локальных гидродинамических моделей коллекторов. Это позволяет исключить необходимость проведения специализированных дорогостоящих испытаний, связанных с выводом скважин из режима текущей эксплуатации. Предлагаемый в данной работе подход к исследованию гидродинамических процессов в ЛУНК наиболее близок к методу группового гидропрослушивания пластов и направлен на его развитие.

**Во второй главе** рассмотрены принципы моделирования гидродинамики локальных участков нефтеносных коллекторов.

В данном исследовании приняты *допущения*, широко используемые в практике гидродинамического моделирования: постоянство пористости, проницаемости, вязкости и сжимаемости; малая сжимаемость жидкости; поток жидкости является однородным; температурным фактором можно пренебречь.

С учетом допущений исходная математическая модель гидродинамики ЛУНК записывается в виде системы *уравнений объёмных балансов*:

$$(m\beta_{жс} + \beta_n)V_i \frac{dp_i}{dt} = \sum_j w_{ij}(p_j - p_i) - q_i \quad \text{или} \quad \tau_i \frac{dp_i}{dt} = \sum_j q_{ij} - q_i. \quad (1)$$

При этом геометрическое представление модели имеет минимальный уровень сложности, т. к. каждой скважине, приурочена одна зона (рисунок 1). А в качестве краевых условий задается давление на границе ЛУНК  $p(\Gamma, t) = p_{kn}$ .

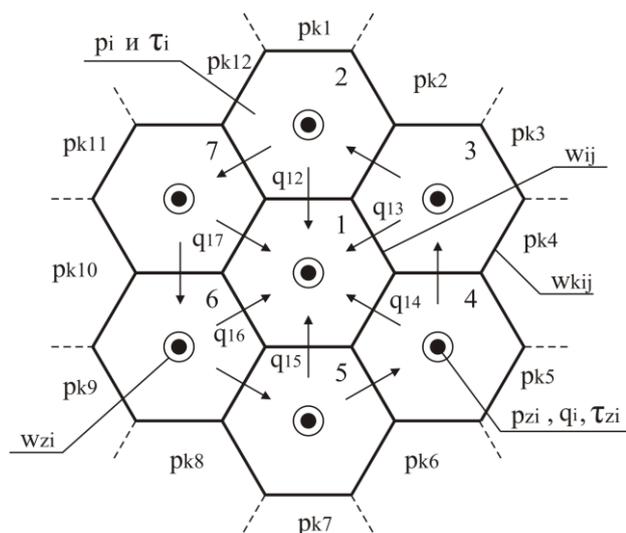


Рисунок 1. Геометрический образ 7-зонной модели ЛУНК

Обозначения:  $i=1..7$  – номера зон (скважин);  $p_i$  – среднезональное давление в  $i$ -й зоне;  $p_{zi}$  – давление в забое  $i$ -й скважины;  $p_{kn}$  – краевое давление на контуре ЛУНК в  $n$ -й условной зоне;  $q_i$  – объемный приток (нагнетание) в забой  $i$ -й скважины;  $q_{ij} = -q_{ji}$  – перетоки между  $j$ -й и  $i$ -й зонами;  $\tau_i = \beta^*V_i$  – гидроупругий объем  $i$ -й зоны с коэффициентом упругости  $\beta^*$ ;  $V_i$  – геометрический объем  $i$ -й зоны;

$\tau_{zi} = S_i / \gamma_i$  – динамический параметр, характеризующий скорость наполнения полости скважины и имеющий размерность гидроупругого объема;  $S_i$  – площадь сечения  $i$ -й скважины;  $\gamma_i$  – удельный вес флюида;  $w_{zi}$  – гидропроводность перехода «забой-зона»;  $w_{ij} = w_{ji}$  – гидропроводность межзонного перехода (между  $i$ -й и  $j$ -й зонами).

Предельно огрубленное описание гидродинамики ЛУНК (рисунок 1) имеет целью привести уровень сложности конечномерной модели в соответствие с объемом имеющихся данных натуральных измерений. Такое описание, с одной стороны, является полным, т. к. используются данные измерений со всех скважин, расположенных на локальном участке, а с другой – оно является минимальным, следовательно наиболее устойчивым к ошибкам при решении обратных задач. Такие модели ориентированы не на получение максимально точного решения с учетом всевозможных факторов, а на решение практических задач с применением методов теории управления.

