

Вх. N 20/17  
от 28.04.2017

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Ахметовой Оксаны Валентиновны**

**«Температурные поля турбулентных и ламинарных течений в скважинах»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

### 1. Актуальность выполненной работы

Диссертационная работа Ахметовой Оксаны Валентиновны посвящена разработке физико-математической модели температурного поля потока жидкости в скважине и продуктивном пласте. Значительное внимание уделено полям давления в неоднородных анизотропных пластах. Не подлежит сомнению, что задачи такого рода составляют теоретическую основу технологии добычи нефти и газа, что свидетельствует об актуальности выбранной темы исследований.

Несмотря на то, что исследование температурных полей и давления широко используется для контроля состояния скважин, теория нестационарного теплообмена при турбулентном режиме течения до сих пор находится в неудовлетворительном состоянии. Теплофизическая часть проблемы турбулентности осложнена тем, что задачи о распределении температуры в скважине при турбулентном режиме течения сводятся к решению задач с двумя переменными коэффициентами. Решение таких задач сопряжено со значительными теоретическими трудностями, и связано с необходимостью развития и создания новых методов и подходов.

Автором диссертационной работы развит метод, позволяющий получать асимптотические решения задач тепло- и массопереноса, представленных в виде задач сопряжения, даже в том случае, если параметры задачи зависят от пространственных координат. Такие задачи возникают не только в скважинной теплофизике, но и в других разделах теоретической физики при исследовании физических полей. Это говорит о *теоретической значимости* диссертации.

Представленные в диссертации результаты расчетов, содержащие новую информацию о полях температуры в турбулентном потоке жидкости, текущей в скважине, несомненно, актуальны в общенаучном смысле. Кроме того, использование полученных результатов позволяет усовершенствовать существующие методы термометрии. Это обуславливает *прикладную*



*значимость* диссертационной работы.

## **2. Обоснованность и достоверность научных положений**

В диссертации достаточное внимание уделено обоснованию и доказательству достоверности полученных результатов. Выбранный автором подход к таким задачам, заключающийся в построении аналитических решений с последующей численной реализацией, несмотря на свою трудоемкость, обеспечивает максимальную достоверность результатов, поскольку каждый шаг исследований проконтролирован автором и может быть проконтролирован независимыми экспертами. Такие возможности часто отсутствуют при использовании численных методов сразу же после постановки задач.

Обоснованность полученных в диссертации результатов обеспечивается также тем, что в основу исследования положены законы сохранения и другие фундаментальные физические законы, а полученные решения задач и основные результаты согласованы с ними.

Автором разработана оригинальная модификация асимптотического метода, с использованием которой получены аналитические решения новых задач, на основании которых сформулированы научные положения, выводы и рекомендации. Достоверность полученных решений в достаточной степени подтверждена в диссертации сопоставлением с экспериментальными данными, а также сопоставлением решений частных случаев представленных задач с их известными точными решениями.

## **3. Новизна исследования и полученных результатов**

Впервые, с использованием разработанной автором модификации асимптотического метода, построена теория решения многослойных взаимосвязанных нелинейных задач сопряжения скважинной теплофизики и гидродинамики. Соответствующие задачи содержат уравнения, в которых параметры зависят от температуры и пространственных координат, что затрудняет получение их аналитического решения известными методами. Автором разработан способ решения нелинейных задач сопряжения с переменными коэффициентами, сочетающий асимптотические методы малого и формального параметров. В работе приведены приложения развитого метода к широкому кругу практически важных задач теплофизики.

На основании аналитического решения задачи о нестационарном теплообмене осесимметричного потока в скважине получены зависимости температуры в скважине и окружающих породах от времени и



пространственных координат, учитывающие зависимость теплоемкости и теплопроводности от температуры, профиля скорости и теплопроводности от радиальной координаты, ортотропию теплофизических свойств сред и отклонение температуры добываемых углеводородов в нулевом и первом асимптотических приближениях. При этом нулевое приближение представляет асимптотически осредненное по центральной ограниченной области решение, а первый коэффициент разложения уточняет полученное решение в области осреднения.

Сравнение решений для разных типов течения позволило сформулировать утверждение о том, что асимптотически осредненное температурное поле аксиально-симметричного потока, в том числе турбулентного и ламинарного, инвариантно относительно радиальных профилей скорости и коэффициента теплопроводности, т.е. одинаково для любых режимов течения несжимаемой жидкости при одинаковой средней скорости и всех остальных идентичных параметрах. Показано, что осредненное температурное поле определяет режим малодебитных скважин, поскольку при дебитах меньше 5 т/сут. и геотермическом градиенте 0.02 К/м максимальная разница температур между стенкой и осью скважины не превышает 0.05 К.

Уточнены особенности формирования температурных аномалий, обусловленных вкладом температурного сигнала пласта. Сравнением графических зависимостей, построенных при различных значениях температурного сигнала пласта, определены пространственный диапазон затухания температурного сигнала пласта и временной диапазон подхода температурного сигнала пласта.

