

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Маслова Алексея Леонидовича «Моделирование подземной газификации сланцев», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

1. Актуальность темы диссертации

Одним из источников природных горючих веществ являются горючие сланцы. Мировые запасы сланцев составляют весомую величину. В последнее десятилетие активизировалась добыча газа из сланцев, разрабатываются дешевые способы получения горючих газов из природных сланцев. Одним из способов подземной переработки сланцев является нагрев сланцев и сбор получающихся газов через специальные скважины.

Актуальность работы в прикладном плане состоит в востребованности изучения возможности получения дешевых альтернативных источников энергии. В фундаментальном плане актуальность работы связана с изучением процессов, имеющих место в толще сланцевого пласта при его термическом разложении. В связи с этим тема диссертационной работы Маслова А.Л. является актуальной.

2. Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 102 страницы.

Во **введении** обосновывается актуальность исследуемой проблемы; сформулированы цели исследований и основные положения, выносимые на защиту; даны оценки научной и практической значимости работы, приведены сведения об апробации результатов.

В **первой главе** проведен обзор литературы по исследованию теплофизических свойств сланцев и закономерностей их термического разложения. Приведены данные по основным параметрам сланцев, полученные отечественными и зарубежными исследователями, таким как их пористость, теплоемкость, теплопроводность, зависимость свойств от температуры. Приводятся ссылки на исследования по закономерностям разложения сланцев и характерным стадиям этого процесса. Рассмотрены некоторые существующие модели разложения сланцев. Кратко описаны исследования электропроводности сланцев.

Во **второй главе** рассмотрены теплофизические модели нагрева сланцев, не учитывающие химические реакции при их разложении. Представлена постановка задачи о прогреве сланцевого блока электродами. Постановка записана в двухмерной и в трехмерной постановках. Представлен метод численного решения задачи и результаты решения задачи о прогреве блока сланца. Решение получено в двухмерной и в трехмерной постановках и

проведено их сравнение. Сделан вывод о том, что для моделирования особенностей разложения органических веществ сланца достаточно использовать двухмерное приближение.

В **третьей главе** исследовано влияние разложения прямоугольной сланцевой пластины с использованием простейшей одностадийной кинетической схемы реакций вида «реагент – продукт». Принята модель реакции Аррениусовского типа. Такая модель позволила формально учесть образование продуктов, и тепловые эффекты химических реакций. Получены зависимости скорости разогрева и скорости разложения органических составляющих природного сланца. Определен интервал температуры сланца в котором заметно проявляется разогрев сланца за счет химического тепловыделения.

Из анализа результатов расчетов автор сделал вывод, что для моделирования процесса глубокого разложения модель требует существенного развития, учета различий в свойствах образующихся продуктов и более полной кинетической схемы реакций.

В **четвертой главе** представлена более общая постановка задачи. Сланец моделируется твердым пористым скелетом, при нагреве разлагается на твердый углеродосодержащий остаток и газ, как промежуточный продукт. Промежуточный продукт при дальнейшем нагреве разлагается, образуя другой газ. Математическая модель включает уравнения теплопроводности для твердой фазы, теплопереноса для газа, нелинейное уравнение состояния, уравнения движения и химической кинетики, и соответствующие граничные и начальные условия. Движение газа моделируется с использованием закона Дарси.

С использованием специально разработанной методики расчета и программы ЭВМ были проведены численные эксперименты по исследованию влияния физических и физико-химических процессов на полноту выделения газов из сланца: без учета и с учетом концентрационного расширения газа, без учета и с учетом тепловыделения от химических реакций, изменения потенциала на электродах, изменения коэффициентов массоотдачи и теплоотдачи. Получены поля температуры и скорости фильтрации газообразных продуктов. Полученные результаты обработаны в терминах средней концентрации целевого газообразного продукта.

Отдельно стоит отметить расчеты с учетом отбора газа через скважину, расположенную между электродами. Постановка задачи и первичные результаты заслуживают внимания практиков, так как позволяют оценить дебит скважины.

В **заключении** представлены основные результаты и выводы.

3. Достоверность и научная новизна результатов диссертации

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных физических и математических моделей реагирующих сред, использованием классических методов для получения аналитических решений, использованием современных представлений о кинетике процессов термического разложения сланцев. Компьютерные программы,

реализующие методы решения уравнений математических моделей, основаны на известных, апробированных алгоритмах, протестированы на известных аналитических решениях, исследована сеточная сходимость результатов расчетов. Результаты анализа поставленных задач качественно согласуются с экспериментальными данными наблюдений.