Анализ изначально детальных моделей, в которых каждая зона представлена набором трапецеидальных конечных элементов (рисунок 2), и их приведение (редуцирование) к виду (1) путем площадного осреднения давления  $\bar{p} = E_1 \tilde{p}$  (где  $\tilde{p}$  – полный вектор переменных давлений детальной модели,  $\bar{p}$  – вектор переменных осредненного давления в зонах) по правилу

$$E_1 = S_{\Sigma}^{-1} \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & s_{21} & s_{22} & s_{23} & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & s_{71} & s_{72} & s_{73} & \dots & \dots \end{bmatrix}, \text{ где } \begin{cases} S_{\Sigma} = \text{diag}[S_{\Sigma 1} \dots S_{\Sigma 7}] \\ S_{\Sigma i} = \sum_{j=1}^n s_{ij} \end{cases},$$

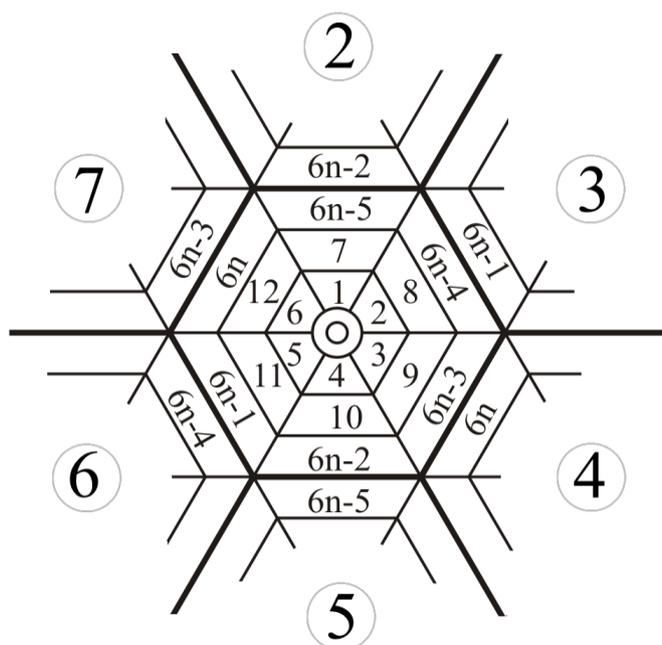


Рисунок 2. Сетка конечных элементов детальной модели

показало, что полученные огрубленные модели точно воспроизводят поведение детальных моделей в статике, но дают заметное (до 15%) отклонение в переходных режимах за счет предельного сокращения динамического порядка модели.

Грубая модель (1), содержащая медленную динамику удаленных зон пласта (УЗП), была дополнена динамикой скважин и кольцевыми элементами, отвечающими за динамику призабойной области пласта (ПЗП) вокруг скважин. В результате удалось получить поведение грубой модели, отличающееся от

поведения детальной в переходных режимах не более чем на 5% (рисунок 3).

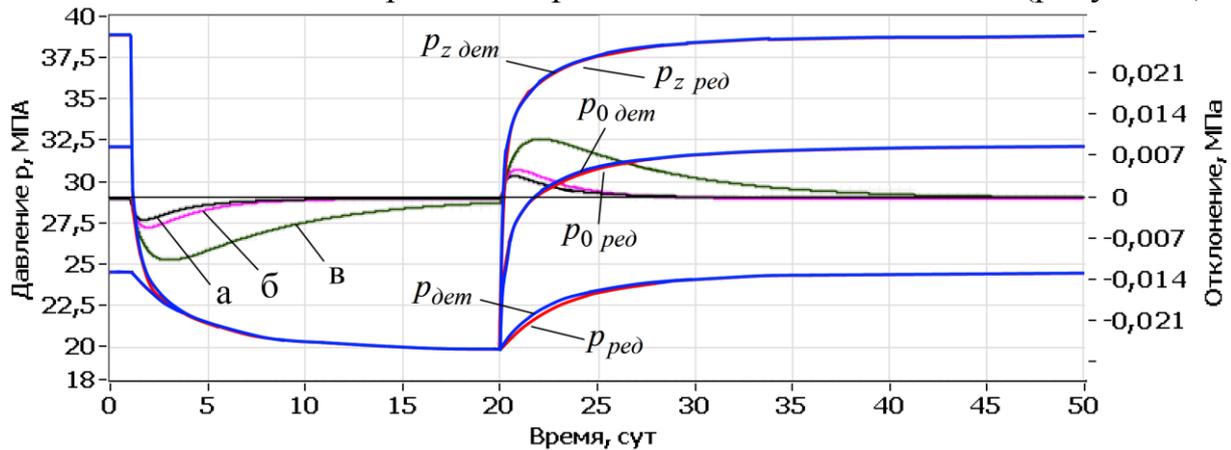


Рисунок 3. Типовые графики переходных процессов в центральной зоне детальной (*det*) и редуцированной (*red*) моделей. Отклонения переменных: а)  $(p_{z\ det} - p_{z\ red})$ , б)  $(p_{0\ det} - p_{0\ red})$ , в)  $(p_{det} - p_{red})$ .

На основе сравнения поведения грубой модели и детальной, аппроксимирующей исходную распределенную модель, обосновано использование грубых моделей для описания гидродинамики ЛУНК.

