Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Кафедра «Теоретическая механика»

Работа допущена к защите

Зав. кафедрой, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, проф.

_____ А.М. Кривцов

«____»_____2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

по направлению 01.04.03 «Механика и математическое моделирование»
по образовательной программе
01.04.03_04 «Математическое моделирование процессов нефтегазодобычи»

Выполнил
студент гр.23642/3 М.М. Петров

Руководитель
доцент, к. ф.-м.н. В.А. Кузькин

Консультант
Главный специалист
ООО «Газпромнефть НТЦ», к.т.н. Г.Ю. Щербаков

Санкт-Петербург

2018

РЕФЕРАТ

На 75 с., 21 рисунков, 6 таблицы.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КИСЛОТНАЯ ОБРАБОТКА ТЕРРИГЕННЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ, ФИЛЬТРАЦИЯ.

В данной работе рассмотрена проблематика математического моделирования кислотной обработки терригенных коллекторов. Приведено описание самой технологии и основных математических моделей, представленных в открытых литературных источниках. Проведен их анализ. На основе проведённого обзора разработана новая модель с учётом образования осадков. Представленная программная реализация данной модели, проведена её апробация на тестовом примере.

THE ABSTRACT

75 pages, 21 pictures, 6 tables.

MATHEMATICAL MODELLING, SANDSTONE ACIDIZING, ACID TREATMENT, FILTRATION.

In the given work the problem of mathematical modelling of sandstone acidizing is stated. The general description of acid treatment technology and a number of acidizing models are described and analyzed. Based on it, the new model of acidizing which takes to account precipitation, is developed. A computer simulator for acidizing using invented model is built, and it was proven via test study.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЯ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ 9

1.1. Описание технологии 9

1.2. Описание физико-химических процессов 15

1.3. Моделирование химических реакций 18

1.4. Оценка эффективности операции 21

1.5. Дизайн кислотной обработки 22

1.6. Обзор программного обеспечения для моделирования КО 28

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ 30

2.1. Модель двух минералов 31

2.2. Модель двух кислот, трёх минералов 32

2.3. Модель локального равновесия 33

2.4. Модель KGEOFLOW 35

2.5. Модель Куина – Лейка- Шехтера 36

2.6. Четырёхпараметрическая модель 38

2.7. Улучшенная модель воздействия глинокислоты на терригенные коллекторы 40

2.8. Модель Бернта - Робертса 40

2.9. Анализ представленных моделей 42

2.10. Определение оптимальной модели 44

2.11. Определение входных и выходных параметров математической модели 46

2.12. Разработка модели кислотной обработки терригенных коллекторов с учётом образования осадков и их влияния на проницаемость 47

2.13. Численная реализация математической модели 54

2.14. Анализ сходимости 55

2.15. Условный параметр оптимальности 57

2.16. Результаты расчёта для модельного примера 57

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПИЛОТНОГО МОДУЛЯ ПО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ 60
3.1. Разработка модуля решения математической модели 61
3.2. Разработка интерфейса 62
ВЫВОДЫ 68
ОХРАНА ТРУДА 69
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 73

ВВЕДЕНИЕ

На месторождениях большинства нефтяных компаний проводится огромное число кислотных обработок. Это объясняется тем, что процедура технологически достаточно простая, не требует больших финансовых затрат, притом зачастую даёт значительный прирост по добыче, а значит экономически обоснована. Кислотные составы закачиваются как в действующие скважины, так и во вводимые в эксплуатацию.

Цель практически всегда одна - стимуляция притока за счёт очистки призабойной зоны[1] (в большей мере характерно для терригенных коллекторов) и создание высокопроводящих каналов в пласте (более применимо для пластов с высокой долей карбонатов).

В то же время, задача определения оптимальных параметров проведения процесса, таких как концентрация кислоты, время реакции, давление закачки и т.д. требует больших усилий. Поэтому, на данный момент в большинстве случаев кислотная обработка проектируется исходя из экспертного опыта или эмпирических соотношений. Однако такой подход нельзя назвать оптимальным. В настоящее время, когда качество запасов непрерывно падает, а открываемые месторождения становятся все меньше и меньше, нефть становится все сложнее и сложнее добыть. В таких условиях цена ошибки может быт слишком большой, поэтому решения по проведению тех или иных технологический операций нужно принимать на основе компьютерного моделирования.

Неправильно проведённая кислотная обработка может повредить насосно-компрессорную трубу и другое оборудование, значительно ухудшить фильтрационно – емкостные свойства обрабатываемой зоны из-за выпадения широкого спектра нерастворимых осадков и т.д. В связи с этим появилась необходимость в качественной математической модели данного процесса.

---

[1] Участок породы, непосредственно примыкающий к стволу скважины. В результате разработки и эксплуатации скважины подвергается наибольшему воздействию, в результате чего её фильтрационные свойства значительно падают.

Проблема фильтрации химически активной жидкости в пористых средах, которая относится к разделу механики жидкости и газа, была изучена большим количеством авторов и до сих пор представляет значительный интерес. Большинство работ по данной теме включают математические модели, основанные на уравнениях изотермической фильтрации несжимаемой жидкости с различными дополнениями. Однако только малая часть из них рассматривает фильтрацию,осложнённую большим количеством химических взаимодействий активной компоненты с пористой средой.

Учёные, исследовавшие процесс кислотной обработки карбонатных коллекторов, сходятся во мнении, что при закачке кислоты в пласт происходит образование высокопроводящих каналов, которые и приводят к увеличению проницаемости пласта. Другая ситуация сложилась с кислотной обработкой терригенных коллекторов - большинство исследователей пишут, что в данном случае характерно только поверхностное растворение, и формирование высокопроводящих каналов не учитывается. Притом, сложная структура породы упрощается – она представляется, как состоящая из двух – трёх минералов. Однако такой подход является слишком упрощённым и не учитывает бóльшую часть возможных реакций в пласте. Возможно, именно поэтому существует только небольшое количество программных решений для моделирования КО терригенных коллекторов.

Таким образом, проблема математического моделирования фильтрации активного состава в пласт с учётом его химического взаимодействия с пористой средой является важной и актуальной, решению которой и посвящена данная работа.

Целью данной работы является разработка и программная реализация математической модели кислотной обработки терригенных коллекторов.

В связи с поставленной целью были сформулированы следующие задачи:

1. Подробное изучение процесса кислотной обработки терригенных коллекторов;

2. Поиск в литературных источниках математических моделей изучаемого процесса;
3. Синтез математической модели кислотной обработки с учётом возможных побочных реакций и образования осадка;
4. Численная реализация разработанной модели;
5. Программная реализация математической модели;
6. Проверка на данных, приближенных к реальным.

Глава 1. ТЕХНОЛОГИЯ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ

1.1.Описание технологии

Под кислотной обработкой (КО) понимается закачкаводного раствора кислоты в скважину с целью её реакции на забое, как с пластом, так и с кольматантом[2]. Для карбонатных пород используется раствор соляной кислоты (HCL), для терригенных (состоящих преимущественно из глин, полевых шпатов и песка) – смесь соляной и фторводородной кислот (HF).

Первый патент на обработку известняка соляной кислотой получила компания Стандарт Ойл[3] в 1896 году. Сообщалось, что в результате проведённых испытаний продуктивность скважин возросла в три раза. Однако тогдашняя технология имела сильное побочное действие – кислотный состав разъедал обсадную колонну, что сильно сдерживало её применение. Использовать мышьяк как ингибитор коррозии начали только в 1932 году, после чего интерес к этой технологии значительно возрос: коммерческие услуги по кислотной обработке начала оказывать компания Халлибуртон[4].

Плавиковую кислоту (HF) применили в первый раз только в 1933 году, однако эксперимент был неудачным, так как эффективность работы скважины только снизилась. Только через семь лет в компании Дауэлл придумали добавлять соляную кислоту, что помогло в значительной степени уменьшить количество образовывавшихся осадков. Использованную смесь стали называть глинокислотой.

По мере развития науки и техники технология кислотной обработки также совершенствовалась: начали применять различные добавки (ингибиторы коррозии, поверхностно-активные вещества, стабилизаторы железа, механические и химические отклонители), новые кислоты (органические, бифторид-фторид аммония), другие способыпроведения процесса (циклическое воздействие,

---

[2] Вещество, закупоривающее поры призабойной зоны и тем самым снижающее её проницаемость. Может включать в себя фильтрат бурового раствора, частицы пласта, нерастворимые эмульсии и др.
[3]StandardOil – американская нефтяная компания, основанная в 1870 году Джоном Рокфеллером, вскоре ставшая монополистом в отрасли, из-за чего была разделена на несколько компаний в 1911 году. Её современным «наследником» считается крупнейшая в мире нефтяная корпорация ExxonMobil.
[4]Halliburton–американская нефтесервисная компания, одна из крупнейших в мире.

большеобъёмная селективная кислотная обработка, использование гибких насосно-компрессорных труб).

Следует отметить, что речь идёт о «структурной» кислотной обработке, в ходе которой кислотный состав нагнетается при давлении, меньшем давления развития трещины, то есть гидроразрыва не создаётся. Кислотный гидроразрыв пласта (КГРП) является большой отдельной темой, рассмотрение которой выходит за рамки данной работы.

В качестве основного компонента кислотного состава могут быть использованы соляная кислота и глинокислота, слабые органические кислоты могут использоваться в качестве добавок, но в качестве основного компонента выступают крайне редко. Процесс взаимодействия кислоты с пластом и скважинной аппаратурой достаточно сложный, соответственно при несоблюдении техники обработки возможны разные последствия, вплоть до остановки дебета скважины.По этой причине кислотный состав может включать большое количество компонентов: ингибиторы коррозии, буферные растворы, отклонители (для воздействия на целевой пласт), также сами кислоты могут иметь разную концентрацию в зависимости от условий.

В ходе подготовки к проведению процесса, исходя из набора параметров скважины и прискважинной зоны, составляют план работы (рисунок 1) . Он включает в себя данные по типу кислоты, составу раствора (с добавлением остальных компонентов), порядку закачки и другим технологическим вопросам.

К исходным параметрам, используемым при подготовке КО, можно отнести следующее: минералогический состав целевого пласта, температура, давление, плотность и другие свойствапластовых флюидов, размеры колонны, рабочее давление, зоны перфорации, наличие или отсутствие пакера и другое.

После сбора и подготовки перечисленной выше информации, заполняется план на химическую обработку, с которым знакомятся должностные лица. На рисунке 1 приведён пример такого документа. Затем вызывается бригада капитального ремонта (если объект обработки из нагнетающего фонда, то это необязательно), которая временно консервирует скважину, подвозит оборудование

для обработки и подключает его к ней. Специалисты готовят раствор, проверяют его качество, и при условии его соответствия всем требованиям, начинают закачку.

ПЛАН
на химобработку

Скважина № _____ Куст № _____ УПНП и КРС - ЦДНГ № _____
_____ _____ месторождения.

Цель работы: ***ОПЗ добывающей скв (HCL+БФФА) + ГКО*** ***37*** *м3*

Данные по скважине:

1. Диаметр э/колонны: ***178*114*** *мм,* толщина стенки ***9,2*7,4*** *мм.*
2. Давление опрессовки э/колонны: ***120*** *атм.*
3. Искусственный забой: _____ *м.* *текущий забой* ***н/о*** м
4. Интервал перфорации ***БВ-8/1*** *3622,06 - 3622,96 м; 3746,79 - 3747,69 м; 3874,07 - 3874,87 м*
5. Подземное оборудование: *псш* НКТ 2" ***710*** НКТ 2,5" ***2550*** м
6. Скважина заполнена: *раствор глушения* удел.вес ***1.01*** г/см³
7. Объем НКТ - ***9.1*** *м3* суммарный объём НКТ и ЭК до и.п. ***11.9*** м³
8. Состояние скважины перед обработкой: в ремонте *УПНП и КРС - 12*
9. Пакер на глубине - ***нет*** м. *Рпл.=* ***271*** *атм.*

Предусматривается: ***раствор глушения уд.весом 1,01 г/см3 = 10 м3.;***
10% соляная к-та (1% БФФА + 2% Лимонная к-та + 2% Нефенол К + 1% Алдинол МК) = 7 м3
10% грязевая к-та (2% Лимонная к-та + 2% Нефенол К + 1% Алдинол МК) = 7 м3
3% р-р хлористого аммония (1% Нефтенол ВВД + 2% Алдинол МК) = 13 м3
Для приготовления растворов использовать только пресную воду.

1. Завезти необходимое оборудование, произвести подготовительные работы.
2. Собрать нагнетательную линию и опрессовать на 180 атм.
3. Приготовить композиции химреагентов, для чего использовать: *24% грязевая кислота - **3,33** т.;*
   *24% соляная к-та - **3,27** тн.; БФФА - **0,075** тн.; лимонная к-та - **0,275** тн.;*
   *нефтенол К - **0,28** тн.; алдинол МК - **0,27** тн; нефтенол ВВД - **0,13** тн.;*
   *хл.аммоний - **0,4** тн;*
4. Закачать приготовленные композиции в скважину по *НКТ* в следующей последовательности:

Давление закачки не более - 120 атм. Замер приемистости при Р - 100 атм

4.1.	*Закачать по НКТ на циркуляции 3% раствор хл.аммония*	V=	3	м3.
4.2.	*Закачать по НКТ на циркуляции 10 % раствор (HCL + БФФА)*	V=	3	м3.
4.3.	*Закачать по НКТ на циркуляции 3% раствор хл.аммония*	V=	2	м3.
4.4.	*Закачать по НКТ на циркуляции 10 % раствор (HCL + БФФА)*	V=	1	м3.
4.6.	***Закрыть затрубное пространство***			
4.4.	*Закачать по НКТ на пласт 10 % раствор (HCL + БФФА)*	V=	3	м3.
4.7.	*Закачать по НКТ на пласт 3% раствор хл.аммония* ***с определением начальной приемистоти.*** *В случае низкой приемистости провести дренирование пласта*	V=	3	м3.
4.8.	*Закачать по НКТ 10% раствор грязевой кислоты*	V=	7	м3.
4.11.	*Закачать по НКТ 3% раствор хл.аммония*	V=	5	м3
4.12.	*Закачать по НКТ раствор глушения.* ***Замерить конечную приемистость***	V=	10	м3.

Дальнейшие работы по основной программе бригады КРС

Рисунок 1. Пример плана на кислотную обработку

При обработке карбонатных коллекторов закаченный состав оставляют в выдерживают в пласте ещё некоторое время, чтобы он прореагировал как можно

более эффективно. Далее закачивают нейтрализующий раствор (обычно это гидрокарбонат калия или натрия). В среднем, продолжительность реакции составляет около 3-8 часов.

При обработке терригенных коллекторов складывается немного другая ситуация. Так как плавиковая кислота реагирует очень быстро со шпатами и глинами, а соляная кислота служит только для предотвращения образования осадков, процесс стараются провести очень быстро, время реакции не превышает одного часа. После этого, закачивается нейтрализующий состав, и продукты реакции с непрореагировавшей кислотой продавливаются в глубину пласта.

Следует отметить, что операции по кислотной обработке, как и многие другие полевые работы, строго регламентированы внутренними нормативными документами компаний, осуществляющих работы. В них прописаны все должностные инструкции, требования к подготовительным работам, к наличию средств индивидуальной защиты у операторов, к подготовке и эксплуатации оборудования, к контролю над проведением операции для добывающих и нагнетательных скважин, к извлечению продуктов реакции, список возможных проблем и пути их устранения и т.д.