Полученные в работе выражения для первых коэффициентов асимптотического разложения позволяют рассчитать радиальные перепады температуры между любой точкой внутри скважины и ее стенкой при теплообмене потока. Это позволяет определить температурные аномалии, возникающие в различные моменты времени при отклонении термометра относительно оси или стенки скважины, а с использованием специально разработанного алгоритма, получить установившиеся радиальные распределения температурного поля при теплообмене в скважине.

На основе единого подхода получены решения взаимосвязанных задач о полях температуры и давления в слоисто-неоднородном пористом пласте-коллекторе, позволяющие рассчитать температурный сигнал пласта с учетом теплофизических и гидродинамических характеристик слоев и насыщающего центральный слой флюида.



Поскольку радиальные зависимости скорости и теплопроводности в постановке нестационарной задачи о теплообмене восходящего потока в скважине заданы в общем виде, то полученные решения охватывают максимально возможный на практике широкий круг аксиально-симметричных течений, включающий ламинарное, турбулентное и переходные режимы.

#### **4. Значимость полученных результатов для науки и практики**

Представленные в диссертации материалы свидетельствуют о значительных общетеоретических достижениях на широком классе практически важных задач тепломассопереноса в скважине и пластах, имеющих широкое прикладное значение.

**Значимость для науки** представленных в диссертационной работе результатов:

- разработан оригинальный способ решения нелинейных задач скважинной теплофизики, содержащих уравнения с параметрами, зависящими от пространственных координат. Разработанный способ применим и в других разделах физики для решения задач отыскания физических полей на границах сред;
- разработана новая процедура получения выражений, описывающих установившиеся поля;
- показана принципиально новая возможность асимптотического осреднения задач сопряжения с переменными коэффициентами в согласии с законами сохранения, что делает возможным применение известных математических методов решения расцепленных задач для коэффициентов асимптотического разложения.

**Значимость для практики** результатов диссертационной работы состоит в том, что:

- полученные в диссертации выражения описывают поля температуры и давления в пласте и скважине, что составляет теоретическую основу разработки месторождений углеводородов;
- расчетные формулы для радиальных профилей температуры флюида в скважине, полученные в работе, позволяют идентифицировать и прогнозировать аномалии температурного поля в скважине, что открывает новые возможности исследования скважин и оптимизации условий их эксплуатации;
- выражения для расчета влияния теплофизических процессов на температуру нефтегазовых коллекторов и отбираемых углеводородов



позволяют прогнозировать отклонение температуры в призабойной зоне от геотермической и определять на этой основе температурный сигнал пласта, практическое измерение которого позволяет обеспечить контроль за выработкой пласта;

- разработанный способ расчета температурных аномалий, возникающих вследствие изменения сечения потока при переходе в насосно-компрессорные трубы, образовании парафиновых отложений или газовых гидратов, позволяет уточнить методику выявления интервалов заколонной циркуляции.

## **5. Оценка содержания диссертационной работы**

Диссертационная работа О.В. Ахметовой состоит из введения, шести глав основного текста, заключения, списка использованных источников и семи приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 421 страницу. В работе содержится 5 таблиц и 88 рисунков. Список литературы содержит 191 наименование.

**Во введении** обоснована актуальность темы, представлены цель и задачи диссертации, изложена общая методика исследования, сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации описаны термогидродинамические процессы, происходящие при фильтрации углеводородов в пласте и их последующем отборе из скважины (обзорно), представлен вывод (с элементами оригинальности) основных уравнений, сформулированы постановки взаимосвязанных задач о полях давления и температуры в пласте и температуре в скважине. Приведено описание разработанного автором метода решения задач, применение метода проиллюстрировано на примере задачи о поле давления при фильтрации флюида в слоисто-неоднородном пласте, новизна которой заключается в том, что компоненты проницаемости среднего слоя зависят от вертикальной координаты.

**Вторая глава** посвящена решению нелинейной задачи сопряжения о нестационарном теплообмене турбулентного потока, являющейся в работе основной. Разложением по малым параметрам задачи (температурным коэффициентам теплоемкости  $\sigma$  и теплопроводности  $\gamma$ ) исходная нелинейная задача представляется в виде последовательности линейных задач для коэффициентов разложения, в которой нулевое приближение описывает температурное поле без учета зависимости теплоемкости и теплопроводности, а старшие коэффициенты содержат информацию о вкладе изменения теплоемкости  $c$  и теплопроводности  $\lambda$  с температурой. Задача для



нулевого приближения является общей, а влияние каждой из поправок отыскивается независимо и последовательно, поскольку параметры  $\sigma$  и  $\gamma$  являются независимыми. Соответствующие линейные задачи для нулевого и первого коэффициентов разложения полей температуры по обоим параметрам  $\sigma$  и  $\gamma$  содержат радиальные профили скорости и теплопроводности. Проблемы, связанные с наличием в уравнении конвективной теплопроводности параметров, зависящих от радиальной координаты, устранены в работе с использованием оригинального метода «пространственного покоефициентного осреднения».