**В третьей главе** рассмотрены правила идентификации моделей ЛУНК и численный метод повышения устойчивости оценивания.

Ставится задача определения гидродинамических параметров центральной зоны участка, описываемой уравнением

$$\tau_1 \dot{p}_1(t) = w_{12}(p_2(t) - p_1(t)) + \dots + w_{17}(p_7(t) - p_1(t)) - q_1(t), \quad (2)$$

где  $q_i(t)$  – объемный расход жидкости ( $q > 0$  – добыча,  $q < 0$  – нагнетание).

Алгоритм идентификации основан на методе наименьших квадратов (МНК) и моделях, приводимых к регрессионному виду

$$y(t_k) = \mathbf{c}^T \mathbf{v}(t_k) + \xi(t_k), \quad J = \sum_{k=1}^N \lambda(t_k) (y(t_k) - \hat{y}(t_k))^2 \rightarrow \min_{\hat{\mathbf{c}}},$$

где  $t_k$  – параметр дискретного времени;  $y(t_k)$  – выходная (зависимая) переменная;  $\mathbf{v}(t_k)$  – вектор регрессоров (независимых переменных);  $\mathbf{c}$  – вектор оцениваемых параметров;  $\xi(t_k)$  – случайная величина с нулевым средним.

Для оценки точности и надежности результатов оценивания используются следующие показатели:

- ошибка по параметрам  $\delta c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{c}_i - c_i}{c_i} \right| \cdot 100\%$ , где  $c_i$  – истинные значения параметров;  $\hat{c}_i$  – оценки параметров;  $n$  – длина вектора параметров;

- невязка по выходу  $\delta y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y(k) - \mathbf{c}^T \mathbf{x}(k))^2}$ , где  $y(k)$  – измеренные значения выходной переменной;  $\mathbf{x}(k)$  – векторы регрессионных переменных;  $k$  – номер измерения;  $N$  – число измерений;

- число обусловленности  $cond = s_{\max} / s_{\min}$ , где  $s_{\max}$ ,  $s_{\min}$  – максимальное и минимальное сингулярные собственные числа матрицы обратной задачи, составленной из входных данных измерений.

Вычислительные эксперименты показали, что идентификация параметров модели (2) в значительной степени зависит от информативности возмущений скважин исследуемого участка и не всегда возможна из-за плохой обусловленности задачи даже при решении на таких грубых моделях.

Одним из инструментов контроля обусловленности обратной задачи выступает процедура ортогонализации Грама-Шмидта с формированием ортогонального базиса из векторов-регрессоров по методу ведущего элемента.

Модель (2), записанная в регрессионной форме

$$\mathbf{y} = w_{12}\mathbf{x}_2 + w_{13}\mathbf{x}_3 + \dots + w_{1n}\mathbf{x}_n + \xi, \quad \mathbf{y} = \mathbf{q}_1 + \tau_1 \dot{\mathbf{p}}_1 + \xi_y, \quad \mathbf{x}_i = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_1,$$

после ортогонализации по методу Грама-Шмидта приводится к виду

$$\mathbf{y} = a_{i_1} \mathbf{z}_{i_1} + a_{i_2} \mathbf{z}_{i_2} + \dots + a_{i_n} \mathbf{z}_{i_n} + \xi, \quad \text{где } \mathbf{z}_i^T \mathbf{z}_j = 0 \text{ для } \forall i \neq j.$$

Последовательность ортогональных векторов  $\mathbf{z}_{i_k}$ ,  $k = \overline{1, n}$ , формируемая по методу ведущего элемента, энергетически оптимальна, если выполнено

$$\rho(k) = \left\| \mathbf{y} - \alpha_{i_1} \mathbf{z}_{i_1} - \dots - \alpha_{i_k} \mathbf{z}_{i_k} \right\|^2 \rightarrow \min_{i_k \in I(k)},$$

где  $I(k) = I(k-1) \setminus i_{k-1}$ , т. е.  $I(1) = \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $I(2) = I(1) \setminus i_1$  и т. д. На каждом шаге процедуры остаточная энергия компонент базиса минимальна.

Величина  $\rho(i_k) \leq \varepsilon_\rho \|\mathbf{y}\|^2$  является признаком информативности выборки и определяет на основании заданного порогового значения  $\varepsilon_\rho$  шаг останова ортогонализации и тем самым количество векторов, доступных для определения на имеющейся выборке данных.

Поставленная задача определения ФЕС межскважинного пространства оперирует осредненными переменными, которые недоступны для измерения. Для их восстановления применяется техника контроля среднезонального давления по данным о забойных давлениях и дебитах скважин. Модель минимальной размерности, учитывающая динамику скважин, ПЗП и УЗП (рисунок 4), описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \tau_{zi} \dot{p}_{zi} = w_{zi}(p_{0i} - p_{zi}) - q_i \\ \tau_{0i} \dot{p}_{0i} = -w_{zi}(p_{0i} - p_{zi}) + w_{0i}(p_i - p_{0i}), \\ \tau_i \dot{p}_i = -w_{0i}(p_i - p_{0i}) + \sum w_{ij}(p_j - p_i) \end{cases}$$

где  $i = \overline{1..7}$  – номера зон участка;  $\tau_{zi}$ ,  $\tau_{0i}$ ,  $\tau_i$  – гидроупругие объемы скважин, ПЗП и УЗП;  $p_{zi}$ ,  $p_{0i}$ ,  $p_i$  – соответствующие им давления;  $w_{ij}$  – гидропроводности границ областей;  $q_i$  – дебиты скважин;  $p_{ki}$  – краевое давление на границе  $i$ -й зоны;  $w_{ki}$  – гидропроводность перехода между  $i$ -й зоной и законтурной областью.