На данный момент на активах Компании план на кислотную обработку заполняется исходя из эмпирических соотношений, экспертного опыта, опыта разработки предыдущих месторождений. В соответствии с текущими требованиями к современному нефтяному инжинирингу, такой важный технологический процесс, как кислотная обработка, должен проектироваться с помощью моделирования в прикладных программных пакетах. Инженер на месторождении не в состоянии самостоятельно оценить профиль фильтрации жидкости в пласте, скорость химической реакции, которая к тому же зависит от термобарических условий. В таком случае не может идти и речи о сопоставлении нескольких технологических режимов и выбора среди них оптимального. Эта задача целиком и полностью должна быть возложена на вычислительное устройство.

Ухудшение фильтрационно-емкостных свойств породы может происходить при фильтрации через неё соленой воды за счёт забития свободного пространства матрицы породы отложениями солей. Поэтому обрабатывающий раствор в строгом порядке необходимо готовить только с использованием пресной воды (см. рисунок 1, после пункта 9).

Большое внимание уделяется проблеме воздействия раствора на целевой пласт. При попадании в призабойную зону, кислотный состав стремится попасть в наиболее проницаемую область, в то время как «проблемный» участок остаётся неизменённым. Для решения этой задачи применяют механические и химические отклонители.

Реакция с карбонатными породами может происходить по нескольким механизмам: поверхностное растворение, образование конических каналов, образование равномерных высокопроводящих каналов (доминантных червоточин), образование разветвлённых каналов и равномерное растворение по поверхности (1). Примеры изменения структуры призабойной зоны пласта представлены на рисунках 2, 3 и 4.

Рисунок 2. Рентгенография ПЗП в зависимости от механизма растворения породы (2)

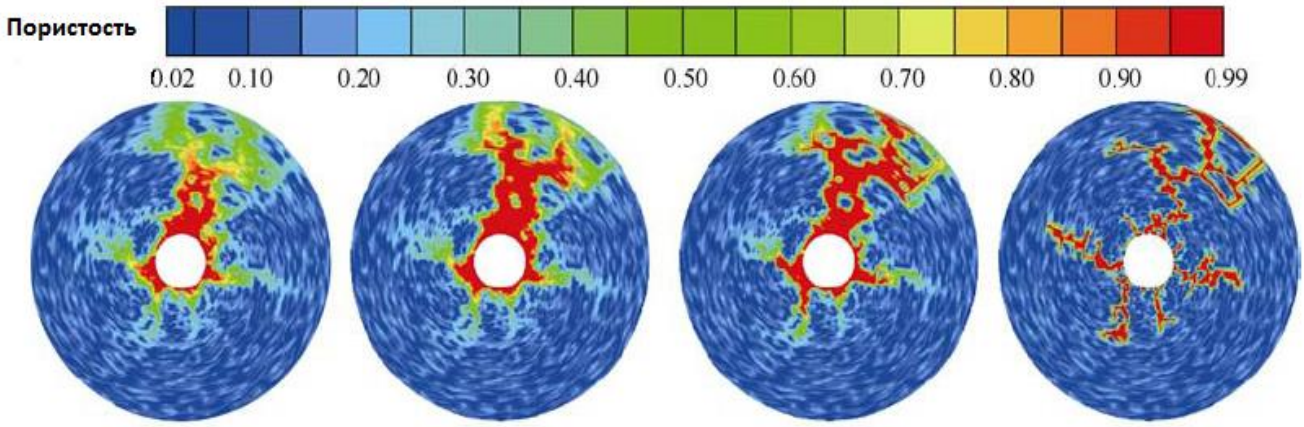

Рисунок 3. Моделирование структуры ПЗП (вид сверху) в зависимости от механизма растворения породы(3)

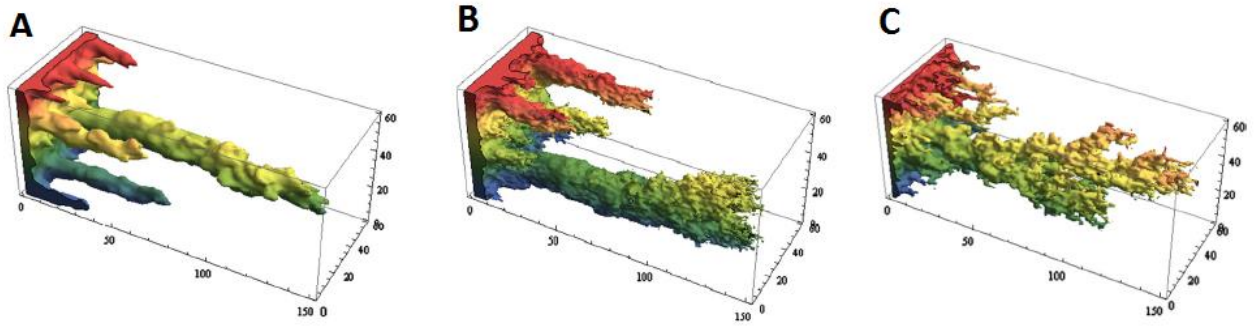

Рисунок 4. 3D - моделирование структуры ПЗП в зависимости от механизма растворения породы: (4)

Согласно авторам исследований, наилучший эффект достигается, когда в ходе закачки кислотного состава образуется доминантная червоточина (5). Теме моделирования кислотного воздействия на карбонатный пласт посвящено большое количество исследований, среди них стоит отметить таки авторов, как C.N. Fredd, H.S. Foggler, L. Ming, M.L. Hoefner, O.O. Akanni, R.R. Ratnakar, H.A. Nasr-El-Din, Г.Т. Булгакова, К.М. Фёдоров, Р.Д. Каневская, А.И. Никифоров, А.Р. Шарифуллин, Т.Р. Закиров. Так как процесс кислотного воздействия на карбонатные пласты на прямую не относится к теме данной работы, более подробно этот вопрос рассматриваться не будет.

Одной из главных целей КО в *терригенных* коллекторах является снижение механического повреждения за счёт очистки призабойной зоны от кольматанта. Однако так как на данный момент не разработан способ определения типа коль-

матанта, то невозможно автоматически подобрать необходимый кислотный состав исходя из целей растворения этих загрязнителей. Поэтому, при моделировании процессов, происходящих в призабойной зоне пласта, будет принято, что кольматант отсутствует.

Другим важным параметром является проницаемость, увеличить которую можно за счёт стимуляции матрицы породы кислотой. Это происходит следующим образом. Кислота, фильтруясь сквозь призабойную зону пласта, вступает в контакт с породой и тем самым растворяет часть её скелета.

Большинство авторов изученных исследований сходится во мнении, что реакция кислотного состава с терригенными породами проходит только по одному механизму – поверхностного растворения(5). Однако результаты исследований, на основе которых сделаны такие выводы, не приводятся. Различие в механизмах протекания процесса, скорее всего, объясняется различием в физикохимии процессов.

Таким образом, при проектировании дизайна кислотной обработки необходимо учитывать целый спектр технологических параметров. Если, к примеру, неправильно выбрать отклоняющий состав или вообще не учесть необходимость отклонения, можно получить различные осложнения, такие как загрязнение призабойной зоны пласта или прорыв водоносного горизонта, что перечеркнёт возможный экономический эффект от проведения операции по кислотной обработке скважины.

1.2. Описание физико-химических процессов

Количество кислоты, необходимое для растворения данного количества минерала, определяется стехиометрией химической реакции, которая показывает количество моль каждого компонента, вступающего в реакцию. Например, простая реакция между соляной кислотой (HCl) и кальцитом ($CaCO_3$) записывается следующим образом:

$$2HCl + CaCO_3 \rightarrow CaCl_2 + CO_2 + H_2O$$

Она показывает, что для растворения 1 моль CaCO3 необходимы 2 моль HCl. Числа 2 и 1, находящиеся при реагентах HCl и CaCO3 – это стехиометрические коэффициенты веществ, перед которыми они стоят. Когда фтористоводородная кислота взаимодействует с силикатами, могут происходить многочисленные побочные реакции, которые влияют на общую стехиометрию реакции. Например, когда HF взаимодействует с кварцем (SiO2), основная реакция:

$$4HF + SiO_2 \leftrightarrow SiF_4 + 2H_2O$$

в результате которой образуются тетрафторид кремния (SiF_4) и вода. Стехиометрия реакции показывает, что для растворения 1 моль SiO2 необходимо 4 моль HF. Однако образующийся SiF_4 может также реагировать с HF с образованием гексафторкремниевой кислоты (H_2SiF_6), по уравнению реакции

$$SiF_4 + 2HF \leftrightarrow H_2SiF_6$$

Если эта побочная реакция пройдет полностью, на растворение 1 моль кварца будет израсходовано 6 моль HF вместо 4. Также осложняет обстоятельства тот факт, что фторсиликаты могут существовать в различных формах (4), то есть полное количество HF, необходимое для растворения заданного количества кварца зависит от концентрации раствора.

Наиболее типичные реакции в процессах кислотной обработки объединены в таблице 1. Для реакций между HF и силикатами приведены только основные реакции; побочные реакции требуют большего количества HF и таким образом стехиометрия изменяется. Например, для реакций между HF и полевыми шпатами, основная реакция показывает, что для растворения 1 моль шпата необходимо 14 моль HF. Однако Р. Шехтер (10) полагает, что на 1 моль шпата расходуется около 20 моль HF при типичных условиях кислотной обработки.

Реакции кислоты с минералами являются гетерогенными, так как они проходят на границе раздела между различными фазами, кислотой в водной фазе и минералом в твердом состоянии.

Кинетика химической реакции – это закон, описывающий скорость химического взаимодействия между компонентами, вступающими в контакт. Реакция

между кислотой и минералом происходит при условии непосредственного контакта кислотной компоненты раствора с поверхностью минерала. Это может происходить как за счет диффузии, так и конвекции из объема раствора. Таким образом, скорость расходования кислоты определяется переносом её к поверхности минера, и реальной реакцией на его поверхности.

Таблица 1. Некоторые химические реакции, происходящие при кислотной обработке (12)

HCl
Кальцит:
$2HCl + CaCO_3 \rightarrow CaCl_2 + CO_2 + H_2O$
Доломит:
$4HCl + Ca(Mg)(CO_3)_2 \rightarrow CaCl_2 + MgCl_2 + 2CO_2 + 2H_2O$
Сидерит:
$2HCl + FeCO_3 \rightarrow FeCl_2 + CO_2 + H_2O$
HF/HCl
Кварц:
$4HF + SiO_2 \leftrightarrow SiF_4$ (тетрафторид кремния) $+ 2H_2O$
$SiF_4 + 2HF \leftrightarrow H_2SiF_6$ *(гексафторкремниевая кислота)*
Альбит (натриевый шпат):
$NaAlSi_3O_8 + 14HF + 2H^+ \leftrightarrow Na^+ + AlF_2^+ + 3SiF_4 + 8H_2O$
Ортоклаз (калиевый шпат):
$KAlSi_3O_8 + 14HF + 2H^+ \leftrightarrow K^+ + AlF_2^+ + 3SiF_4 + 8H_2O$
Каолинит:
$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 + 24HF + 4H^+ \leftrightarrow 4AlF_2^+ + 4SiF_4 + 18H_2O$
Монтмориллонит:
$Al_4Si_8O_{20}(OH)_4 + 40HF + 4H^+ \leftrightarrow 4AlF_2^+ + 8SiF_4 + 24H_2O$

Зачастую скорость одного процессапревалирует над другим, втаком случае более быструю реакцию можно не учитывать (т.к. её вклад в общее время процесса будет пренебрежимо меньше, чем медленной реакции). Например, скорость реакции кальцита с соляной кислотой очень высока, поэтому этот процесс в итоге лимитируется скоростью переноса кислоты на поверхность, (как более медленная стадия).

Обратная ситуация сложилась для реакций фтороводородной кислоты с минералами, так как они проходят достаточно медленно, их скорости очень малы

по сравнению с переносом кислоты, следовательно, общая скорость процесса определяется скоростью химической реакции.

1.3.Моделирование химических реакций

Согласно *закону действующих масс*: «Скорость химической реакции определяется как произведение реагирующих компонентов (исходных веществ) в соответствующих степенях стехиометрических коэффициентов, умноженное на константу скорости данной химической реакции». Иными словами, скорость реакции есть количество появляющихсяпродуктов реакции в единицу времени. Скорость реакции для гетерогенных систем[5] определяется площадьюреакционной поверхности. В общем случае, скорость реакции, проходящейна поверхности раздела фаз, между водным раствором компонента А, и минералом В, будет выражаться как:

$$R_A = r_A S_B$$

где R_A – скорость появления компонента А ($\frac{моль}{с}$), r_A – удельная скорость поверхностной реакции А [($\frac{моль}{с\ м^2}$)], а S_B – площадь поверхности минерала В.

Однако с высокой степенью точности концентрацией минерала можно пренебречь, так как она остаётся практически неизменной, если не ограничиваться ближайшей зоной пласта, а учитывать и большие расстояния. Включение концентрационной зависимости в выражение для скорости реакции приводит к уравнению:

$$-R_A = E_f C_A^{\alpha} S_B$$

где E_f – константа скорости реакции, в единицах моль А[$м^2 \cdot с \cdot \left(\frac{моль\ A}{м^3}\right)^{a}$],$C_A$ – концентрация вещества А, а α – стехиометрический коэффициент.

Определение константы скорости реакции имеет очень большое значение. Обычно, данная величина определяется по результатам лабораторных исследований, однако она сама не является «постоянной»: она зависит от концентрации

[5] Гетерогенными системами называются такие, в которых присутствуют чёткие поверхности (границы) раздела фаз.

электролитов в растворе, температуры проведения реакции и некоторых других параметров. Наличие растворённых веществ не оказывает такого большого влияния, как температура, поэтому, в целях упрощения и избавления от неопределённости, которая вызвана определением дополнительных «константных» величин, данную зависимость учитывать не будем.

Зависимость константы химической реакции от температуры определяется по уравнению Аррениуса:

$$E_f = E_f^o \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right)$$

Где E_f – константа скорости химической реакции ($\frac{моль}{с}$), E_f^0 – предэкспоненциальный множитель ($\frac{моль}{с}$), ΔE – энергия активации ($\frac{Дж}{моль}$), R – универсальная газовая постоянная ($\frac{Дж}{моль\ К}$).

Фтористоводородная кислота реагирует практически со всеми терригенными минералами.В литературе встречаются данные по кинетике реакций HF с кварцем (Бергман (Bergman) и др., 1963; Хилл (Hill) и др., 1981), полевым шпатом (Фоглер и др., 1975), и глиноземов (Клайн (Kline) и Фоглер, 1981). Все они могут быть выражены в виде

$$-r_{минерал} = E_f[1 + K(C_{HCl})^{\beta}]C_{HF}^{\alpha}$$

где α, β – эмпирические константы.

Кремнефтористоводородная (она же гексафторкремниевая) кислота образуется, когда HF растворяет силикатыс последующим взаимодействием с продуктами реакции. На модельных экспериментах по керну, Бриант и да Мотта (daMotta) и др. (10) выдвинули предположение, что реакция между гексафторкремниевой кислотой, глинами и шпатами протекает медленно, при температуренниже 50°C. Следовательно, в тех условиях. Когда температура реакции выше, однако, это заключение не подтверждено более точными экспериментами.

В пористых средах, состоящих из зернистых элементов, соединенных между собой порами нерегулярной формы, кислота доставляется к поверхности минералов, с помощью диффузии и конвекции. Точное описание процесса транспорта кислоты внутри пористой среды требует полноценной гидродинамической модели, а также подробной модели пористой среды, что на данный момент неоправданно трудоёмко.

