

Вх. № 4/22
от 27.01.22

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ КазНЦ РАН

д.ф.-м.н., профессор РАН



А.А. Калачев

« 21 » января 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр
Российской академии наук»**

**на диссертацию Гильманова Александра Яновича
на тему «Интегральная модель тепломассопереноса
при парогравитационном дренаже»,**

**представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и
теоретическая теплотехника»**

Актуальность работы. В настоящий момент из-за истощения традиционных запасов нефти активно вовлекаются в разработку месторождения с тяжёлой нефтью. Для повышения нефтеотдачи таких месторождений используются различные тепловые воздействия - нагнетание в пласты вытеснителей с температурой, отличной от начальной пластовой. При этом изменяются коэффициенты вытеснения, фазовые проницаемости и др., вследствие чего температура существенно влияет как на текущие фильтрационные характеристики, так и на конечную нефтеотдачу. Высокую эффективность на практике для добычи тяжёлой нефти показали тепловые методы при использовании пара в качестве теплоносителя. Одним из наиболее перспективных методов среди них является метод парогравитационного дренажа.

Интегральные модели хорошо зарекомендовали себя для слабоизученных месторождений. Полученные на основе этих моделей данные могут быть использованы в качестве оценочных расчётов на начальных стадиях подготовки проекта разработки таких месторождений. Поэтому задача создания интегральной модели тепломассопереноса при парогравитационном дренаже является актуальной, а результаты диссертационной работы представляются важными и востребованными.

Научная новизна работы заключается в том, что

- Разработана интегральная модель процесса парогравитационного дренажа, впервые учитывающая и тепловой баланс всей паровой камеры, и соотношения дебитов нефти и воды в продукции, полученные из закона Дарси. Показано, что модель позволяет рассчитать все стадии процесса на основе параметров, которые возможно определить на практике.
- С помощью асимптотического анализа модели установлено наличие нового определяющего параметра – критического расхода пара, необходимого для формирования тепловой и гидродинамической связи между скважинами. Расход пара выше критического свидетельствует об успешной инициации процесса.
- Выделены и проанализированы этапы развития процесса, новыми элементами этих этапов являются интерференция паровых камер, установление динамического теплового равновесия. Выделены безразмерные комплексы, оказывающие определяющее влияние на процесс.
- Установлена возможность оптимизации развития теплового поля для получения максимального коэффициента извлечения нефти.
- Верификация разработанной модели показала удовлетворительное соответствие расчётной динамики коэффициента извлечения нефти с промысловыми данными по месторождениям Fengcheng и Senlac, расчётной динамики паронефтяного отношения с промысловыми данными по месторождению Senlac.

Наиболее существенные результаты, полученные соискателем.

Установлено, что моделирование геометрии паровой камеры в виде треугольной формы в сечении позволяет достичь удовлетворительного описания тепловых процессов. Асимптотический анализ интегральной модели позволил установить новый параметр – критический расход пара, необходимый для формирования термогидродинамической связи между скважинами. Установлены основные этапы процесса парогравитационного дренажа: формирование термогидродинамической связи между скважинами, вертикальное развитие паровой камеры, горизонтальное расширение паровой камеры, интерференция соседних паровых камер, квазистационарное равновесие между теплом, вводимым в пласт, и тепловыми потерями из паровой камеры. Установлено наличие максимального коэффициента охвата пласта воздействием, вызванного выравниванием количества теплоты, закачиваемого в единицу времени в пласт, с мощностью тепловых потерь из паровой камеры. Показано, что на заключительной стадии процесса парогравитационного дренажа динамика развития теплового поля приводит к интерференции соседних паровых камер. Установлено наличие оптимального расстояния между парами скважин, соответствующее максимальному прогреву пласта и приводящее к максимальному коэффициенту извлечения нефти за время эффективной разработки. Проведена верификация модели путём сопоставления расчётной динамики развития паровой камеры с данными из экспериментов Чанга и Батлера, динамики коэффициента извлечения нефти с промысловыми данными по месторождениям Senlac и Fengcheng.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов подтверждается удовлетворительным соответствием динамики развития паровой камеры, рассчитанной по модели, с экспериментальными данными Чанга и Батлера, согласованностью динамики коэффициента извлечения нефти по результатам расчётов по модели с промысловыми данными месторождения Senlac. Установлено соответствие динамики опускания

верхней границы области жидких фаз, позволяющей судить о риске прорыва пара, с моделью Янга и его соавторов при расчёте для месторождения Celtic. Дополнительным подтверждением корректности модели служит соответствие максимального коэффициента охвата пласта по результатам численных расчётов с полученным из модели аналитически путём асимптотического анализа.

Научная и практическая значимость. Интегральная модель парогравитационного дренажа может быть использована для прогнозирования времени стабилизации паровой камеры, динамики коэффициента охвата пласта воздействием, паронефтяного отношения, обводнённости продукции, дебитов нефти и воды.

Результаты, представленные в диссертации, судя по публикациям и широкому обсуждению работы на российских и международных конференциях, получили одобрение научной общественности. **Личный вклад автора** состоит в разработке интегральной модели парогравитационного дренажа, детально описывающей тепловой баланс в элементе разработки, введении критерия формирования термогидродинамической связи между скважинами, проведении расчётов с использованием разработанной модели, анализе результатов исследования, установлении критерия оптимизации процесса парогравитационного дренажа – максимального коэффициента извлечения нефти, верификации модели.