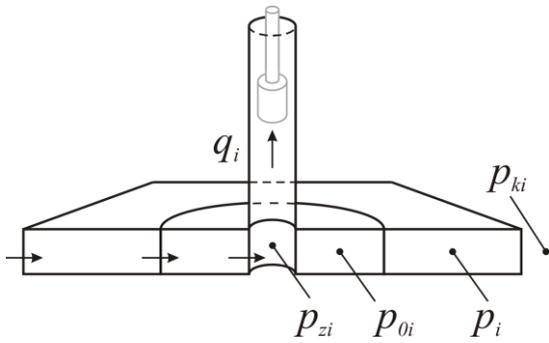


Рисунок 4. Схема модели «скважина-пласт»

На коротком интервале времени, когда состояния среднезональных давлений  $p_i$  могут считаться квазистатическими, производится идентификация параметров быстрой динамики

$$p_{zi} = (1 - \mu_{zi})p_i - r_{zi}q'_i + \mu_{zi}p''_{zi},$$

где  $p'_{zi} = p_{zi}/(T_{zi}D + 1)$ ,  $p''_{zi} = p'_{zi}/(T_{0i}D + 1)$ ,

$$q'_i = \frac{q_i}{(T_{zi}D + 1)}, \quad T_{zi} = \frac{\tau_{zi}}{w_{zi}}, \quad T_{0i} = \frac{\tau_{0i}}{w_{0i} + w_{zi}},$$

после чего восстанавливаются осредненные переменные на всем периоде исследования

$$\tilde{p}_i = \frac{p_{zi} + \hat{r}_{zi}q'_i - \hat{\mu}_{zi}p''_{zi}}{1 - \mu_{zi}}, \quad \tilde{p}_{0i} = \frac{p_{zi} + r_{zi}\tilde{q}_i}{(T_{0i}D + 1)}, \quad \tilde{q}_{0i} = w_{0i}(\tilde{p}_1 - \tilde{p}_{0i}),$$

и исходная модель (2) принимает вид  $\tilde{q}_{0i} = w_{12}\tilde{x}_2 + \dots + w_{17}\tilde{x}_7 - \tau_1\tilde{p}_1$ , где  $\tilde{x}_i = \tilde{p}_i - \tilde{p}_1$ . Постоянные времени  $T_{zi}$  и  $T_{0i}$  в фильтрах необязательно должны задаваться точно, т. к. темпоральное различие быстрых динамических процессов в скважине и ПЗП и медленных в УЗП велико, вследствие этого ошибка в  $T_{zi}$  и  $T_{0i}$  незначительно влияет на восстановление  $\tilde{p}_i$ .

Как было отмечено, организация высокоинформативного эксперимента с возмущением нескольких скважин зачастую невозможна ввиду его дороговизны и длительности необходимого исследования. Отсюда вытекает задача определения параметров модели по малому набору возмущений, когда оценивание всех параметров модели невозможно. Решение предлагается искать на пути сокращения порядка модели (редуцирования) за счет априорной информации, например, путем учета предполагаемой симметрии анизотропии фильтрационных свойств участка коллектора. В таблице 1 представлены возможные варианты пространственной ориентации симметрии и соответствующие связи параметров  $w_{li}$ .

Таблица 1 – Возможные симметрии ФЕС идентифицируемого участка

	Изолинии равных свойств	Условия симметрии		Изолинии равных свойств	Условия симметрии		Изолинии равных свойств	Условия симметрии
А		$w_{12}$ $w_{13} = w_{17}$ $w_{14} = w_{16}$ $w_{15}$	Б		$w_{12} = w_{13}$ $w_{14} = w_{17}$ $w_{15} = w_{16}$	В		$w_{13}$ $w_{12} = w_{14}$ $w_{15} = w_{17}$ $w_{16}$
Г		$w_{13} = w_{14}$ $w_{12} = w_{15}$ $w_{16} = w_{17}$	Д		$w_{14}$ $w_{13} = w_{15}$ $w_{12} = w_{16}$ $w_{17}$	Е		$w_{12} = w_{17}$ $w_{13} = w_{16}$ $w_{14} = w_{15}$