Большое влияние на результат кислотной обработки, особенно для песчаников, имеет закупорка пор, которая возникает при осаждении продуктов реакции. При кислотной обработке песчаников с помощью HF образование ряда осадков практически неизбежно. Однако, величина ущерба, наносимого продуктивности скважины зависит от количества и расположения осадков. Эти факторы могут в какой-то мере контролироваться правильным планированием обработки. На рисунке 5 представлен экспериментальный график зависимости пористости керна от количества прокаченных поровых объёмов. Он показывает, что при недостаточном объёме закачки проницаемость может только ухудшиться.

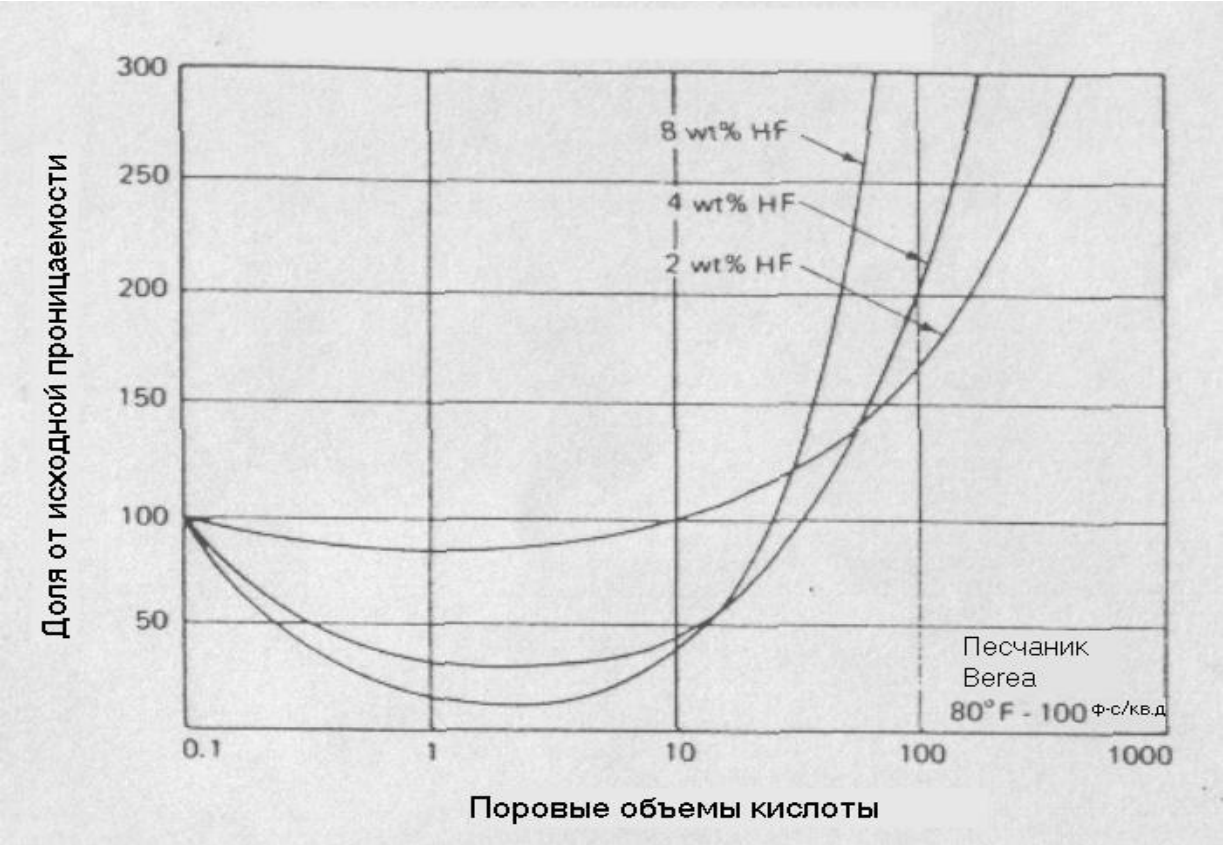

Рисунок 5. Кривые кислотной динамической характеристики (15)

Для терригенных минералов наиболее распространены следующие закупоривающие соединения: это фторид кальция (CaF_2), коллоидный кремнезем ($Si(OH)_4$), гидроксид железа ($Fe(OH)_3$) и асфальтеновые шламы. Фторид кальция обычно появляется в результате реакции кальцита с HF, в соответствии с реакцией:

$$CaCO_3 + 2HF \leftrightarrow CaF_2 + CO_2 + H2O$$

Фторид кальция очень малорастворим, так что осаждение CaF_2 вероятно, если существует возможность реакции кальцита с HF. Поэтому необходима предварительная обработка (preflush) ПЗП слабым раствором соляной кислоты.

1.4.Оценка эффективности операции

Предположим, что у скважины есть область закупорки пор размерами 1 фут вокруг ствола скважины (rw = 0,328 футов). Скважина находится на площади 40 акров (re = 745 футов). Определим отношение коэффициента продуктивности после удаления закупорки пор (с помощью кислотной обработки) к коэффициенту продуктивности скважины с закупоркой пор для проницаемостей в поврежденной области в интервале от 5% до 100% от проницаемости исходного пласта.

Далее, предполагая, что скважина изначально не имеет закупорки пор и кислота используется для увеличения проницаемости пласта в радиусе 1 фута вокруг ствола скважины в 20 раз по сравнению с исходным значением, рассчитаем отношение коэффициента продуктивности после обработки к коэффициенту продуктивности скважины без закупорки пор. В обоих случаях предполагается стационарное течение и отсутствие механического скин-эффекта.

Решение будет следующим. Отношение коэффициента продуктивности после воздействия к коэффициенту при закупорке пор, с учетом того, что s = 0, когда закупоривание пористой среды устраняется:

$$\frac{J_i}{J_d} = \frac{\ln(r_e / r_w) + s}{\ln(r_e / r_w)} \qquad (1.4.1)$$

Скин-эффект связан с проницаемостью и радиусом области повреждения формулой Хокинса. Подставляя значение s в уравнение (1.4.1), получим:

$$\frac{J_i}{J_d} = 1 + \left(\frac{1}{X_d} - 1 \right) \frac{\ln(r_s / r_w)}{\ln(r_e / r_w)} \tag{1.4.2}$$

где Xd – отношение проницаемости области закупорки пор к проницаемости исходного пласта. Для случая со значительной закупоркой пор, когда проницаемость этой области составляет 5% от исходной, скин-эффект поврежденной скважины будет иметь значение 26, а устранение закупорки пор кислотной обработкой увеличивает коэффициент продуктивности скважины в 4,5 раза. При проницаемости области закупорки пор в 20% от исходной (типичное значение для повреждения при бурении), исходный скин-эффект будет 5,6, а полное удаление закупорки пор увеличит коэффициент продуктивности примерно на 70%.

Для случая обработки скважины без закупорки пор, отношение коэффициента продуктивности после обработки к исходному будет следующим:

$$\frac{J_i}{J} = \frac{1}{1 + \left[(1/X_i) - 1 \right] \left[\ln(r_s / r_w) / \ln(r_e / r_w) \right]} \tag{1.4.3}$$

где Xi – отношение проницаемости после обработки к исходному значению. Для скважины без закупорки пор увеличение проницаемости в 20 раз в радиусе 1 фута вокруг скважины увеличивает коэффициент продуктивности только на 21%. На самом деле, если бы проницаемость в этой 1-футовой области была бесконечной (отсутствие сопротивления течению), то увеличение продуктивности составило бы 22%.

1.5.Дизайн кислотной обработки

Под дизайном кислотной обработки понимают определение всех технологических параметров её проведения таким образом, чтобы достичь максимального эффекта от операции. Согласно изученным литературным источникам, расчёту подлежат следующие параметры:

1. Скорость и давление закачки реагентов: определяют механизм растворения породы кислотой;

2. Время выдержки состава в пласте после окончания закачки: влияет на количество прореагировавшего минерала, если начать промывать рабочую зону слишком поздно, то возможно выпадение осадков;
3. Объём и состав кислотного раствора (с учётом наличия других компонентов и их взаимного влияния): влияют на количество прореагировавшего минерала, определяются из соображений эффективности;
4. Объём и количество отклоняющих составов: определяются структурой пласта;
5. Количество циклов закачки рабочей жидкости: определяется структурой пласта;
6. Объём закачиваемой жидкости на каждом этапе: комплексный параметр, определяемый из условий эффективности.

Очевидно, что все эти параметры должны определяться исходя из цели получить максимальную выгоду от процесса. Для этого необходимо спроектировать несколько дизайнов КО, сопоставить их, и выбрать тот, который приносит максимальный эффект. Однако, расчёт только одной фильтрации жидкости в пласте с учётом химических реакций является сложной задачей, решение которой у полевых инженеров займёт большое количество времени, не говоря уже о проектировании нескольких дизайнов. Следовательно, оптимальные параметры проведения процесса должны определяться с помощью компьютера.

Как сказано ранее, кислотная обработка ПЗП – это геолого-техническое мероприятие, которое полезно только в том случае, когда существующая закупорка пор призабойной зоны может быть устранена с помощью кислоты. Поэтому, первоочередная задача при планировании кислотной обработки – выявление причин падения дебета.

Оценить фильтрационное сопротивление без проведения дополнительных испытаний не представляется возможным. Для сильно искривленных скважин существует вклад в эту величину по причине, того, что её контакт с пластом увеличен. Даже если в ходе испытаний фильтрационное сопротивление оказа-

лось небольшим, эти показания необходимо перепроверить. Возможное восстановление фильтрационной способности пласта значительно повысит продуктивность работы скважины. В случае, когда обнаружено большое сопротивление, необходимо исследовать источники механического повреждения (неполное вскрытие, перфорационный скин и т.д.). Если механические несовершенства не объясняют падение дебета, то, скорее всего проблема это вызвано закупоркой пористой среды. В таком случае следует изучить отчёт по эксплуатации скважины, её рабочие характеристики, структуру пласта опыт на скважинах – аналогах. И уже на основании собранной информации определить, поддается ли существующая проблема решению с помощью кислотной обработки.В общем случае, если поры забитыфильтратом буровой жидкости, зернами породы или другими растворимыми осадками, то пористость успешно может быть устранена кислотной обработкой.

Таким образом, когда установлено, что причиной падения продуктивности является закупорка пор породы, то можно *начинать планирование кислотной обработки.*

Для терригенных коллекторов стандартный план на кислотную обработку следующий:

1. Предварительная закачка промывочного объёма HCl, около 750л/м породы (preflush);
2. После этого следует закачка 750-3000 л/мкислотного состава.
3. Последующее промывание дизтопливом, рассолом, хлоридом аммония или HCl вытесняет HF/HCl из трубопровода или ствола скважины.
4. Когда обработка завершается, использованная кислота должна быть немедленно добыта обратно, для уменьшения ущерба от осаждения продуктов реакции.

Кислотная обработка песчаников начинается с выбора типа и концентрации используемой кислоты,затем определяют объем предварительной промывки (preflush), смеси HF/HCl (активные компоненты) и последующие промывки, а

также требуемые скорость и давление нагнетания. Практически во всех кислотных обработках важным фактором является распределение кислоты – должна быть тщательно спланирована стратегия для обеспечения контакта достаточного объема кислоты со всеми продуктивными участками пласта.

Проведение обработки, включая размещение кислоты в пласте (с использованием отклонителей, устройств доставки кислоты в пласт), и методы мониторинга процесса также должны быть определены. Также, необходимо подобрать тип и количество используемых в обработке добавок, исходя из испытаний на породе и пластовых флюидах.

На текущий момент, как уже отмечалось ранее, концентрация основных компонентов (HCl и HF) кислотного состава, используемого в песчаниках или карбонатах, определяется на основе полевой практики. Долгое время стандартный состав включал 15% HClдля карбонатных пород, а для терригенных - 3% HF + 12% HCl, с предварительной обработкой (обязательной!!) 15% HCl. Последний состав стал настолько популярным, что получил название «глинокислота» из-за его воздействия на глинистые компоненты.

Однако в литературных источниках встречаются рекомендации по использованию растворов HF с ещё более низкой концентрацией (17). Положительные стороны таких растворов– это уменьшение вероятности выпадения осадков и более «щадящая» обработка призабойной зоны, что предотвратит её обрушение.

В работе МакЛеод (22) представлено руководство по подбору кислотного состава, основанное на обширной полевой практике. Его рекомендации для песчаниковых коллекторов показаны на рисунке 6. Эти рекомендации следует рассматривать не как жестко закрепленные правила, а скорее как отправную точку для планирования обработки. Позже, эти правила были пересмотрены рядом авторов, новые данные представлены на рисунке 7. В первую очередь стоит отметить, что был введен учёт температурных условий, что, конечно, поможет подбирать дизайн лучшим образом.

Рекомендации по кислотной обработке песчаников		
1983 год		
Условия	Основная кислота	Предварительная промывка
Растворимость HCl (>20%)	Использовать только HCl	
Высокая проницаемость (>100 md)		
Высокое содержание кварца (80%) ю низкая глина (<20%)	12% HCl, 3% HF	15% HCl
Высокое содержание полевого шпата (>20%)	13,5% HCl, 1,5% HF	15% HCl
Высокое содержание глины (>10%)	6,5% HCl, 1% HF	5% HCl с восстанавливающим реагентом
Высокое содержание глины с хлоритым железом	3% HCl, 0,5% HF	5% HCl с восстанавливающим реагентом
Низкая проницаемость (<10md)		
Низкое содержание глины (<5%)	6% HCl, 1,5% HF	7,5% HCl или 10% уксусная кислота
Высокое содержание хлорита	3% HCl, 0,5% HF	5% уксусная кислота

Рисунок 6. Рекомендации по подбору кислотного состава МакЛеод (22)

1990 год				
Минералогия		Проницаемость		
		> 100 мД	20 - 100 мД	< 20 мД
Высокое содержание кварца (>80%), низкое содержание глина (<10%)	< 93°C	12% HCl, 3% HF	10% HCl, 2% HF	6% HCl, 1,5% HF
Высокое содержание глины (>10%), низкое содержание ила (<10%)		7,5% HCl, 3% HF	6% HCl, 1% HF	4% HCl, 0,5% HF
		10% HCl, 1,5% HF	8% HCl, 1% HF	6% HCl, 0,5% HF
Высокое содержание глины (>10%), высокое содержание ила (>10%)		12% HCl, 1,5% HF	10% HCl, 1% HF	8% HCl, 0,5% HF
Низкое содержание глины (<10%), высокое содержание ила (>10%)	> 93°C	10% HCl, 2% HF	6% HCl, 1,5% HF	6% HCl, 1,5% HF
		6% HCl, 1% HF	4% HCl, 0,5% HF	4% HCl, 0,5% HF
		8% HCl, 1% HF	6% HCl, 0,5% HF	6% HCl, 0,5% HF
		10% HCl, 1% HF	8% HCl, 0,5% HF	8% HCl, 0,5% HF

Рисунок 7. Рекомендации по подбору кислотного состава (22)

Метод лабораторного тестирования изменения давления в ходе закачки кислотного состава в керн заслуживает внимания, если есть цель более точного выбора оптимального количества кислоты, особенно если необходимо обработать много скважин в определенной породе. Такие тесты обычно состоят в пропускании кислоты через небольшой керн (обычно 1 дюйм в диаметре и 3 дюйма длиной), и наблюдении за изменением проницаемости через измерение перепада давления в нём.

Нельзя ожидать, что результаты тестирования на коротком керне позволят точно предсказать отклик скважины, они скорее должны быть использованы как руководство для полевых испытаний, или в качестве исходных данных для всесторонней модели кислотной обработки. Эксперименты на длинных кернах, как

сообщают Чеюнг (Cheung) и Ван Арсдейл (VanArsdale) (17), более точно отражают полевые условия; однако такие эксперименты дороги и трудны для проведения.