Новизна результатов: Впервые сформулирована математическая модель термического разложения горючих сланцев, в которой учитываются многофазность и многокомпонентность продуктов газификации, различие температуры фаз, фильтрация продуктов разложения, пространственная геометрия расположения электродов. Смоделирован начальный этап развития разложения горючих сланцев и выход реакций разложения на режимы медленного разложения и взрывного разложения. Получены интегральные характеристики дебита газа из зоны термического разложения.

4. Значимость результатов для науки и практики

Результаты исследований имеют **теоретическую значимость** в части разработки фундаментальной физико-математической модели термического разложения горючих сланцев, учитывающей комплекс сопутствующих явлений – многоступенчатые химические реакции, тепло- и массоперенос в пористом слое горючего сланца при его разогреве и разложении, фильтрацию газообразных продуктов реакции, отвод продуктов разложения через скважину. В части практической значимости: модель и программа ЭВМ позволяют сделать выводы о количестве и скорости образования продуктов разложения горючих сланцев, могут быть использованы для предпроектной проработки технологий внутрипластовой переработки сланцев.

5. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, выносимых на защиту.

Обоснованность результатов диссертационного исследования, положений, выводов и рекомендаций обеспечивается современным уровнем и непротиворечивостью его исходных теоретических положений, применением надежных и апробированных методов решения уравнений математической физики в частных производных второго порядка, методов численного решения, корректной интерпретаций полученных результатов. Обоснованность научных положений и выводов исследования подтверждается сопоставлением собственных результатов с данными научной литературы.

6. Полнота опубликования результатов исследований.

Результаты работы опубликованы достаточно полно. По теме диссертации опубликовано 14 печатных научных работ, в том числе 2 статьи в российских рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 4 – в изданиях,

индексируемых в библиографической базе данных Scopus, 8 – в сборниках трудов Международных и Всероссийских конференций, а также в тезисах докладов.

7. Автореферат

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

8. Замечания по диссертационной работе.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В главе 2 не представлена полностью постановка трехмерной задачи, метод и алгоритм ее решения.

2. В постановке задачи (2.1) введен источник $W = W_{el} + q_H$, однако области влияния каждого слагаемого не определена.

3. Для обеспечения совпадения результатов расчетов в трехмерной и двухмерной постановке использован коэффициент « α_{in} ». Каков его смысл, и каков алгоритм его определения?

4. В постановке (2.1), (2.8) граничные условия учитывают излучение на границах плоского слоя сланца. Какова необходимость учета излучения?

Не указано, как конкретно при численном моделировании были аппроксимированы граничные условия для уравнения теплопроводности, учитывающие теплообмен по закону Стефана-Больцмана, содержащие нелинейные слагаемые.

5. При решении задачи с одностадийной реакцией, результаты решения которой представлены в главе 3, принят суммарный тепловой эффект реакции положительным, в главе 4 тепловые эффекты разделены на эндотермический в твердой фазе и экзотермический в газовой фазе, причем принято что экзотермический эффект превалирует. В обзоре литературы на стр. 23 указывается, что суммарный тепловой эффект по данным литературы может быть отрицательным. Однако в работе нет анализа процессов для случая отрицательного теплового эффекта.

На стр. 57 «... суммарный тепловой эффект реакции разложения твердой фазы отрицателен, а газообразный продукт реагирует с выделением тепла, причет экзотермический эффект превалирует.». На стр. 78 «... выделение тепла из-за реакции в твердой фазе, и его поглощение в ходе реакции в газовой фазе.». Все таки не ясно, какие реакции в твердой фазе и газе были приняты в расчетах?

6. Природные сланцы содержат влагу. При нагреве она испытывает фазовый переход. Слои природного сланца находятся в условиях горного давления. Точка кипения воды сильно зависит от давления. Эти эффекты в постановке задачи не учтены.

7. В главе 4 представлена постановка задачи с учетом отбора продукта разложения сланцев через добычную скважину, однако представлен единичный расчет с учетом работы скважины, и не проведен анализ ее дебита и зависимости дебита от условий в пласте.

9. Общая характеристика диссертационной работы

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости представленных результатов и общей положительной оценки работы. Замечания продиктованы интересом к полученным результатам, а также дальнейшему развитию работы.

Считаю, что диссертационное исследование вносит существенный вклад в развитие исследований по выявлению «...связей химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками термического разложения, горения, взрывчатого превращения; ...» (п. 7 паспорта специальности), соответствует 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Считаю, что диссертация Маслова Алексея Леонидовича «Моделирование подземной газификации сланцев» соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, п. 9, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.13 г. № 842, а ее автор Маслов А.Л. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Профессор кафедры математической физики Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,
доктор физико-математических наук,
01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

✓
✓
Крайнов Алексей Юрьевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36
тел. 8(3822)52-98-45
email: akrainov@ftf.tsu.ru

УДОСТОВЕРЯЮ
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ТГУ

Н.А. САЗОНОВА