В соответствии со степенью редукции вводятся классы моделей: *полосообразная* (симметрия А, остальные (Б-Е) формируются аналогично)

$$\tilde{y} = w_{12}\tilde{x}_2 + \frac{1}{2}w_{137}(\tilde{x}_3 + \tilde{x}_7) + \frac{1}{2}w_{146}(\tilde{x}_4 + \tilde{x}_6) + w_{15}\tilde{x}_5,$$

*линейная*: 
$$\tilde{y} = w \cdot \sum_{i=2}^7 \tilde{x}_i + \delta w(2\tilde{x}_2 + \tilde{x}_3 + \tilde{x}_7 - \tilde{x}_4 - \tilde{x}_6 - 2\tilde{x}_5),$$

*бинарная*: 
$$\tilde{y} = \frac{1}{3}w_1(\tilde{x}_{j4} + \tilde{x}_{j5} + \tilde{x}_{j6}) + \frac{1}{3}w_{m1}(\tilde{x}_{j1} + \tilde{x}_{j2} + \tilde{x}_{j3} - \tilde{x}_{j4} - \tilde{x}_{j5} - \tilde{x}_{j6}),$$

*базовая*: 
$$\tilde{y} = \frac{w_{1\Sigma}}{6}(\tilde{x}_2 + \tilde{x}_3 + \tilde{x}_4 + \tilde{x}_5 + \tilde{x}_6 + \tilde{x}_7) + \Delta y.$$

Процедура редукции и перебора возможных симметрий повышает надежность оценивания не только за счет снижения количества идентифицируемых параметров модели, но и за счет сравнения результатов идентификации на ортогональных симметриях. Например, на рисунке 5 приведены графики невязки при идентификации и восстановлении поведения *полосообразной* и *линейной* моделей с перебором вариантов ориентации симметрии анизотропных свойств (ортогональными друг другу являются пары симметрий 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6).

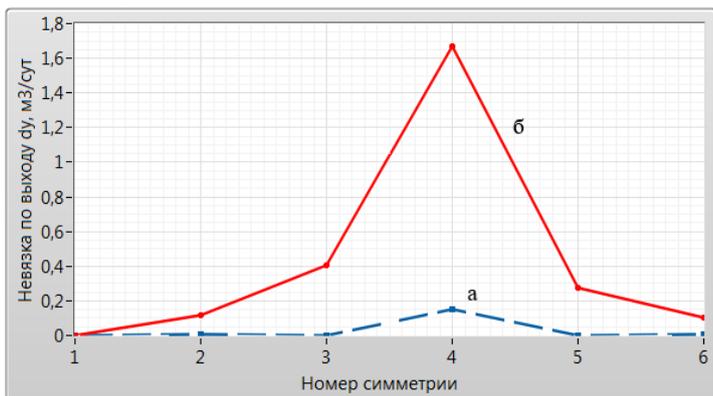


Рисунок 5. Невязка по выходу  $\delta y$  при переборе вариантов симметрий *полосообразной* (а) и *линейной* (б) моделей

$\delta y_i$  – невязка для  $i$ -й симметрии;  $\delta y_{opt.i}$  – невязка для симметрии ортогональной к  $i$ -й. Предложенный критерий сравнения невязок делает выбор правильной симметрии более надежным.

Полный алгоритм идентификации гидродинамической модели ЛУНК по данным глубинного состояния скважин (рисунок б) отражает все рассмотренные этапы решения поставленной обратной задачи.

Среди факторов, влияющих на точность и надежность идентификации гидродинамических параметров модели, значимыми являются:

- информативность возмущения скважин;
- точность идентификации параметров быстрой динамики скважин;
- различие динамических свойств зон локального участка.

На графиках видно, что при определении правильной (№1) симметрии (ошибки по выходу и по параметрам минимальны) для ее ортогональной симметрии (№4) эти ошибки будут максимальными. То есть выбор правильной симметрии производится по максимальному отношению невязок

$$i_{sim} = \arg \max \left( \frac{\delta y_{opt.i}}{\delta y_i} \right), \text{ где } i_{sim} -$$

номер правильной симметрии;