Очевидной целью кислотной обработки песчаников является устранение закупорки пор породы в призабойной зоне. Менее очевидной, но столь же важной целью является уменьшение закупорки пор, связанной с самими процессами кислотной обработки. Эти две цели могут в одно и то же время противоречить друг другу. Например, если существует поверхностная зона закупорки пор вокруг перфорации (т.е. 2 или менее дюйма области закупорки пор), она может быть удалена минимальным количеством кислоты путем нагнетания с малой скоростью, таким образом, чтобы большая часть кислоты реагировала в пределах 2-дюймовой зоны повреждения. Однако, столь медленная скорость может привести к формированию осадков из отработанной кислоты в непосредственной близости к перфорации, что уменьшает общую производительность по кислоте. Таким образом, оптимальная скорость, выбранная только на основании растворения минерала в области закупорки пор, может не соответствовать оптимуму при рассмотрении всего процесса кислотной обработки.

Аналогично, выбор оптимального объема кислоты осложняется побочными эффектами. Во-первых, необходимый объем кислоты сильно зависит от глубины расположения области закупорки пор, а эта глубина редко известна с приемлемой точностью. Делая допущение о глубине области повреждения, на основании кислотной динамической характеристики или модели кислотной обработки может быть выбран оптимальный объем для конкретного размещения в скважине. Однако кислота в основном будет распределена неравномерно по всем участкам пласта. Для обеспечения контактирования достаточного количества кислоты с основной частью породы может быть необходимо большее количество кислоты, это будет зависеть в основном от технологии, используемой для распределения кислоты.

Таким образом, планирование кислотной обработки песчаников будет включать неопределенность. Рекомендуемый здесь подход – это выбор целевого объема кислоты, основываясь на модели процесса кислотной обработки. Затем обработка должна проводиться таким образом, чтобы ее можно было бы оптимизировать «на ходу» для отдельной скважины. Необходимо либо найти готовый программный продукт для моделирования КО в терригенных коллекторах, либо разработать свой. Во втором случае также встанет задача определения модели процесса, на основе которой он будет работать софт.

1.6. Обзор программного обеспечения для моделирования КО

Был проведён поиск программных продуктов, в функционал которых входит моделирование кислотной обработки. Так как было найдено небольшое количество программ, моделирующих данный процесс в терригенных коллекторах, то обзор также включено ПО и для карбонатных коллекторов.

В рамках проведения исследования рынка программных продуктов для моделирования и дизайна кислотной обработки скважин были проанализированы предлагаемые решения как от ведущих представителей рынка (CarboCeramics, CMG, Schlumberger, Halliburton, Роснефть, BAKER HUGHES), так и от небольших компаний (SMAPE, PETROLEUMSOFT, PegasusVertexInc., Petrex и т.д.).

К недостаткам, характерным для большинства представленных программных продуктов можно отнести то, что многие имеют «закрытый» код, то есть даже при приобретении лицензии на использование, нет возможности открыть программный код программы и оценить, какие уравнения и модели были заложены в неё.

Также стоит отметить, что, скорее всего, весь представленный софт достаточно сложный и для полного его освоения нужно пройти дополнительные курсы или как минимум подробно ознакомиться с мануалом. Однако, по большей части не удалось найти информацию по обучающим курсам от компаний – производителей ПО. К тому же не для каждого программного продукта была

найдена инструкция по работе, а если и была, то на английском, что делает её освоение довольно затруднительным.

Тем не менее, в научных публикациях встречаются упоминания об использовании некоторых продуктов, что говорит об их качестве, распространённости и обладанием доверия в профессиональной среде. Было найдено некоторое количество статей, в которых расчёты проводились с использованием симуляторов UTCHEM, CMG STARS, STIMPRO, ECLIPSE, PHREEQC.

Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ

Прежде всего, стоит отметить, что по сравнению с карбонатными коллекторами, для терригенных было найдено значительно меньшее число публикаций, касающихся темы исследования. Неизвестно, чем это можно объяснить - меньшим научным интересом, незаинтересованностью заказчиков исследований или сложной природой явления. Значительная часть работ опирается на уравнение баланса массы, другая - на предположение о локальном равновесии. В любом случае расход кислотного состава учитывается с помощью уравнений химической кинетики (хотя возможно применение эмпирических соотношений, либо их комбинирование).

Химическая кинетика – раздел физической химии, исследующий скорости проведения реакций и их зависимость от других параметров. Согласно Закону действующих масс: «Скорость химической реакции определяется как произведение константы скорости реакции и концентраций реагирующих компонентов, возведённых в соответствующие стехиометрические коэффициенты». Однако не всегда стехиометрические коэффициенты отображают протекающий процесс верно, в таком случае их нужно переопределять эмпирически. Константа скорости химической реакции определяется экспериментально. Также, её зависимость от термобарических условий выражается уравнением Аррениуса, для которого, в свою очередь, тоже нужно определить экспериментальные величины.

Положение о локальном равновесии утверждает, что часть реакций находятся в равновесии (то есть скорость прямой реакции равна скорости обратной) при достижении определённой концентрации. Константа равновесия служит для определения наступления равновесия и поведения системы в нём. Эта величина также зависит от термобарических условий, и её пересчёт достаточно сложная задача.

2.1.Модель двух минералов

Согласно авторам работы [1], широкое распространение получила модель двух минералов, которая относит все минералы к одной из двух категорий: быстрореагирующие и медленно-реагирующие. Шпаты, аутогенные глины и аморфный кремний принимаются как быстрореагирующие, в то время как обломочные глинистые частицы и зерна кварца являются основными медленно-реагирующими минералами. Модель состоит из материального баланса для HF и для реагирующих минералов, что для линейного течения, такого как поток в керне, может быть записано как

$$\frac{\partial(\phi\, C_{HF)}}{\partial t} + u\frac{\partial C_{HF}}{\partial x} = -(S_F^* V_F E_{f,F} + S_S^* V_S E_{f,S})(1-\phi)C_{HF}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[(1-\phi)V_F\right] = \frac{-MW_{HF} S_F^* V_F \beta_F E_{f,F} C_{HF}}{\rho_F}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[(1-\phi)V_S\right] = \frac{-MW_{HF} S_S^* V_S \beta_S E_{f,S} C_{HF}}{\rho_S}$$

В этих уравнениях ф – пористость минералов, C_{HF} – концентрация HF в растворе, u – поток кислоты, x – расстояние, S^*_F и S^*_S – удельные площади поверхности, V_F и V_S – объемные доли, $E_{f,F}$ и $E_{f,S}$ – константы скорости реакции (на основании скорости расходования HF), M_{WF} и M_{WS} – молекулярные массы, β_F и β_S – растворяющая способность 100% HF, ρ_F и ρ_S – плотность быстро - и медленно-реагирующих минералов соответственно. Также данная модель предусматривает два безразмерных параметра: число Дамкёллера и коэффициент кислотной ёмкости.

Число Дамкёллера – это отношение скорости расходования кислоты к скорости её конвекции. Для быстрореагирующих минералов:

$$N_{Da,F} = \frac{(1-\phi_0)V_F^0 E_{f,F} S_F^* L}{u}$$

где L – длина керна, V_f^0 – характерный объём минерала.

Коэффициент кислотной емкости – это отношение количества минерала, растворенного кислотой, занимающей единицу объема порового пространства породы к количеству минерала в единице объема породы, что для быстрореагирующего минерала составляет:

$$N_{Ac,F} = \frac{\phi \beta C_{HF}^{0} \rho_{Acid}}{(1-\phi) V_{F}^{0} \rho_{F}}$$

Для медленно реагирующих минералов оба коэффициента определяются аналогично.

С помощью данной модели можно определить профиль концентрации кислоты в пласте, изменение состава минерала. Для пересчёта пористости в про-ницаемость можно использовать корреляцию Козени – Кармана или другие.

Для данной системы уравнений выведены асимптотические решение при больших значениях числа Дамкёллера (>100). Однако, острой необходимости в аналитических выражениях для задач определения оптимального дизайна нет, поскольку эти выражения можно решить численно, используя, например, метод конечных разностей.

Несмотря на то, что согласно авторам, данная модель широко распространена, она не учитывает возможность образования осадка, выпадение которого может сильно повлиять на этот процесс. Есть исследования, в которых утверждается, что это явление нельзя игнорировать, так как накопление осадка может привести к уменьшению проницаемости. В таком случае эффект от кислотной обработки будет отрицательным. Также есть сведения, что данная модель плохо описывает КО в коллекторах с повышенной температурой.

2.2.Модель двух кислот, трёх минералов

Авторы работы [2] пишут о том, что модель двух минералов не описывает процесс кислотной обработки песчаников адекватно при повышенных температурах, а также при наличии реакции кремнефтористоводородной (гексафторкремниевой) кислоты (H_2SiF_6) с алюмосиликатами (быстрореагирующими минералами), которую эта модель не учитывает. В связи с этим была разработана

модель двух кислот, трёх минералов, в которую, по сравнению с предыдущей, была добавлена следующая реакция:

H_2SiF_6 + быстрореагирующий минерал→ $Si(OH)_4$ + все фториды

Практическая значимость ее заключается в том, что для растворения быстрореагирующих минералов с помощью данного количества кислоты будет необходимо меньшее количество HF, так как гексафторкремниевая кислота также будет реагировать с этими минералами, и продукт реакции, $Si(OH)_4$, силикагель, будет осаждаться. Эта реакция позволяет активной HF проникать глубже в породу; цена этого – потенциальный риск образования закупоривающих осадков. Модель двух кислот и трех минералов не была глубоко исследована. Однако она показывает, что использование модели двух минералов для предсказания требуемых объемов кислоты является консервативным подходом, особенно для высокотемпературных обработок.

2.3.Модель локального равновесия

Модель двух кислот и трех минералов рассматривает осаждение силикагеля при описании процесса кислотной обработки. Однако существуют множество других реакций, продукты которых могут осаждаться. Тенденция к осаждению продукта реакции изучается с помощью комплексных геохимических моделей, которые рассматривают большое количество возможных взаимодействий, которые могут происходить при кислотной обработке песчаников.

Наиболее распространенный тип геохимической модели, используемой для изучения кислотной обработки песчаников – это модель локального равновесия, описанная работе (Уолш и др. (1982)). Эта модель предполагает, что все реакции находятся в локальном равновесии, т.е. их скорости бесконечно высоки. Кроме распределения профиля закачки она способна спрогнозировать выпадение осадка в зависимости от режима проведения процесса.Модель включает в себя уравнение:

$$\frac{\partial(\phi C_i^t)}{\partial t} + v\frac{\partial}{\partial x}(\sum_{j=1}^{J} h_{ij}C_j) - \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\phi\sum_{j=1}^{J} K_{tj}h_{ij}C_j\right) = 0$$

где C_i^t- суммарная концентрация i-ого элемента; C_i -концентрация i-ого элемента в водной фазе; h_{ij} - стехиометрическая константа взаимодействия вещества i с j. Изменение концентрации веществ за счёт химической реакции определяется соотношением:

$$C_i^t = \sum_{j=1}^{J} h_{ij}C_j + \sum_{k=1}^{K} g_{ik}\hat{C}_k$$

где C^_k – концентрация минерала, g_ik – стехиометрическая константа взаимодействия соединения i с минералом k. С учётом ввода безразмерных расстояния xD и времени tD (относительно размера керна), получаем следующее выражение:

$$\frac{\partial}{\partial t_D}(C_i^t) + \frac{\partial}{\partial x_D}(\sum_{j=1}^{J} h_{ij}C_j) - \frac{1}{N_{Pe}}\frac{\partial^2}{\partial {x_D}^2}\left(\sum_{j=1}^{J} h_{ij}\, C_j\right) = 0$$

где N_{Pe} число *Пекле*, безразмерный параметр, отношение конвективного переноса к молекулярной диффузии, определяется по соотношению:

$$N_{Pe} = \frac{vL}{K\phi}$$

где v – скорость потока, L – длина керна, К – константа равновесия реакции, ф – начальная пористость.

Для данной модели необходимо большое количество экспериментальных данных, описывающих взаимодействие кислота - кислота, кислота – минерал, кислота – продукт реакции и т.д. Перечень возможных реакций с константами равновесия представлен на рисунке 3. Использование данных по химическому равновесию позволяет отказаться от необходимости использовать константы скоростей реакций, определение которых бывает достаточно затруднительно. В тоже время, исходя только из одного равновесия не получится установить оптимальную скорость закачки состава, что накладывает значительные ограничения на применение данной модели.

№	Реакция	Константа равновесия
1	$AlF^{+2} \rightleftharpoons F^- + Al^{+3}$	−6.13
2	$AlF_2^+ \rightleftharpoons 2F^- + Al^{+3}$	−12.75
3	$AlF_3 \rightleftharpoons 3F^- + Al^{+3}$	−17.02
4	$AlF_4^- \rightleftharpoons 4F^- + Al^{+3}$	−19.72
5	$AlF_5^{-2} \rightleftharpoons 5F^- + Al^{+3}$	−21.35
6	$AlF_6^{-3} \rightleftharpoons 6F^- + Al^{+3}$	−21.81
7	$SiF_4 \rightleftharpoons H_4SiO_4 + 4F^- + 4H^+ - 4H_2O$	−21.75
8	$SiF_6^{-2} \rightleftharpoons H_4SiO_4 + 6F^- + 4H^+ - 4H_2O$	−27.76
9	$HF \rightleftharpoons H^+ + F^-$	−3.18
10	$HF_2^- \rightleftharpoons H^+ + 2F^-$	−3.70
11	$H_3SiO_4 \rightleftharpoons H_4SiO_4 - H^+$	9.93
12	$H_2SiO_4^{-2} \rightleftharpoons H_4SiO_4 - 2H^+$	21.62
13	$OH^- \rightleftharpoons H_2O - H^+$	14.00
14	$AlOH^{+2} \rightleftharpoons Al^{+3} - H^+ + H_2O$	5.01
15	$Al(OH)_2^+ \rightleftharpoons Al^{+3} - 2H^+ + 2H_2O$	9.60
16	$HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{-2}$	−10.33
17	$H_2CO_3 \rightleftharpoons 2H^+ + CO_3^{-2}$	−16.67
18	$CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{+2} + CO_3^{-2}$	−3.20
19	$CaHCO_3^+ \rightleftharpoons Ca^{+2} + H^+ + CO_3^{-2}$	−11.55
20	$HCl \rightleftharpoons H^+ + Cl^-$	6.10
21	$Ca(OH)^+ \rightleftharpoons Ca^{-2} - H^+ + H_2O$	12.60
22	$CaF_2 \rightleftharpoons Ca^{+2} + 2F^-$	0.82
23	$Al(OH)_4^- \rightleftharpoons Al^{+3} - 4H^+ + 4H_2O$	22.06

Рисунок 8 – Список равновесных реакций при КО песчаников с константами равновесия

2.4.Модель KGEOFLOW

Данная модель, согласно авторам [4], основана на теории локального равновесия и позволяет учесть множество комбинаций химических реакций, которые могут протекать в пласте при проведении кислотной обработки. В ней объединяется подходы предыдущих моделей, таким образом, что часть реакций представляется равновесными, а другие – определяются кинетикой. Данный подход должен значительно увеличить предсказательную способность симулятора. В модель заложены следующие допущения:

1. Пласт представляется в виде одномерной изотермической структуры
2. Кислотный раствор фильтруется через пласт с постоянной скоростью
3. Отклонение жидкости незначительно
4. Минеральная составляющая пласта неподвижна
5. Пористость слабо зависит от концентрации минералов

Авторы исследования также пишут, что ими был разработан геохимический симулятор KGEOFLOW, который включает в себя: базу данных констант кинетики и равновесия, модуль решения системы дифференциальных уравнений,

отображение графической составляющей, модуль определения оптимальной скорости закачки.