По структуре диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации – 125 страниц, имеется 19 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 128 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы и поставлены основные задачи исследования, указана научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе охарактеризовано современное состояние в области моделирования и применения метода парогравитационного дренажа. Обоснован общий принцип действия тепловых методов увеличения нефтеотдачи, рассмотрены различные тепловые методы увеличения нефтеотдачи, их принцип работы, достоинства и недостатки. Подробно описан метод парогравитационного дренажа (Steam-Assisted Gravity Drainage, SAGD), предложенный Р. М. Батлером, указаны его преимущества по сравнению с другими методами.

Во второй главе представлена интегральная модель парогравитационного дренажа. Для оценки вклада влияющих параметров, обобщения рекомендаций, даваемых по результатам расчётов с использованием разработанной интегральной модели, проведена процедура обезразмеривания. Рассмотрен процесс интерференции паровых камер. В диссертационной работе предлагается критерий, по которому можно сделать вывод о прорыве пара в добывающую скважину – опускание границы между областями жидкой и паровой фаз. Описаны численные методы решения.

В третьей главе исследованы основные этапы развития теплового поля при использовании SAGD. Асимптотический анализ модели при $t \rightarrow 0$ позволил установить наличие критического расхода пара, необходимого для формирования термогидродинамической связи между скважинами. Проведена верификация построенной интегральной модели с помощью экспериментов Чанга и Батлера. Установлено наличие максимального коэффициента охвата пласта воздействием, указывающее на наступление динамического равновесия тепла, вводимого в пласт, и тепловых потерь из паровой камеры.

В четвёртой главе проведена верификация разработанной модели SAGD при сопоставлении с промысловыми данными месторождений Senlac, Fengcheng, даны рекомендации по применению SAGD на месторождении Celtic.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Замечания по содержанию диссертации.

- Во введении при перечислении элементов научной новизны утверждается: “Для треугольной геометрии паровой камеры впервые установлено, что скорость её развития в вертикальном и горизонтальном направлениях пропорциональна соответствующим удельным тепловым потокам”, однако это условие было заложено как допущение при выводе уравнений. В диссертационной работе только показано, что такое допущение соответствует эксперименту Чанга и Батлера.
- Разработанная автором модель не учитывает стадии языкообразования пара вблизи кровли пласта на последних стадиях разработки. Возможно, учёт этой стадии помог бы повысить точность расчётов развития теплового поля в модели.
- В модели представляется возможным учесть переменный расход закачиваемого пара. Его учёт мог бы позволить повысить точность расчётов по разработанной автором модели.
- Уравнения разработанной модели решаются численно с помощью явной конечно-разностной схемы. Однако не описаны размеры расчетной сетки, число узлов и т.д.
- В изложении диссертационной работы замечено некоторое количество грамматических и стилистических ошибок.

Указанные замечания носят рекомендательный характер, не являются существенными и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Заключение.

Диссертационная работа Гильманова Александра Яновича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи парогравитационного дренажа интегральным методом, в предположении треугольной формы паровой камеры. Полученные результаты имеют существенное значение для развития методов решения теплофизических задач нефтяных пластов. Достоинством работы является

верификация разработанной интегральной модели парогравитационного дренажа путём сопоставления расчётных данных с промысловыми. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для определения оптимальных параметров парогравитационного дренажа на любом российском и международном месторождении, по которому имеются необходимые входные данные для модели. Модель также позволяет провести прогнозный расчёт коэффициента извлечения нефти, коэффициента охвата пласта воздействием, обводнённости продукции и паронефтяного отношения. Вероятно, модель заинтересует крупные российские нефтегазовые компании (Роснефть, Татнефть), которые рассматривают применение метода парогравитационного дренажа для разработки месторождений высоковязкой нефти.

Основные результаты научно-квалификационной работы достаточно полно опубликованы в 13 печатных работах, в том числе в 8 работах в изданиях, рекомендованных ВАК. Содержание автореферата соответствует цели, задачам, основным выводам и рекомендациям диссертационной работы.

Таким образом, диссертационная работа Гильманова Александра Яновича по актуальности, научной новизне, основным положениям, научной, практической значимости и достоверности, по содержанию и оформлению полученных результатов соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.20013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Гильманов Александр Янович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».**

Отзыв на диссертацию подготовлен на основании заключения лабораторий Математического моделирования гидрогеологических процессов и Математического моделирования процессов фильтрации

Института механики и машиностроения - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (протокол заседания лабораторий № 3 от «21» декабря 2021 г.).

Отзыв подготовили:

Главный научный сотрудник
лаборатории ММПФ ИММ ФИЦ
КазНЦ РАН, д.ф.-м.н. по
специальности 01.02.05 - механика
жидкости, газа и плазмы,
профессор

Никифоров
Анатолий
Иванович

Старший научный сотрудник
лаборатории ММП ИММ ФИЦ
КазНЦ РАН, к.ф.-м.н. по
специальности 05.13.18 -
математическое моделирование,
численные методы и комплексы
программ

Цепаев
Алексей
Викторович

420111, г. Казань,
ул. Лобачевского, д. 2/31,
т. (843)236-52-89,
e-mail: info@imm.knc.ru



ПОДПИСЬ	<i>Никифорова А.И.</i>	
ЗАВЕРАЮ	<i>Цепаева А.В.</i>	
НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА ПРОТОКОЛА И ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА	<i>Саликеева Е.А.</i>	
« 24 »	21	20 22 г.