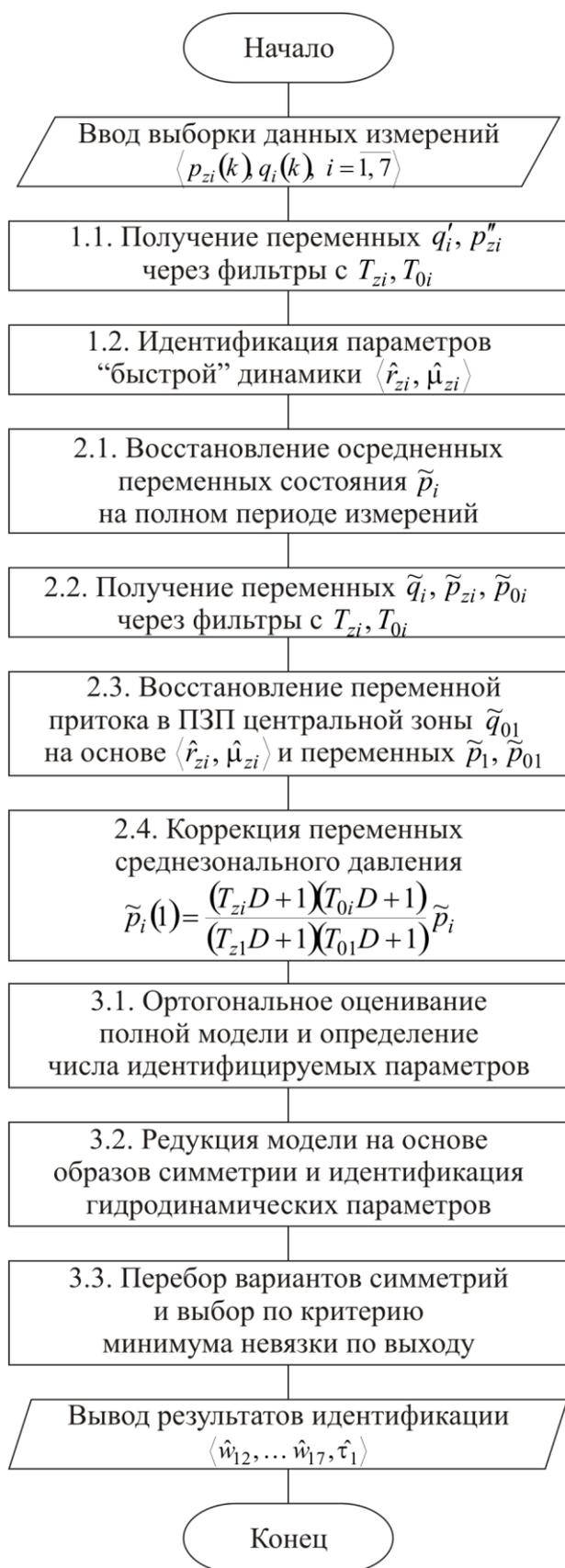


Рисунок 6. Алгоритм идентификации гидродинамической модели ЛУНК

которые являются высокоинформативными для выбранных классов моделей различие динамических свойств зон не улучшает указанных показателей.

На примере характерных вычислительных экспериментов с заданием случайного шума в измерениях (амплитуда  $\xi$  шума задавалась в процентах от амплитуды вариации каждого вектора давления и изменялась от 0 до 1%; шум интерполировался сплайном с периодом 0,5 суток) было показано, как информативность выборки (количество возмущенных скважин – от одной до семи) влияет на точность идентификации *полной* модели, снижая ошибку по параметрам  $\delta\epsilon$  с 500% до 10%, и уменьшая число обусловленности с  $1 \cdot 10^8$  до  $3 \cdot 10^2$ .

Было выявлено, что величина  $\delta\epsilon$  почти линейно зависит от ошибки идентификации по параметрам быстрой динамики  $\delta\epsilon_z$ , которая в свою очередь подвержена влиянию ширины интервала оценивания (на большом интервале измерений осредненное давление в зоне не может считаться квазистатичным, что вносит погрешность в оценки) и ошибок при выборе постоянных времени фильтров  $T_{zi}$  и  $T_{0i}$  для восстановления осредненных переменных.

Анализ влияния различия динамических свойств зон ЛУНК, задаваемого выражением

$$\Delta T = \frac{\max(T_i) - \min(T_i)}{\min(T_i)} \cdot 100\%,$$

показал, что при варьировании диапазона  $\Delta T$  от 0 до 100% величина  $\delta\epsilon$  отчетливо фиксирует повышение точности оценивания и улучшение обусловленности задачи на выборках с недостаточной информативностью возмущений. При этом на выборках,

В четвертой главе описаны результаты апробации разработанного алгоритма на данных исследования по гидропрослушиванию межскважинного пространства локального участка Спорышевского месторождения, пласт БС<sub>10</sub><sup>0</sup>.

С помощью разработанного адаптивного наблюдателя по данным о забойных давлениях и дебитах скважин были восстановлены среднезональные давления (рис. 7, а). Результат процедуры ортогонализации (рис. 7, б) подтвердил плохую обусловленность матрицы обратной задачи для *полной* модели ( $cond = 2,75 \cdot 10^5$ ) из-за малой информативности данных (возмущалась только одна зона) и показал, что надежно определяются только два параметра.