В модель входят следующие уравнения:

$$\frac{\partial C_m}{\partial t_D} = \frac{t_o}{\phi_o} v_{mm} R_m$$

$$\frac{\partial}{\partial t_D}\left[e_{ja} + \bar{e}_{js} - \sum_{m=1}^{N_k} a_{jm}\bar{C}_m\right] + \frac{\partial e_{ja}}{\partial x_D} = -\frac{\tau_o}{\phi_o}\sum_{m=1}^{N_k} a_{im} v_{mm} R_m$$

где x_D и t_D безразмерное время (определяются как в модели локального равновесия), C_m – молярная плотность минерала г-моль/литр, τ_0- начальное время пребывания в порах, v_{mm} – стехиометрический коэффициент реакции, R_m – m-ой скорость реакции, e_{ij} - моляльность минерала, моль/литр растворителя, a_{ij}- термодинамический коэффициент активности.

Данная модель существенно сложнее всех остальных, что приведёт кувеличения вычислительной сложности и времени работы. Также она требует дополнительных расчётов коэффициентов активности в соответствии с уравнением Дебая – Хюккеля, для которого нужны дополнительные экспериментальные данные. Если закон действующих масс применим для всех технологических условий, то относительно описательной способности теории Дебая – Хюккеля есть сомнения, поскольку она достаточно сложная, для тех же целей есть и другие соотношения. Также нужны исследования по зависимости термодинамических параметров от термобарических условий проведения процесса.

В рассмотренной работе вычисления проводятся в симуляторе KGEOFLOW, и нет возможности самим удостовериться в правильности работы данного программного обеспечения.

2.5.Модель Куина – Лейка- Шехтера

Модель Куина – Лейка – Шехтера [5] основывается на уравнениях химической кинетики, но при этом упрощая «химизм» процесса, а также учитывает образование осадка в процессе КО. На основании численного эксперимента сде-

лан вывод о том, что высокий уровень закачки кислотного состава даёт наибольшее увеличение коэффициента продуктивности, даже несмотря на то, что в таком случае повреждённая зона очищается не полностью. В модели принимается, что типичная скорость взаимодействия плавиковой кислоты с минералов определяется как

$$r_k = -E_f C_{HF}^a$$

где r_K – скорость реакции, EF – константа скорости реакции, , CHF – концентрация кислоты, a – эмпирическая константа, зависящая от механизма проведения процесса. Так как реакция происходит на поверхности, то концентрация минерала принимается постоянной и не учитывается в уравнении. Константа скорости химической реакции – термодинамическая величина, определяемая по уравнению Аррениуса:

$$E_f = A\, exp(-\frac{\Delta E}{RT})$$

где A – предэкспоненциальный множитель, ΔE – энергия активации, R - универсальная газовая постоянная, T – температура (K). Все эти параметры подлежат экспериментальному определению. Если принять, что скорость реакции не лимитируется массопереносом, то объёмная скорость реакции определяется как:

$$R_k = \hat{S}_k M_k \phi p_k r_k$$

где $\hat{S}_k$ – приведённая площадь реагирующей поверхности, p_K – молярная плотность к-ого минерал. Также в модель включена зависимость проницаемости от пористости, основанная на корреляции Козени - Кармана:

$$k_a = \frac{\ln(\frac{r_S}{r_W})}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{k_i} \ln(\frac{r_i}{r_{i-1}})}$$

где r_S – радиус скважины, r_w – радиус дренирования, k_i – проницаемость i-ой зоны пласта, r_i – радиус i-ой зоны пласта. Данная модель также требует большого количества термодинамических данных, а также по зависимостям этих данных от термобарических условий.

Formula Name	SCP (kJ/mol)	Formula	SCP (kJ/mol)
Aqueous Species			
H_2O	−233.12	$AlOH^{+2}$	−694.10
O_2	18.76	$Al(OH)_2^+$	−904.46
H^+	0.000	$Al(OH)_4^-$	−1307.60
H_2	19.43	Na^+	−263.73
OH^-	−151.14	K^+	−285.86
F^-	−274.28	H_4SiO_4	−1295.61
HF	−294.87	$H_3SiO_4^-$	−1236.68
HF_2^-	−572.06	$H_2SiO_4^{-2}$	−1177.00
Cl^-	−128.22	AlF^{+2}	−802.85
$SiF_4(H_2O)_2$	−2043.17	AlF_2^+	−1110.26
$SiF_5(OH_2)^-$	−2119.30	AlF_3	−1408.02
SiF_6^{-2}	−2188.30	AlF_4^-	−1698.23
Al^{+3}	−481.14	AlF_5^{-2}	−1980.02
AlO_2^-	−822.52	HCl	−96.41
Mineral Species			
Quartz (SiO_2)	−851.75		
AlF_3	−1418.45		
Colloid silica [$Si(OH)_4$]	−1311.94		
Na_2SiF_6	−2741.17		
Microcline ($KAlSi_3O_8$)	−3724.23		
K_2SiF_6	−2785.40		
Albite ($NaAlSi_3O_8$)	−3692.95		
Na_3AlF_6	−3125.07		
Kaolinite [$Al_2Si_2O_5(OH)_4$]	−3773.13		
K_3AlF_8	−3148.91		

Рисунок 9 – Данные для модели КЛШ.

2.6. Четырёхпараметрическая модель

Данная модель, согласно авторам [6], основана на модели двух минералов с тем усложнением, что она учитывает побочные реакции вида:

$$a\ HF + b\ \text{Минерал} = c\ H_2SiF_6 + d\ \text{побочные продукты}$$

$$e\ H_2SiF_6 + f\ \text{Минерал} = g\ Si(OH)_4 + h\ \text{побочные продукты}$$

где с a по h – стехиометрические коэффициенты.

Обе данных реакции, согласно авторам, относятся к реакциям первого порядка, соответственно их кинетика может быть записана в виде:

$$r_k = -K_k C_{HF} C_{min,k}$$

где r_k – скорость реакции, K_K – константа скорости реакции, $C_{min,k}$ - концентрация к-ого минерала. Образование кремнефтористоводородной кислоты происходит преимущественно в пластах с высокой температурой. Она, также как и фторово-

дородная кислота, вступает в дальнейшую реакцию с минералами, то есть служит ещё одним растворителем. Таким образом, если не учесть её образование, то количество кислотного состава будет избыточным.

Уравнение материального баланса фтороводородной кислоты:

$$\frac{\partial C_{AD1}}{\partial r_D} + \frac{\partial C_{AD1}}{\partial t_D} = -\left(\sum_{j=1}^{2} N_{Daj} C_{mDj}\right) C_{AD1} - v_8 N_{Da3} C_{md3} C_{AD1}$$

уравнение материального баланса для кремнефтористоводородной кислоты:

$$\frac{\partial C_{AD2}}{\partial r_D} + \frac{\partial C_{AD2}}{\partial t_D} = \left(\frac{v_5}{v_1} N_{Da1} C_{mD1} + \frac{v_6}{v_2} N_{Da2} C_{mD2} + \frac{v_7}{v_3} N_{Da3} C_{mD3}\right) C_{AD1} - N_{Da4} C_{mD1} C_{AD2}$$

Уравнение материального баланса для быстро реагирующего минерала:

$$\frac{\partial C_{mD1}}{\partial t_D} = [-N_{Da1} N_{Ac1} - N_{Da4} N_{Ac4} C_{AD2}] C_{mD1}$$

уравнение материального баланса для быстро реагирующего минерала:

$$\frac{\partial C_{mD2}}{\partial t_D} = -N_{Da24} N_{AC24} C_{mD2} C_{AD1}$$

уравнение материального баланса гидроксида кремния:

$$\frac{\partial C_{mD3}}{\partial t_D} = N_{Da} N_{Ac4} C_{mD1} C_{AD2} - N_{Da3} N_{Ac3} C_{mD3} C_{AD1}$$

где C_{AD1} – безразмерная концентрация HF (относительно начальной), C_{AD2} – безразмерная концентрация H_2SiF_6 (относительно начальной), C_{AD3} – безразмерная концентрация минерала (1-глина, 2 –кварц, 3 – гидроксид кремния), N_{Ac} – коэффициент кислотной ёмкости, N_{Da} – безразмерное число Дамкёллера, v – стехиометрические коэффициенты.

Таким образом, данная модель базируется на модели двух минералов с усложнением в виде кинетики реакции образования кремнефтористоводородной кислоты и её реакции с минералом. Данная модель сочетает в себе простоту (не требует большого количества уравнений экспериментальных данных) и в то же время она не упрощает описание процесса до простого набора уравнений кинетики или до модели двух минералов. Авторами работы были представлены результаты экспериментов в сравнении с модельными расчётами, которые достаточно точно совпадают.

2.7. Улучшенная модель воздействия глинокислоты на терригенные коллекторы

Модель двух минералов, как уже отмечалось, имеет широкое распространение. Возможно, в виду её популярности, она послужила базой и для других исследователей. В их числе – авторы рассматриваемой работы [7], они дополняют свою разработку тем, что вносят в систему уравнений учёт образования кремнефтористоводородной кислоты и её взаимодействия с другими минералами:

$$H_2SiF_6 + \text{Минерал} = Si(OH)_4 + \text{побочные продукты}$$

Авторы работы считают, что побочный продукт – кремнефтористоводородная кислота – может образовываться при реакции фтороводорода с любым минералом, содержащим кремний. В связи с этим они вводят следующее уравнение, которое

$$R_3 = -\lambda_3 C_{f.a.} C_{Min.1}\,\theta$$

$$\frac{\partial(kC_{M1})}{\partial t_D} = k(-N_{Da1}N_{Ac1}C_H C_{M1}\theta - N_{Da3}N_{Ac3}C_F C_{M1}\theta)$$

$$\frac{\partial(kC_{M2})}{\partial t_D} = k(-N_{Da2}N_{Ac2}C_H C_{M2} - N_{Da3}N_{Z3}C_F C_{M1}\theta)$$

$$\frac{\partial(kC_{M3})}{\partial t_D} = k(-N_{Da3}N_{z4}C_F C_{M1}\theta - N_{Da4}N_{Ac4}C_H C_s)$$

где $C_{f.a.}$ – концентрация HF, $C_{Min.1}$ – концентрация минерала, θ – доля поверхности, не покрытая гидроксидом кремния, где CH – концентрация HF, t_D – безразмерное время,к – отношение пористости к начальной, N_{Da} – число Дамкёллера, C_M – концентрация минерала, N_z – стехиометрический коэффициент, L_D – безразмерная длина.

2.8. Модель Бернта - Робертса

Модель Бернта – Робертса [8] учитывает взаимодействие кислот с восемью минералами (вместо двух, трёх или четырёх как в большинстве остальных), а также эмпирические корреляции для определения химического равновесия между различными соединениями фтора с кремнием и алюминием. Существенное отличие данной модели от остальных в том, что она не требует определения

коэффициента кислотной ёмкости и числа Дамкёллера. Для определения изменения пористости предлагается использовать известные корреляции. Также, в модель можно легко добавить учёт реакции с другими минералами, если не могут быть аппроксимированы один из восьми уже учитывающихся. Согласно авторам, численное решение модели не занимает большого количества времени. Учтены реакции следующего типа:

$$SiO_2 + m\,HF \rightarrow H_{(m-4)}SiF_m + 2\,H_2O$$

$$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 + 4\,(n+m)HF + (28-(4(n+m))\,H_3O^+ \rightarrow 4\,AlF_n^{(3-n)} + 4\,SiF_m^{(4-m)} + (46-4(n+m))\,H_2O$$

$$MAlSi_3O_8 + (n+3m)HF + (16-n-3m)H_3O^+ \rightarrow M^+ + AlF_n^{(3-n)} + 3\,SiF_n^{(4-m)} + (24-n-3m)H_2O$$

где m и n – стехиометрические константы, зависящие от пути проведения процесса, термодинамических условий и т.д., принимающие значения от 0 до 6 и от 4 до 6 соответственно; M = (Na или K). Дополнительные исследования показывают, что m и n нужно принять равными 5.

Уравнения кинетики записываются в следующем виде. Для основных реакций:

$$rate = k_p[M][HF]r_p$$

Для вторичных реакций:

$$rate = k_s[M]\left[H_{(m-4)}SiF_m\right]r_p$$

Для третичных реакций:

$$rate = k_t[M][AlF_2][H^+]r_p$$

где k_p, k_s, k_t – константы скорости соответствующих реакций (определяемые при соответствующих термобарических условиях по уравнению Аррениуса), в квадратных скобках указаны концентрации реагирующих веществ, r_t, r_s, r_p– фактор образования гидроксида кремния.

Однако возможны проблемы в связи с тем, что при изменении пластовых условий набор реакций (протекание реакции зависит от структуры пласта и термобарических условий) изменится. В таком случае установленный параметр перестанет отвечать истине.

Для определения результата кислотной обработки по данной модели требуется только знать состав минерала. Значения необходимых термодинамических констант для данной модели приведены в рисунке 5.

Mineral	Al/Si	A_s (kg/m^2)	k_{p0}	k_{s0}	k_{t0}	E_p (J/mol)	E_s (J/mol)	E_t (J/mol)
Quartz	0	60	2.30E-11	0	0	9,560	0	0
Kaolinite	1	12,000	8.50E-07	1.50E-03	5.06E-06	41,800	63,156	56,100
Illite	2/3	100,000	4.50E-07	1.50E-03	5.06E-06	41,870	63,156	56,100
Smectite	1/2	33,000	2.77E-07	1.50E-03	5.06E-06	37,700	63,156	56,100
Chlorite	2/3	16,000	1.05E-06	1.50E-03	5.06E-06	41,870	63,156	56,100
Feldpsar	1/3	1,000	1.25E-07	1.50E-03	4.42E-11	33,500	63,156	34,000
Muscovite	1	250	6.55E-04	1.50E-03	5.06E-06	55,000	63,156	56,100
Calcite/ Dolomite	Мгновенная реакция							

Рисунок 10 – Значения констант для основных минералов.

2.9. Анализ представленных моделей

Все перечисленные модели кислотной обработки терригенных коллекторов можно разделить на три типа: основанные на уравнении баланса масс, на положении о локальном равновесии и комбинированные модели. Приведём ещё раз краткий обзор всех моделей без уравнений, но с подробным описанием достоинств и недостатков.

1. Модель двух минералов. Представляет все минералы в пласте в виде двух типов: медленно реагирующие и быстрореагирующие. Для определения оптимальной скорости закачки используется число Дамкёллера. Получены приближённые аналитические выражения. Однако модель не учитывает выпадение нерастворимого осадка, что может часто происходить в высокотемпературных пластах.
2. Модель двух кислот, трёх минералов. Учитывает недостатки предыдущей модели, являясь её модификацией. Не была тщательно изучена. Практическая значимость заключается в возможности моделировать высокотемпературные коллекторы.