Получены новые аналитические решения задачи о нестационарном температурном поле турбулентного потока в скважине в предположении, что теплоемкость и теплопроводность не зависят от температуры. Из решения указанной задачи для первого коэффициента найдены практически значимые выражения для радиального профиля температуры и его установившегося значения. Определены в нулевом приближении поправки, обусловленные зависимостью  $c$  и  $\lambda$  от температуры. Произведена оценка вклада этих поправок.

Найденные во второй главе решения, в силу произвольности профилей скорости  $R(r)$  и теплопроводности  $\lambda(r)$  справедливы не только для турбулентного и ламинарного, но и для переходных режимов, а также других типов аксиально-симметричных течений. Такое представление позволяет использовать различные модели, описывающие турбулентные течения и полностью решает теплофизическую проблему учета турбулентности.

**Третья глава** содержит выражения для расчета температурных полей ламинарного потока и модельного потока с выровненным профилем скорости, выведенных из общего решения, полученного во второй главе (при  $\lambda(r)=1$  – ламинарный поток,  $\lambda(r)=1$ ,  $R(r)=1$  – модельный поток с выровненным профилем скорости), а так же выражения, описывающие температурное поле потоков с указанными типами течения в режиме постоянных вертикальных градиентов температуры ( $z \rightarrow \infty$ ).

В частных случаях из полученных в главах 2 и 3 решений следует решение Намиота-Чекалюка.

Приведены оригинальные расчеты температурных полей по полученным формулам. Показано, что нулевого асимптотического приближения достаточно для расчета температурных полей малодебитных скважин. Это существенно экономит ресурсы, требуемые для численных расчетов по полученным формулам.

**В четвертой главе** исследованы температурные аномалии, возникающие при изменении проходного сечения потока. Впервые показано,



что в таких случаях существует зона от верхней точки пространственного диапазона затухания температурного сигнала пласта до нижней точки зоны постоянных градиентов. Размеры этой зоны растут при увеличении разницы между проходными сечениями изучаемых участков трубы.

**В пятой главе** впервые найдено аналитическое решение задачи о температурном поле в слоисто-неоднородной ортотропной пористой среде с учетом теплообмена с окружающими породами при отборе флюида из пласта, позволяющее оценить температурный сигнал пласта при заданных теплофизических и гидродинамических характеристиках флюида и коллектора в нулевом и первом асимптотических приближениях.

Частные случаи рассмотренной в этой главе задачи совпадают с автомодельными решениями задач о температурном поле в пласте.

Произведена оценка температурного эффекта в пласте и получен вид функции температурного сигнала пласта.

**В шестой главе** получены новые аналитические зависимости пространственно-временных распределений давления в слоисто-неоднородной анизотропной пористой среде, которые можно широко использовать для практических расчетов полей давления в природных коллекторах и уточнения представлений о процессах нефтеотдачи неоднородных и анизотропных пластов, которыми реальные природные коллекторы нефти и газа чаще всего являются.

Из полученных решений в частных случаях следует результат К.С. Басниева.

Приведены результаты расчетов полей по полученным формулам.

Определены производные от функции давления по времени и радиальной координате, необходимые для расчета температурного сигнала пласта по формулам, полученным в главе 5.

Содержание глав 2 – 6 в преобладающей степени является оригинальным.

**В приложении А** представлена аппроксимация экспериментальных данных линейной зависимостью. **В приложениях Б – Ж** содержатся решения задач и необходимые выкладки, не вошедшие в основной текст диссертации.

## **6. Замечания**

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Из приведенных в главе 2 графических зависимостей не понятно, какие теплофизические характеристики влияют на величину поправки. Следует указать случаи, в которых учет этой поправки вносит существенный вклад в исследуемое поле, а также значение параметров, при которых вкладом нелинейности можно пренебречь.
2. Не приводятся сопоставления с решением конечно-разностными решениями.
3. Не оценен вклад калориметрического эффекта в температурный сигнал пласта.



Приведенные выше замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

### **7. Соответствие диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Диссертация Ахметовой О.В. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне. Результаты, полученные автором, представляют крупное научное достижение в направлении скважинной теплофизики, обладают научной новизной и имеют высокую практическую ценность. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Материалы диссертации хорошо известны научной общественности, полученные результаты неоднократно обсуждались на конференциях различного уровня с участием ведущих специалистов по профилю диссертации. Основные результаты опубликованы в журналах, входящих в перечень журналов и изданий, утвержденных ВАК России.

Считаю, что выполненное исследование по своим квалификационным признакам полностью удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Ахметова Оксана Валентиновна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,  
профессор, заведующий кафедрой общей и  
теоретической физики ФГБОУ ВО  
«Башкирский государственный педагогический  
университет им. М. Акмуллы»,  
450000, г.Уфа, ул. Октябрьской революции, 3 а  
тел.: +7(347)272-58-05  
e-mail: [fatykhovma@mail.ru](mailto:fatykhovma@mail.ru)

доктор физико-математических наук

Подпись Фатыхова М.А. заверяю:

Начальник отдела документационного  
обеспечения

Проректор по научной работе



М.А. Фатыхов

Г.Р. Фаттахова

Л.А. Амирова