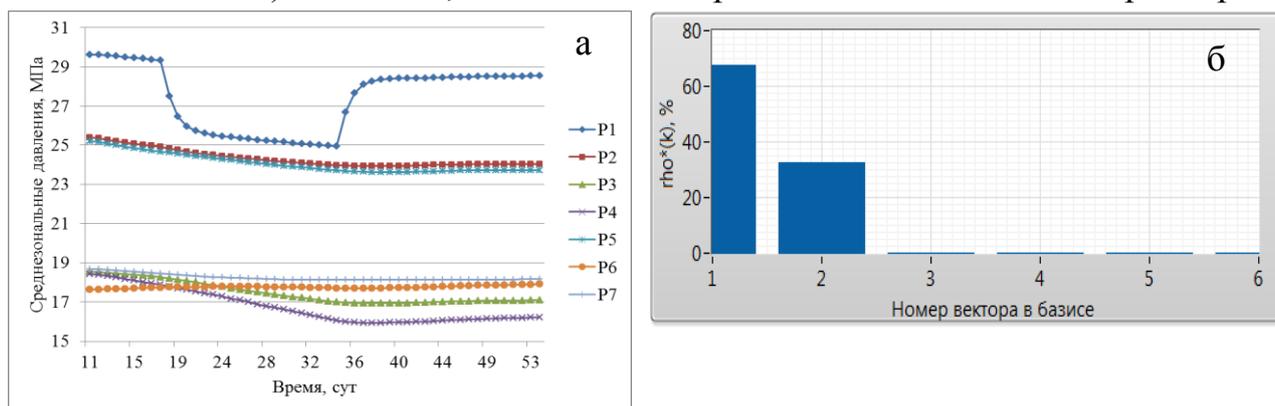


Рисунок 7. Среднезональные давления (а) и результат ортогонализации (б)

Надежно оцениваемыми оказались модели с двумя параметрами: *линейная*, *бинарная* и *базовая*, однако перебор симметрий не позволил надежно выявить результат, и ответ был дан в виде суммарной гидропроводности центральной зоны  $w_{1\Sigma} = 19,375 \text{ м}^3/(\text{МПа}\cdot\text{сут})$ , как наиболее надежный ответ.

По полученным оценкам была сделана попытка интерпретации параметров в геологические свойства пласта: гидропроводность  $\varepsilon_i$  и упругоёмкость  $\beta_1^*$ . По данным отчета о гидропрослушивании вычислены оценки проницаемости в выделенных зонах ЛУНК  $k_i = \varepsilon_i \mu_i / h_i$  (таблица 2).

Таблица 2 – Данные о свойствах пласта и оценки проницаемости

№ зоны модели, $i$	Вязкость $\mu_i$ , Па·с	Мощность пласта, м	Проницаемость $k_i$ , мД	
			Отчетные	Вычисленные
1	0,00047	2,38	25,12	23,25
2	0,00047	1,02	19,35	17,89
3	0,00157	3,3	16,4	18,34
4	0,00157	1,1	нет данных	52,44
5	0,00047	1,035	20,73	17,54
6	0,00157	3	19,13	20,56
7	0,00157	4,8	14,38	12,76

Вычисленные величины проницаемости зон локального участка сопоставимы со значениями из имеющегося отчета, что свидетельствует о корректной работе предложенного алгоритма оценивания фильтрационных свойств ЛУНК на основе редуцирования модели для приведения ее порядка в соответствие с уровнем информативности имеющейся выборки измерений.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обосновано использование грубых моделей для описания гидродинамики локальных участков нефтеносных коллекторов. Предложенная трехтемповая модель показывает близкое совпадение с поведением детальной модели, аппроксимирующей конечными элементами исходную распределенную модель межскважинной пористой среды, с точностью в динамике в пределах 5%.

2. Предлагаемый подход локального анализа с идентификацией параметров порождающих уравнений снимает ограничения на вид возмущающего воздействия и стационарность краевых условий, присущие стандартной методике группового гидропрослушивания.

3. Разработан алгоритм, вычислительная процедура и инструментальные средства адаптивного наблюдения среднезональных давлений модели минимального порядка по контролю переменных состояния забоя скважин на основе темпоральной декомпозиции динамики малых и центральных зон осреднения.

4. Разработан численный метод регуляризации МНК-оценок параметров центральной зоны участка на основе комбинаторного перебора геометрических образов симметрий модели минимального порядка с последовательным снижением показателя обусловленности и округлением результата.

5. Исследована зависимость показателей точности и надежности решения обратной задачи группового гидропрослушивания от факторов:

- информативности возмущений скважин центральной и периферийных зон окаймления;
- точности восстановления переменных среднезонального давления;
- различия динамических свойств зон локального участка коллектора.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Распопов Р.В. Регуляризация оценок параметров нефтяных коллекторов по условиям симметрии / И.Г. Соловьёв, Р.В. Распопов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – М: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2010. – №11. – С. 28-33.

2. Распопов Р.В. Ортогональное редуцирование модели в задаче идентификации фильтрационно-емкостных параметров нефтяных коллекторов / И.Г. Соловьёв, Р.В. Распопов // Математическое моделирование. – М: Академиздатцентр "Наука" РАН, 2011. – Том 23, №2. – С. 96-106.

3. Распопов Р.В. Структурное редуцирование модели нефтяного коллектора по условиям симметрии / Р.В. Распопов, И.Г. Соловьёв // Известия вузов. Нефть и газ. – 2011. – №2. – С. 26-31.