3. Модель локального равновесия. Основывается на положении о локальном равновесии для набора реакций, которые могут протекать в пласте, с большой скоростью. Из-за пренебрежения кинетикой невозможно установить оптимальную скорость закачки. Требует большого количества экспериментальных данных. Пересчёт константы равновесия затруднителен. Сложна для реализации.
4. Модель KGEOFLOW. Комбинирует подход на основе локального равновесия и химической кинетики: медленные реакции моделируются кинетикой, быстрые – по модели равновесия. Даёт возможность моделировать комплекс пластовых реакций, однако требует большого количества экспериментальных данных. Самая вычислительно сложная модель. Решение возможно, «закрыто» в симуляторе KGEOFLOW.
5. Модель Куина – Лейка – Шехтера. Также, как и предыдущая, объединяет подход локального равновесия и химической кинетики, но представляет «химизм» процесса в более упрощённом виде, соответственно, требует меньше определяющих констант.
6. Четырёхпараметрическая модель. Вводит учёт реакций кремнефтористоводородной кислоты с минералами и образования гидроксида кремния. Основывается уравнениях сохранения и химической кинетики.
7. Улучшенная модель воздействия глинокислоты на терригенные коллекторы. Как и четырёхпараметрическая модель, вводит учёт образования кремнефтористоводородной кислоты и её взаимодействия с другими минералами. Основывается на уравнениях сохранения. В уравнения химической кинетики вводят эмпирические коэффициенты. Рассчитывается число Дамкёллера и коэффициент кислотной ёмкости.
8. Модель Бернта – Робертса. Учитывает взаимодействие между двумя кислотами и восемью минералами. Основывается только на уравнениях химической кинетики, в которые внесены дополнительные коэффициенты. Предоставлен полный набор констант, для определения дизайна нужно только представить пласт в виде набора из 8 минералов. Из-за

того, что уравнения сохранения не используются, определить оптимальную скорость закачки невозможно.

2.10. Определение оптимальной модели

Проверка предсказательной способности представленных математических моделей на реальных активах является крайне трудозатратной задачей (в таком случае пришлось бы реализовать все модели в виде программного продукта и уже на нём оценивать их работу). В связи с этим, было решено провести оценку всех моделей и выбрать лучшую, исходя из следующих критериев:

1. Используются фундаментальные законы сохранения вещества, энергии и т.д.;
2. Точность моделирования химических процессов;
3. Предсказание как можно более широкого спектра осадков (в виду важности параметра вынесен отдельно);
4. Учёт влияния термобарических условий;
5. Определение ключевых параметров дизайна ОПЗ: скорость закачки и объём кислотного состава, время реакции и т.д.;
6. Простота и отсутствие необходимости задавать большое количество экспериментальных параметров.

По каждому из указанных критериев все изученные модели были оценены по шкале от 0 до 3 баллов, где 0 полное несоответствие, 3 – полное соответствие. После этого была составлена сводная таблица 1, в которой также был посчитан суммарный был по всем критериям (весовой коэффициент каждого из них равен 1). Модель, набравшая наибольший суммарный, была определена как наиболее оптимальная.

Как видно из таблицы 3, ни одна из моделей не получила максимальную оценку за использование фундаментальных законов сохранения вещества и энергии. Возможно, это связано с тем, что научная область фильтрации высокоактивных составов не проработана в достаточной степени и подлежит дальнейшему

изучению профессиональным сообществом. Также, можно отметить, что наиболее точно «химизм» процесса (получили максимальные оценки) описывают модели локального равновесия, KGEOFLOW, Бернта-Робертса. Они же наиболее полно учитывают образование осадков, а также состояние системы от термобарических параметров. При этом, ни одна из моделей не получила максимальный балл за определения ключевых параметров дизайна. Таким образом, на данный момент не удалось найти способ определить дизайн проведения кислотной обработки полностью. Некоторые управляющие параметры придётся задавать вручную.

Таблица 3. Сводная оценка моделей.

Модель / Параметр	Двух минералов	Двух кислот, трёх минералов	Локальногоравновесия	KGEO FLOW	Куина Лейка Шехтера	Четырёх параметрическая	Улучшенная	Бернта Робертса
Использованы фундаментальные законов сохранения	2	2	1	1	1	2	1	2
Точность моделирования химических реакций	1	1	3	3	2	2	2	3
Предсказание широкого спектра осадков	0	1	3	3	1	2	2	3
Учёт влияния термобарических условий	1	1	3	3	1	1	1	3

Определение ключевых параметров дизайна	1	1	1	2	1	2	1	1
Простота, минимум входных параметров	3	3	0	0	2	2	2	2
Итоговая оценка	8	9	11	12	8	11	9	14

В результате проведённого анализа можно сделать вывод (на основе итоговой оценки в таблице 3), что на данный момент наиболее оптимальной моделью кислотной обработки терригенных коллекторов является модель Бернта – Робертса.

2.11. Определение входных и выходных параметров математической модели

На основании требований по дизайну кислотной обработки терригенных коллекторов определены входные и выходные параметры математической модели. Согласно изученным литературным источникам, для составления дизайна кислотной обработки расчёту подлежат следующие параметры:

1. Скорость и давление закачки реагентов, время реакции: определяют механизм растворения породы кислотой, количество прореагировавшего минерала;
2. Объём и состав кислотного раствора (с учётом наличия других компонентов и их взаимного влияния): влияют на количество прореагировавшего минерала, определяются из соображений эффективности;
3. Объём и количество отклоняющих составов: определяются структурой пласта;

4. Количество циклов закачки рабочей жидкости: определяется структурой пласта;
5. Объём закачиваемой жидкости на каждом этапе: комплексный параметр, определяемый из условий эффективности.

Модель Бернта – Робертса принимает в качестве входных параметров следующее:

1. Минералогический состав призабойной зоны пласта: для определения химических реакций, расчёта выпадения осадка и т.д.;
2. Скорость закачки: данный параметр не удастся установить исходя из данной модели, поэтому он должен быть задан;
3. Начальная пористость: для определения изменения пористости пласта в ходе обработки необходимо начальное значение;
4. Концентрация хлороводородной кислоты: модель учитывает только её взаимодействие с кальцитом, но не может выдать рекомендации по её концентрации.
5. Радиус скважины, толщина обрабатываемого пласта, радиус загрязнённой зоны: группа технологических параметров скважины, которые не подлежат изменению в ходе определения дизайна.

Выходными параметрами математической модели Бернта – Робертса являются следующие величины:

1. Объём кислотного состава;
2. Рекомендуемая концентрация HF;
3. Время реакции.

2.12. Разработка модели кислотной обработки терригенных коллекторов с учётом образования осадков и их влияния на проницаемость

Математическая модель должна быть удобным инструментом для определения ключевых параметров обработки призабойной зоны. Также, она не должна быть излишне перегружена членами, отвечающими за второстепенные процессы, такие как изменение смачиваемости, влияние электростатических сил на

силу кислотного состава и т.д. Таким образом, на основе выработанных требований и проведённого анализа было решено взять за основу модель фильтрации химические активного компонента в пористой среде, а определяющие соотношения (уравнения, которые описывают физико-химические превращения) взять из модели Бернта – Робертса.

Запишем интегральную форму закона сохранения массы жидкости в произвольном объёме V, в который поступает жидкость через границу Σ:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V pmdV = -\int_\Sigma pu \cdot nd\sigma \qquad (1)$$

где n – вектор внешней нормали к поверхности Σ, а объём V является постоянным и недвижимым, p – плотность жидкости, m – пористость среды, u - линейная скорость потока, σ – поверхность, ограничивающая объём.

Преобразуем правую часть уравнения (1) по формуле Остроградского – Гаусса:

$$-\int_V div(pu)dV = -\int_\Sigma pu \cdot nd\sigma \qquad (2)$$

Подставив выражение для правой части из уравнения (2) в уравнение (1) и сгруппировав все слагаемые слева, получим:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V pmdV + \int_V div(pu)d\sigma = 0 \qquad (3)$$

Таким образом, мы получили интегральную запись закона сохранения массы. В первом слагаемом в силу непрерывности функций дифференцирования и интегрирования их можно поменять местами. В результате оба члена можно объединить под одним интегралом, который, в силу малости объёма dV, можно опустить. Тогда получим дифференциальную запись упомянутого закона – уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(pm)}{\partial t} + div(pu) = 0 \qquad (4)$$

Следует отметить, что если плотность потока постоянна, а пористость не меняется со временем, то формула (4) принимает вид:

$$div\,(u) = 0 \tag{5}$$

Однако следует учесть тот факт, что в случае фильтрации активного состава (кислот, поверхностно – активных веществ и т.д.) уравнение сохранения массы (с учётом всех преобразований, подобных тем, что были проведены в уравнениях 1-4) принимает вид:

$$\frac{\partial(pCm)}{\partial t} + div(pCu) = \hat{J} \tag{6}$$

где C – концентрация активного компонента, J – обменный член, характеризующий изменение концентрации кислоты за счёт химической реакции.

Преобразуем уравнение (6), разделив все члены на плотность. Так как эта величина остаётся постоянной (или изменяется незначительно), то мы можем вынести её изпод операторов дифференцирования. Также раскроем оператор дивергенции по соответствующим правилам. В итоге получим:

$$\frac{\partial(Cm)}{\partial t} + C\ divu + u\ gradC = J \tag{7}$$

где $J = \frac{\hat{J}}{p}$ скорость химической реакции, отнесённая на плотность потока.

В соответствие с уравнением (5) второй член в уравнении (7) равен нулю. Перейдя к цилиндрической системе координат (для описания движения потока от центра – скважины к краям пласта) и одномерной постановке. Получим уравнение баланса кислотной компоненты:

$$\frac{\partial(Cm)}{\partial t} + \frac{u}{r}\frac{\partial C}{\partial r} = J \tag{8}$$

Для описания скорости фильтрации жидкости в пористой среде можно использовать два подхода. Закон Дарси – экспериментально установленный закон, устанавливает зависимость скорости течения жидкости от проницаемости, вязкости и перепада давления. Применяется для жидкостей, подчиняющихся закону вязкого трения Ньютона, а также при небольших скоростях фильтрации:

$$u = \frac{K}{\mu}\Delta P \tag{9}$$

где K – коэффициент проницаемости (м^2), μ – вязкость (Па·с), ΔP – перепад давления между источником и стоком (Па).

Закон Форхгеймера(также встречается упоминание как закон дарси - Форхгеймера)–более сложный, нелинейный закон фильтрации. Используется при больших скоростях течения, а также, когда существенна инерционная составляющая. Определяется следующей формулой:

$$\Delta p = -\frac{\mu}{k}u - \frac{zp}{\sqrt{k}}|u|u \tag{10}$$

где Δp– перепад давления, z – сжимаемость потока, все остальные переменные по уравнению (9).

Так как скорость фильтрации активного состава в пласт невысока, инерционные силы не вносят существенного вклада, и жидкость подчиняется закону Ньютона, для описания потока было решено выбрать закон Дарси.

Пересчёт пористости в проницаемость осуществляется на основе корреляций, которые включают эмпирические коэффициенты. Их существует большое количество, однако среди нет универсальной формулы, которая может точно связать одну величину с другой, и все они имеют приблизительно одинаковую точность, с той лишь разницей, что некоторые модели на определённых породах работают лучше, чем другие. В данной работе было решено использовать корреляцию Кольрауша:

$$\frac{K}{K_0} = A\left(\frac{m}{m_0}\right)^B \tag{11}$$

где A, B – эмпирические коэффициенты, K, m – текущие проницаемость и пористость соответственно, K_0, m_0 – начальные значения этих величин.

Формула (11) связывает проницаемость с пористостью, тем самым связывая изменение пористости в результате химической реакции с гидродинамическим состоянием потока.

Модель химических реакций. На основании ранее представленной модели Бернта – Робертса химические реакции, протекающие в пласте, представлены в виде реакций из трёх стадий. В ходе каждой из них кислотный состав реагирует с каждым из минералов, входящих в модель. Минералогический состав пласта

отображается в виде комбинации 6 основных минералов: кальцит, кварц, каолинит, хлорит, шпат, мусковит.

1. Первичные реакции:

$$2HCl + CaCO_3 \Rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2 \text{ (все продукты растворимы)}$$

$$2HF + CaCO_3 \Rightarrow CaF_2 + H_2O + CO_2 \text{ (осадок } CaF_2\text{)}$$

$$6HF + SiO_2 \Rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O \text{ (побочныйпродукт- } H_2SiF_6\text{)}$$

$$HF + \text{минерал} \Rightarrow \text{фториды алюминия и кремния (для минералов 3-6)}$$

2. Вторичные реакции – взаимодействие с H_2SiF_6:

$$H_2SiF_6 + CaCO_3 \Rightarrow CaSiF_6 + H_2O + CO_2 \text{ (осадок} CaSiF_6 \text{)}$$

$CaSiF_6$ + минерал => фториды алюминия и кремниевая кислота (осадок-кремнекислота)

3. Третичные реакции – взаимодействие с фторидами алюминия:

$$ALF_x + \text{минерал} = ALF_y + \text{силикагель } (y<x, \text{ осадок – силикагель})$$

Моделирование химических реакций происходит на основе закона действующих масс (ЗДМ, см раздел 1.3), который представляет зависимость между скоростью взаимодействия и концентрациями реагирующих веществ. Константа скорости реакции зависит от температуры по уравнению Аррениуса. Таким образом, мы можем составить определяющие соотношения для всей системы. Согласно модели химических взаимодействий, J определяется по следующим формулам:

для HCl:

$$J_{HCl} = -k_i C_{HCl} C_{\text{Кальцит}}$$

Так как хлороводородная кислота реагирует только с кальцитом (k_i -константа равновесия скорости реакции).

Для HF:

$$J_{HF} = -C_{HF} \sum M_i k_i^1$$

Модель предполагает образование кремнефтористоводородной кислоты при реакции HF с минералами;

Для H_2SiF_6:

$$J_{\mathrm{H2SiF6}} = C_{HF} \sum M_i k_i^1 - C_{\mathrm{H2SiF6}} \sum M_i k_i^2$$

Первое слагаемое отображает реакцию образования кислоты, второе – её расходования за счёт её реакции с минералами.

Образование фторидов алюминия:

$$J_{\mathrm{AlFx}} = C_{HF} \sum M_i k_i^1 - C_{\mathrm{H2SiF6}} \sum M_i k_i^2 - C_{\mathrm{AlFx}} \sum M_i k_i^3$$

Образование осадков:

$$J_{\mathrm{H2SiO3}} = C_{\mathrm{H2SiF6}} \sum M_i k_i^2$$

$$J_{\mathrm{Si(OH)4}} = C_{\mathrm{AlFx}} \sum M_i k_i^3$$

$$J_{\mathrm{CaF2}} = C_{\text{Кальцит}} \left(C_{HF} + C_{\mathrm{H2SiF6}} \right)$$

Изменение концентрации минералов:

$$\frac{dM_i}{dt} = -M_i (C_{HF} k_i^1 + C_{H2SiF6} k_i^2 + C_{AlFx} k_i^3)$$

Изменение пористости представлено как изменение удельных объёмов минералов, занимающих условный объём:

$$m = \frac{V_{\text{пор}}}{V} = \frac{V - \sum V_m^i - \sum V_{\text{осад}}}{V}$$

Граничные и начальные условия:

- В начальный момент времени кислотного состава в пласте нет: C(t =0, r) = 0;
- На вход в пласт поступает одинаковое количество кислоты C(t, r=0) = C_0
- Задано начальное распределение пористости m (t = 0, r) = m_0(r)

Итоговая система уравнений принимает вид:

Уравнение баланса массы кислотных компонентов:

$$\frac{d(mC_i)}{dt} + \frac{v}{r}\frac{dC_i}{dr} = J_i \qquad (12)$$

для 3-х кислот: HCl, HF, H_2SiF_6, i = 1,2,3.

Уравнение кинетики концентраций минералов, осадков и компонентов раствора:

$$\frac{dM_i}{dt} = -M_i\left(C_{HF}k_i^1 + C_{H2SiF6}k_i^2 + C_{AlFx}k_i^3\right) \quad (13)$$

Для 6 минералов, 3-х осадков и 1 растворимого компонента.