4. Распопов Р.В. Технология контроля среднезонального давления в задаче оценивания фильтрационно-емкостных параметров локальных участков нефтяных коллекторов / Р.В. Распопов, И.Г. Соловьёв // Известия вузов. Горный журнал. – 2011. – №7. – С. 51-56.

5. Распопов Р.В. Технология редукиции пространственно-распределенных моделей локальных участков нефтяных коллекторов / Р.В. Распопов, И.Г. Соловьёв // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – №1. – С. 33-39.

6. Распопов Р.В. Техника зонального редуцирования гидродинамической модели нефтяного коллектора / И.Г. Соловьёв, Р.В. Распопов // Математическое моделирование. – М: Академиздатцентр "Наука" РАН, 2014. – Том 26, №4. – С. 21-32.

#### **Статьи в других изданиях**

7. Распопов Р.В. Особенности идентификации локальных участков нефтяных коллекторов / Р.В. Распопов, И.Г. Соловьёв // Проблемы недропользования: Материалы IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 9-12 февраля 2010 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – С. 142-146.

8. Распопов Р.В. Образцы симметрии фильтрационных свойств как способ повышения устойчивости оценивания параметров нефтяных коллекторов / И.Г. Соловьёв, Р.В. Распопов // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: материалы IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. – С. 59-65.

9. Распопов Р.В. Устойчивое оценивание параметров коллекторов на основе  $v$ -ортогонализации / И.Г. Соловьёв, Р.В. Распопов // Вестник Кибернетики. – Тюмень: ИПОС СО РАН, 2010. – №9. – С. 20-27.

10. Распопов Р.В. Идентификация фильтрационно-емкостных параметров нефтяных коллекторов методом ортогонального редуцирования / И.Г. Соловьёв, Р.В. Распопов // Материалы 6-й научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010). – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С. 79-84.

11. Распопов Р.В. Повышение устойчивости оценок параметров нефтяного коллектора на основе образов симметрии фильтрационных свойств / Р.В. Распопов, И.Г. Соловьёв // Проблемы недропользования: Материалы V Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 8-11 февраля 2011 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – С. 333-340.

12. Распопов Р.В. Технология контроля среднезонального давления по данным динамики состояния скважины / Р.В. Распопов // Проблемы геологии и освоения недр: труды XV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 110-летию со дня основания горно-геологического образования в Сибири. Том II; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 124-126.

13. Распопов Р.В. Контроль среднезонального давления в задаче оценивания фильтрационно-емкостных параметров локальных участков нефтяных коллекторов / Р.В. Распопов // Современ. технологии для ТЭК Западной Сибири: сб. научн. тр. – Тюмень: Типография «Печатник», 2011. – С. 19-23.

14. Распопов Р.В. Технология контроля среднезонального давления в задаче оценивания фильтрационно-емкостных параметров локальных участков нефтяных коллекторов / Р.В. Распопов, И.Г. Соловьёв // Нефть и газ Западной Сибири: материалы Международной научно-технической конференции, Т.1. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – С. 272-277.

15. Распопов Р.В. Инструментальные средства анализа гидродинамики нефтяного коллектора в программной среде LabVIEW / Р.В. Распопов // Компьютерное моделирование и системный анализ в нефтегазовой отрасли и образовании: материалы региональной научно-технической конференции, 29-30 ноября 2011 г. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – С. 86-90.

16. Распопов Р.В. Моделирование и анализ гидродинамики нефтяного коллектора в программной среде LabVIEW / Р.В. Распопов // Проблемы недропользования: материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 8-10 февраля 2012 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2012. – С. 547-552.

17. Распопов Р.В. Оценка точности состояний редуцированных пространственно-распределенных моделей локальных участков нефтяных коллекторов / Р.В. Распопов, И.Г. Соловьёв // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: материалы V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – С. 214-220.

18. Распопов Р.В. Алгоритм редуцирования модели локального участка нефтяного коллектора // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации) – т.1.: Материалы Восьмой Всероссийской научно-технической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – С. 215-218.

19. Распопов Р.В. Метод зонального редуцирования гидродинамической модели нефтяного коллектора / Р.В. Распопов // Проблемы недропользования : материалы VIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 3-6 февраля 2014 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2014. – С. 220-225.

20. Распопов Р.В. Оценка точности состояний редуцированных пространственно-распределенных моделей локальных участков нефтяных коллекторов / Р.В. Распопов // XII Всероссийское совещание по проблемам управления : труды Всероссийского совещания. – Москва: ИПУ РАН, 2014. – С. 3129-3138.

### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ**

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615691. Симулятор локального участка нефтяного коллектора (СимЛУНК) / Р.В. Распопов – Заявка № 2013613562; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 18.06.2013.

Подписано в печать 25.02.2015. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 1,25  
Тираж 100 экз. Заказ № 156

Библиотечно-издательский комплекс  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Тюменский государственный нефтегазовый университет»,  
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса  
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.