Пересчёт изменения концентраций минералов в пористость:

$$m = \frac{V_{\text{пор}}}{V} = \frac{V - \sum V_m^i - \sum V_{\text{осад}}}{V} \quad (14)$$

Объём пор пересчитывается исходя из количества минералов и осадков, занимающих удельных объём и их плотностей. Вся структура пористой среды представляется в виде набора удельных объёмов, то есть функция пористости зависит от радиуса и времени.

Выражения для обменного члена химической реакции для каждого компонента в системе представлено в таблице 4.

Таблица 4. Определяющие соотношения

Определяющие соотношения (кинетика)
$J_{HCl} = -k_i C_{HCl} C_{\text{Кальцит}}$
$J_{HF} = -C_{HF}\sum M_i k_i^1$
$J_{\text{H2SiF6}} = C_{HF}\sum M_i k_i^1 - C_{\text{H2SiF6}}\sum M_i k_i^2$
$J_{\text{AlFx}} = C_{HF}\sum M_i k_i^1 - C_{\text{H2SiF6}}\sum M_i k_i^2 - C_{\text{AlFx}}\sum M_i k_i^3$
$J_{\text{H2SiO3}} = C_{\text{H2SiF6}}\sum M_i k_i^2$
$J_{\text{Si(OH)4}} = C_{\text{AlFx}}\sum M_i k_i^3$
$J_{\text{CaF2}} = C_{\text{Кальцит}}\left(C_{HF} + C_{\text{H2SiF6}}\right)$

Скорость фильтрации определяется по закону Дарси:

$$v = -\frac{\mathrm{K}}{\mu}\Delta \mathrm{P} \tag{15}$$

Пересчёт пористости в проницаемость осуществляется по корреляции:

$$\frac{K}{K_0} = M\left(\frac{m}{m_0}\right)^n \tag{16}$$

2.13. Численная реализация математической модели

Представленная математическая модель была численно решена с помощью метода конечных разностей. Данный метод позволяет решить большой класс дифференциальных уравнений, от обыкновенных дифференциальных уравнений, до уравнений в частных производных, как первого, так и более высоких порядков. Метод основывается на представлении непрерывной функции производной в виде конечной разницы (отсюда и название):

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} \tag{17}$$

То есть осуществляется обратный предельный переход от $\Delta \mathrm{t} \to 0$ к $\Delta \mathrm{t} = \Delta \mathrm{t}_0$, что называется шагом аппроксимации. Далее строится сеточная функция, выражающая значение искомой функции на следующем временном шаге через уже известные значения на предыдущих временных шагах. Изначально расчёт производится на основе начальных и граничных условий. В конечно разностной записи уравнение (17) принимает вид:

$$\frac{y^{n+1} - y^n}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to \Delta t_0} \frac{\Delta y}{\Delta t} \tag{17}$$

Существует значительное число способов решения сеточных уравнений: использования явной разностной схемы, неявной разностной схемы, комбинированные методы (полунеявные, схема Савельева, схема предиктор – корректор и т.д.). Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки:

- Неявные методы более сложны в реализации и требуют отдельных затрат памяти на вычисления дополнительных матриц, но при этом имеют меньшую погрешность;

- Явные методы, наоборот, являются самыми простыми, но и самыми неточными, в результате чего, чтобы иметь возможность их применить, необходимо сильно уменьшать шаг, что приведёт к увеличению времени расчёта;
- Комбинированные методы сочетают в себе все перечисленные достоинства и недостатки, но в меньшей мере.

В результате проведённого анализа достоинств и недостатков разных методов, было решено использовать для решения представленной модели метод полунеявной разностной схемы.

Для каждой из кислотных компонент была составлена полунеявная схема вида:

$$\frac{m_k^{t+1}}{\Delta t}C_k^{t+1} - \frac{m_k^{t+1}}{\Delta t}C_k^{t} + \frac{m_k^{t+1}}{\Delta t}C_k^{t+1} - \frac{m_k^{t}}{\Delta t}C_k^{t+1} + \frac{v_k^{t+1}}{r_k \Delta r}C_k^{t+1} - \frac{v_k^{t+1}}{r_k \Delta r}C_{k-1}^{t+1} + J_k^t = 0$$

Которая была выражена относительно C_k^{t+1}, и в итоге была получена следующая сеточная функция:

$$C_k^{t+1} = \frac{\frac{m_k^{t+1}}{\Delta t}C_k^{t} + \frac{v_k^{t+1}}{r_k \Delta r}C_{k-1}^{t+1} - J_k^t}{2\frac{m_k^{t+1}}{\Delta t} + \frac{v_k^{t+1}}{r_k \Delta r} - \frac{m_k^{t}}{\Delta t}} \quad (18)$$

Такого вида разностная схема была составлена для всех компонентов кислотного состава.

Для уравнений баланса массы i-ого минерала использовалась явная разностная схема вида:

$$\mathrm{M}_{\mathrm{i,\ k}}^{\mathrm{t+1}} = \mathrm{M}_{\mathrm{i,\,k}}^{\mathrm{t}} - \mathrm{M}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{t}}\left(\mathrm{C}_{\mathrm{HF}}{}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{t}}\mathrm{K}^{1} + \mathrm{C}_{\mathrm{H2SiF6}}{}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{t}}\mathrm{k}_{\mathrm{i}}^{2} + \mathrm{C}_{\mathrm{AlFx}}{}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{t}}\mathrm{k}_{\mathrm{i}}^{3}\right) \quad (19)$$

Все остальные зависимости, которые выражались не в дифференциальной форме, рассчитывались прямым методом.

2.14. Анализ сходимости

Для определения сходимости разностной схемы и тем самым оценки точности её решения была проведена серия параллельных расчётов на одинаковых исходных данных.

Так как не получается выразить расчётный параметр через все остальные, так как в данной системе обменный член J зависит от концентрации самого вещества и от концентрации других веществ. Поэтому придётся прибегнуть к оценке сходимости с помощью численного эксперимента. На модельных данных были проведены серии расчётов по разностной модели (уравнения 18-19).

Модельный пример был следующий: $C_{кальцита}$ = 16%, $C_{кварца}$= 16%, $C_{каолинита}$ = 16%, $C_{хлорита}$= 16%, $C_{шпатов}$= 16%, $C_{мусковита}$= 16%, пластовая температура: 80°C, концентрация HCl начальная 10%, начальная пористость 10%, радиус скважины 0,1 м.

Определение влияния шага по времени (Δt) на сходимость. Было проведено несколько расчётов при одинаковых других исходных параметрах. Погрешность была определена как сумма квадратов разностей в соответствующих узлах разностной сетки. Получены результаты, представленные в таблице 5.

Таблица 5. Определение влияния шага по времени на сходимость.

Δt	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
Погрешность	$5\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-5}$	$5\cdot10^{-6}$	10^{-7}

Аналогичным образом было определено влияние значения $\Delta \boldsymbol{r}$. Были получены результаты, представленные в таблице 6.

Таблица 6. Определение влияния шага по времени на сходимость.

Δr	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
Погрешность	$9\cdot10^{-6}$	10^{-6}	10^{-8}	10^{-9}

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что разностная схема имеет порядок аппроксимации $O(\Delta t, \Delta r)$, что говорит о том, что при уменьшении шага по времени или по координате на 1 порядок, погрешность уменьшается аналогично.

2.15. Условный параметр оптимальности

Для решения задачи проектирования оптимального дизайна кислотной обработки было решено использовать безразмерный параметр N:

$$N = \frac{t\,V}{m}$$

где t – расчётное время обработки, V – объём кислоты, m – пористость.

Задача кислотной обработки – провести воздействие на пласт с максимальным увеличением пористости, за минимальное время, расходовав минимальный объём кислоты. Таким образом, возникла оптимизационная задача (пример на рисунке , которая была решена с помощью симплекс – метода.

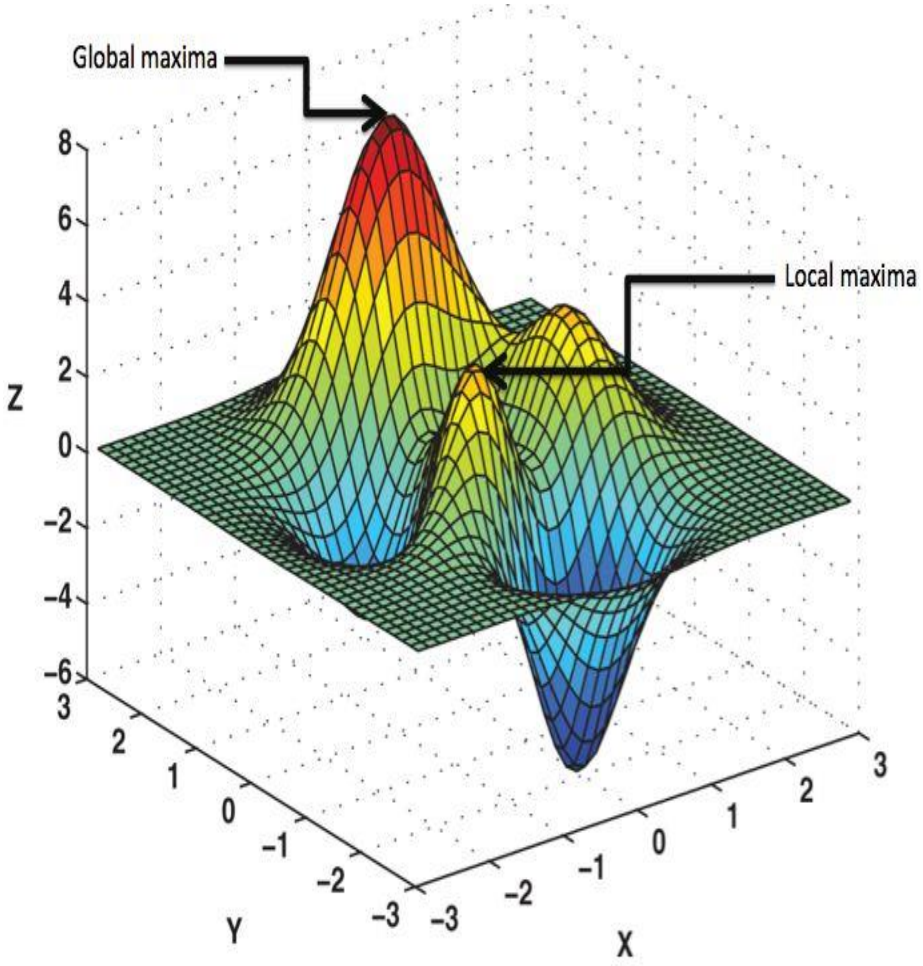

Рисунок 11 – Пример задачи математической оптимизации.

2.16. Результаты расчёта для модельного примера

На рисунках 12,13 представлены результаты расчёта для следующих данных: C(SiO_2) = 30%, C($CaCO_3$) = 25%, C(Шпат) = 25%, C(Каолинит) = 10%, C(Хлорит)

= 5%, C(Мусковит) =5%, T = 80^0C, ΔP = 5 атм., m_0 = 5 %, t = 120 мин. Очевидно, что при заданных условиях доминирует поверхностное растворение, не вся загрязнённая зона пласта восстановлена данной обработкой. Рекомендуется увеличить давление закачки.

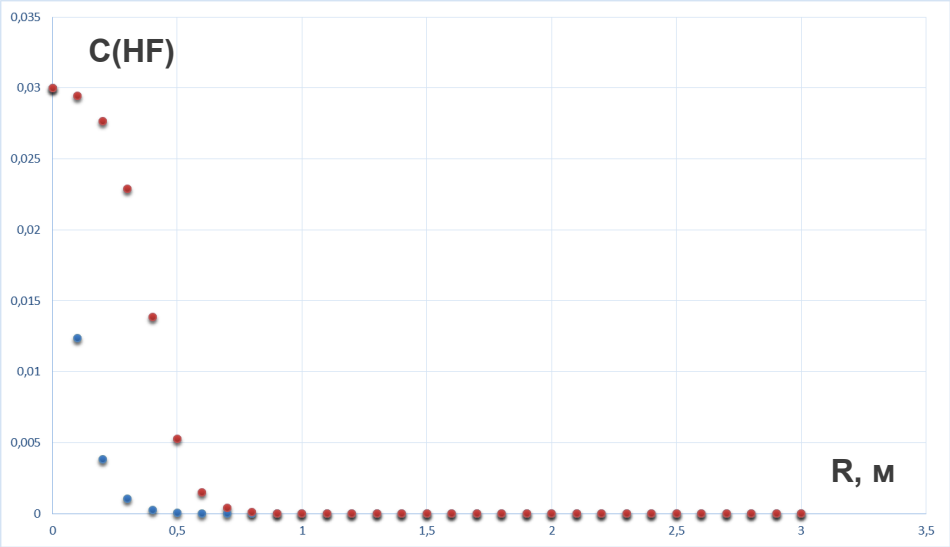

Рисунок 12 – график распределения кислоты в пласте на момент времени t = t_0 (синий график), и на момент времени t = tконечное

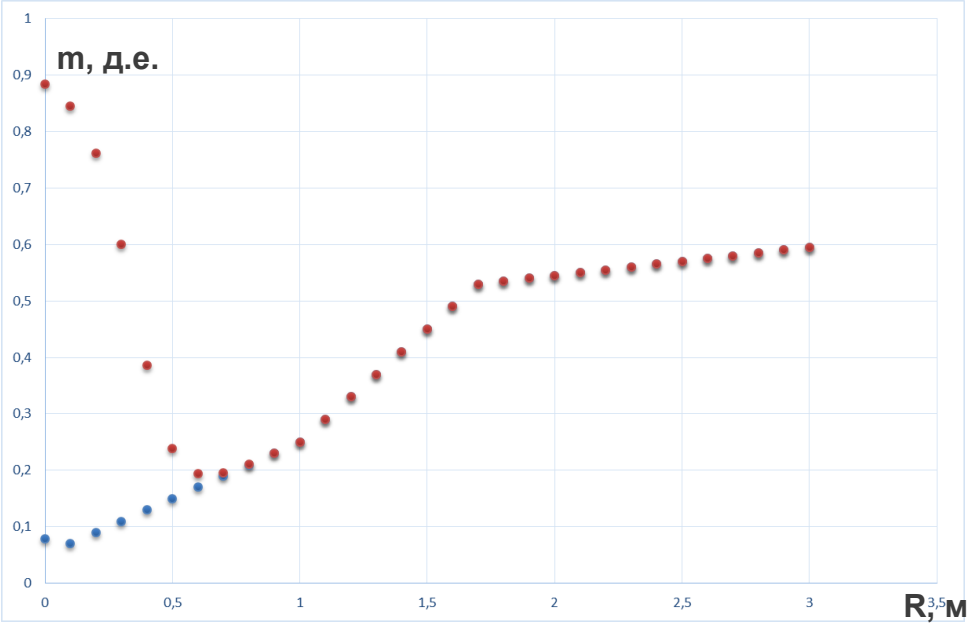

Рисунок 13 – график распределения пористости в пласте на момент времени t = t_0 (синий график), и на момент времени t = tконечное

Для аналогичных исходных данных был проведён расчёт при увеличении давления закачки в 8 раз, который показал значительно более глубокое проникновение кислотного состава в пласт и соответственно большее восстановление призабойной зоны.

Полученный результат соответствует существующей рекомендации проводить кислотную обработку при давлении, составляющем 80-90 % от давления гидроразрыва.

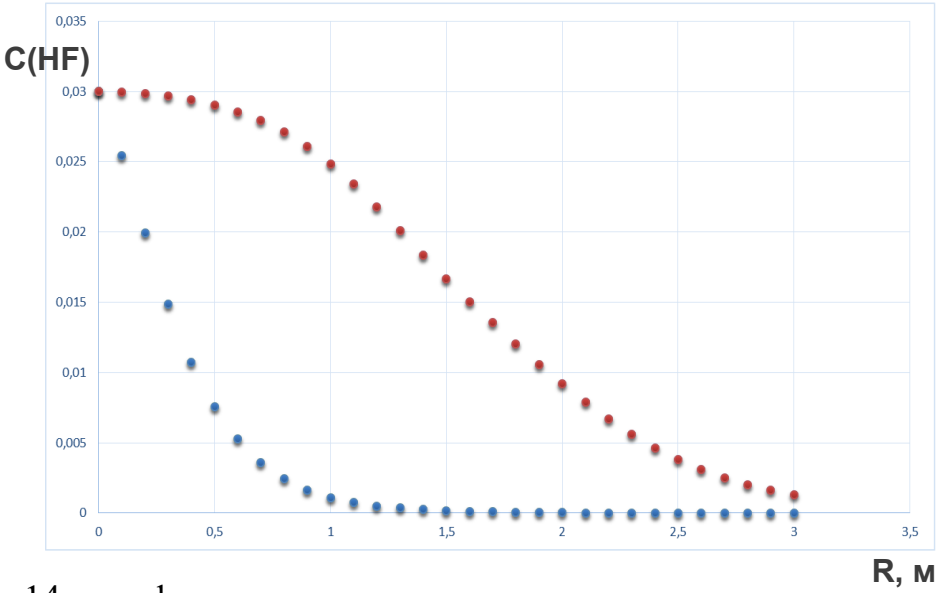

Рисунок 14 – график распределения кислоты в пласте на момент времени t = t0 (синий график), и на момент времени t = tконечное

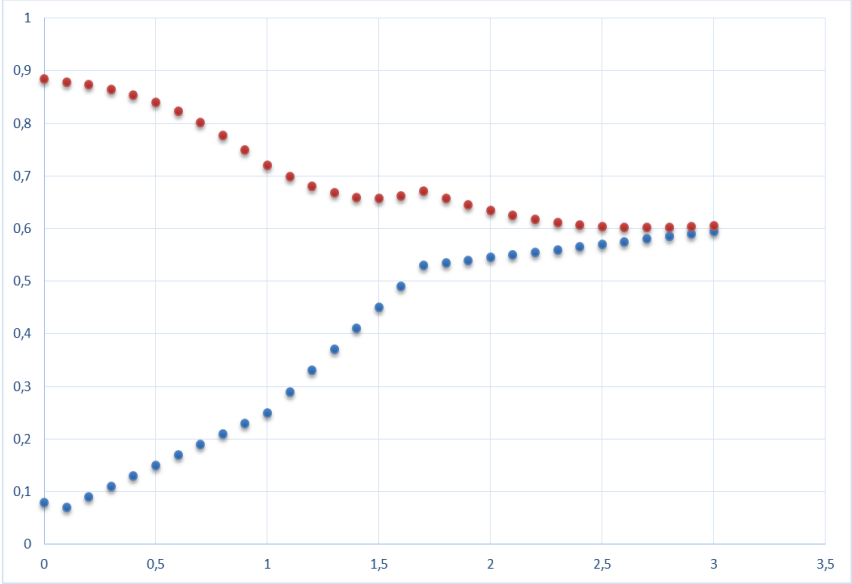

Рисунок 15 – график распределения пористости в пласте на момент времени $t = t_0$ (синий график), и на момент времени t = tконечное.

Глава 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПИЛОТНОГО МОДУЛЯ ПО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ

Для решения поставленной задачи было решено использовать язык программирования C# 7.0 по следующим причинам:

1. Данный язык программирования был разработан для полной интеграции в платформу .NET Microsoft, на которой функционирует подавляющее большинство современных персональных компьютеров. То есть, он изначально разрабатывался фирмой Microsoft как прикладной язык высокого уровня и как язык для программирования под среду Windows, что собой гарантирует бесперебойную работу программ, написанных на C# в операционных системах семейства Windows (за исключением, когда сбои вызваны ошибками в коде самой программы).

2. C# - это высокоуровневый язык. Среди остальных языков, от которых он испытал влияние, можно выделить Java (синтаксисы этих языков очень похожи, но не идентичны), а также C++, от которого он похожим образом унаследовал структуру синтаксиса, общую логику написания кода, правила оформления кода и некоторые другие более сложные моменты. Однако при всех допущениях назвать C# клоном одного из этих языков невозможно, так как в нём существует большое количество собственных разработок, а поддержка библиотеки WPF даёт ему заметное преимущество перед остальными средами разработки.

2. Следует отдельно отметить, что C# также многое унаследовал и от VisualBasic. Так, в обоих языках могут быть использованы такие дполнительные возможности, как присваивание классам свойств, благодаря чему стала возможной перегрузка оператора для создаваемых типов данных (другие языки не поддерживают такую возможность). Можно с некоторым приближением сказать, что C# - это представляет собой синтез из различных языков, собрав в себе при этом чистый синтаксис Java, простоту в понимании и реализации, как у VisualBasic, и обладает практически той же мощью и гибкостью, что и C++.

3. В отличие от широко распространённого для целей осуществления научных расчётов языка высокого уровня Python (Питон), в C# осуществляется автоматическое управление компьютерной памятью. Кау уже ранее говорилось, в данном

продукте всесторонне предусмотрены инсталлированные программные методы для работы с множествами, перечислениями, структурой кода и свойством создаваемого класса. Операторы, создаваемые в рамках работы в этом языке могут быть неоднократно перегружены (данная возможность взята у C++), в тоже время большинство сложностей, которые могут возникнуть при использовании данных методов, были ликвидированы.

4. В данном языке также поддерживаются аспектные программные технологии: атрибут, свойства и т.д., что позволяет значительно сэкономить время в процессе разработке высокоуровневых приложений.

5. Однако следует отметить, что код, сгенерированный на данном языке предназначен для работы только в среде DOT NET FREAMWORK.

6. Этот язык является разработкой компании Microsoft и поддерживает работу со многими встроенными библиотеками, не имеет конфликтов с разными версиями Windows прост в компиляции и т.д.

Подводя итог под всем вышесказанным, можно отметить, что язык программирования C# 6.0 имеет все основания для того, чтобы быть использованным в качестве основного инструмента для разработки как крупномасштабных программных продуктов, так небольших инструментов.

3.1.Разработка модуля решения математической модели

При разработке данного модуля были использованы следующие стандартные методы и процедуры языка C#:

1. Циклы – для вычисления значения содержания минералов и осадков в призабойной зоне в зависимости от времени предстояло повторять одни и те же вычисления с разными стартовыми значениями многократно, и использование циклов смогло это упростить; Однако, преследую более гибкие технологии, в соответствие с принципами, для более гибкого использования возможностей языка, необходимо Agile и Scrum, возникает необходимость указать некоторые специальные методы: циклы с указанными параметрами по свойству повторений, шагу итератора и т.д.. К

другим таким операторам следует отнести циклы while и do…while, так как у них неизвестно количество повторений, но может быть задан шаг, при этом он может меняться в процессе разработки; внутри всех перечисленных методов также можно использовать операторы, завершающие цикл принудительно, или досрочно приводящие к следующей итерации.

2. Массивы для хранения данных – так как рассчитываются концентрации большого количества веществ на разных промежутках времени и все эти значения нужно хранить, то необходимо было использовать именно эти структуры данных, которые являются совокупностью наборов, пронумерованных данных, к которым можно обращаться пономеру, массивы имеют ограниченный размер и некоторые другие свойства: могут иметь разную размерность в пространстве, от одномерных до n-мерных.
3. Классы – специальная структура языков программирования, которая есть практически в каждом высокоуровневом языке. Они применяются очень широко и могут служить для большого набора целей: как для того, чтобы разделить объекты в одном программном коде на несколько невидимых друг для друга полей. Так и для описания абстрактного объекта, для которого можно определить набор свойств и потом указывать только то, что новый объект принадлежит к данному классу и все его свойства тоже характерны для данного объекта. При разработке данного программного обеспечения было использовано несколько классов (кроме стандартных, встроенных в DOT NET FRAEMWORK): класс «Вещества» который определял массив веществ, в который записывалась информация по веществам, участвующим в химических реакциях, для их ранения в памяти компьютера, класс «Константы», который содержал информацию по константам скоростей химических реакций.

3.2.Разработка интерфейса

Для решения поставленной задачи было решено воспользоваться встроенной библиотекой языка C# WindowsForms, которая поддерживает стандартные окна,

кнопки, лейблы, поля отрисовки графиков и многое другое. Поддерживаемого функционала вполне достаточно для разработки простых приложений, которые будут быстро функционировать на всех операционных системах семейства Windows (начиная с Win XP).

В ходе разработки были использованы следующие библиотеки:

- System – связьсядром Windows;
- System.Collections.Generic – работа с встроенными классами;
- System.Linq – работа с запросами;
- System.Text – работа с текстовыми данными;
- System.Text.RegularExpressions – работа с реулярными выражениями;
- System.IO – работа с файловыми данными;
- System.Diagnostics – поддержка правильного функционирования программы;
- System.WinForms – работа с оконным интерфейсом:

Работа реализованного пилотного модуля представлена на рисунках 15-16.

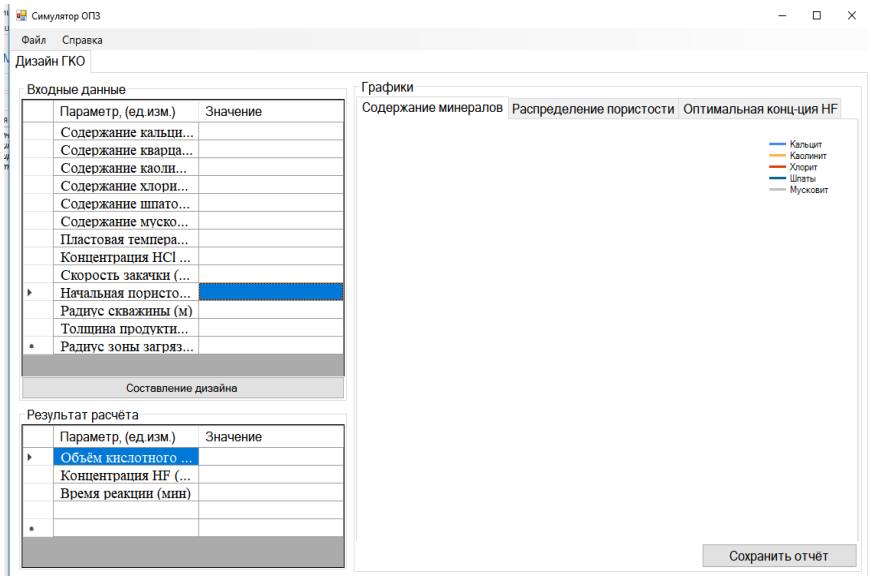

Рисунок 15 – Внешний вид программы при запуске

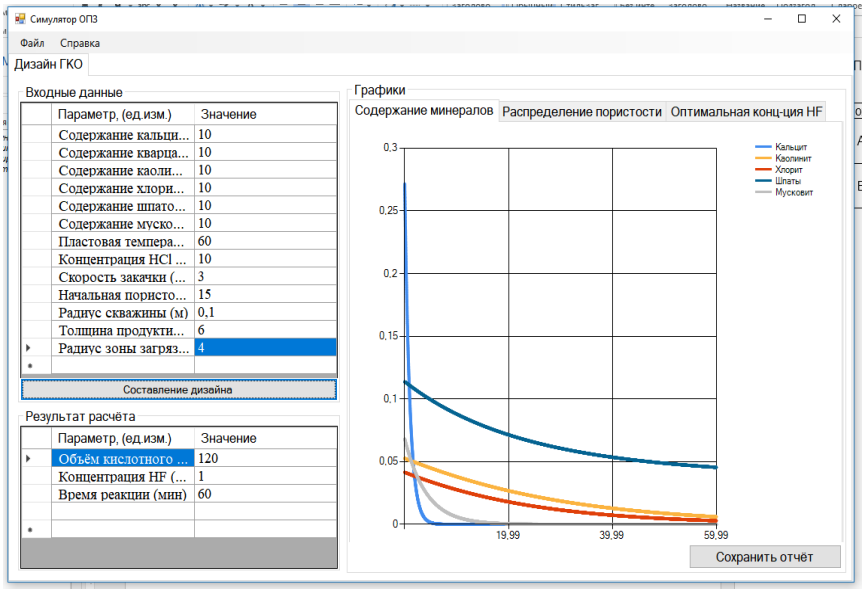

Рисунок 16 – Результат работы программы с построенными графиками и рассчитанным дизайном

Программа представляет собой рабочее окно с 3 зонами:

1. Входные данные (рисунок 3) – блок для ввода данных по свойствам ПЗП (минералогический состав, пластовая температура, начальная пористость, радиус зоны загрязнения, толщина продуктивного пласта) и технологическим характеристикам (концентрация хлороводородной кислоты, скорости закачки, радиус скважины). Также в этом блоке содержится кнопка «Составление дизайна»;

2. Выходные данные (рисунок 16) – блок для отображения полученных в результате моделирования оптимальных технологических параметров проведения процесса (объём кислотного раствора, концентрация фтороводородной кислоты, время реакции);

3. Блок для графического отображения расчётных данных содержит три графика:

3.1. График зависимости содержания минералов в ПЗП на радиусе равном радиусу загрязнения в зависимости от времени (рисунок 17) при оптимальных концентрации и объёме кислотного состава (см. пункт2). График носит пояснительный характер и позволяет показать на сколько растворился тот или иной материал в ходе обработки;

3.2. График зависимости пористости ПЗП (рисунок 18). Позволяет оценить распределение пористости по пласту на момент конца обработки при условии проведения процесса при рассчитанных оптимальных параметрах.

3.3. График определения оптимальной концентрации HF (рисунок 19) показывает зависимость изменения средней проницаемости по пласту от состава раствора. Он иллюстрирует каким образом была определена оптимальная концентрация HF в кислотном составе.

Также в разработанном программном модуле предусмотрена функция автоматической генерации отчётной документации с сохранением в ней результатов расчёта программы (рекомендаций по оптимальному дизайну) а также всех представленных графиков. За данную функцию отвечает кнопка «Сохранить отчёт» в левом нижнем углу. Такая функция отвечает современным требованиям по автоматизации рутинного труда, позволит ускорить написание отчётов и сделает процесс составления дизайна ещё более удобным.

Входные данные

	Параметр, (ед.изм.)	Значение
▸	Содержание кальцита (м...	10
	Содержание кварца (мас...	10
	Содержание каолинита (...	10
	Содержание хлорита (ма...	10
	Содержание шпатов (ма...	10
	Содержание мусковита (...	10
	Пластовая температура (...	70
	Концентрация HCl (масс...	10
	Скорость закачки (м/с)	4
	Начальная пористость (%)	15
	Радиус скважины (м)	0,15
	Толщина продуктивного...	10
	Радиус зоны загрязнени...	5
*		

Составление дизайна

Рисунок 17 – Пример заполнения зоны входных данных

Результат расчёта

	Параметр, (ед.изм.)	Значение
▸	Объём кислотного ...	312
	Концентрация HF (...	1
	Время реакции (мин)	60
*		

Рисунок 18 – Результат работы программы, заполненные значения параметров проведения процесса

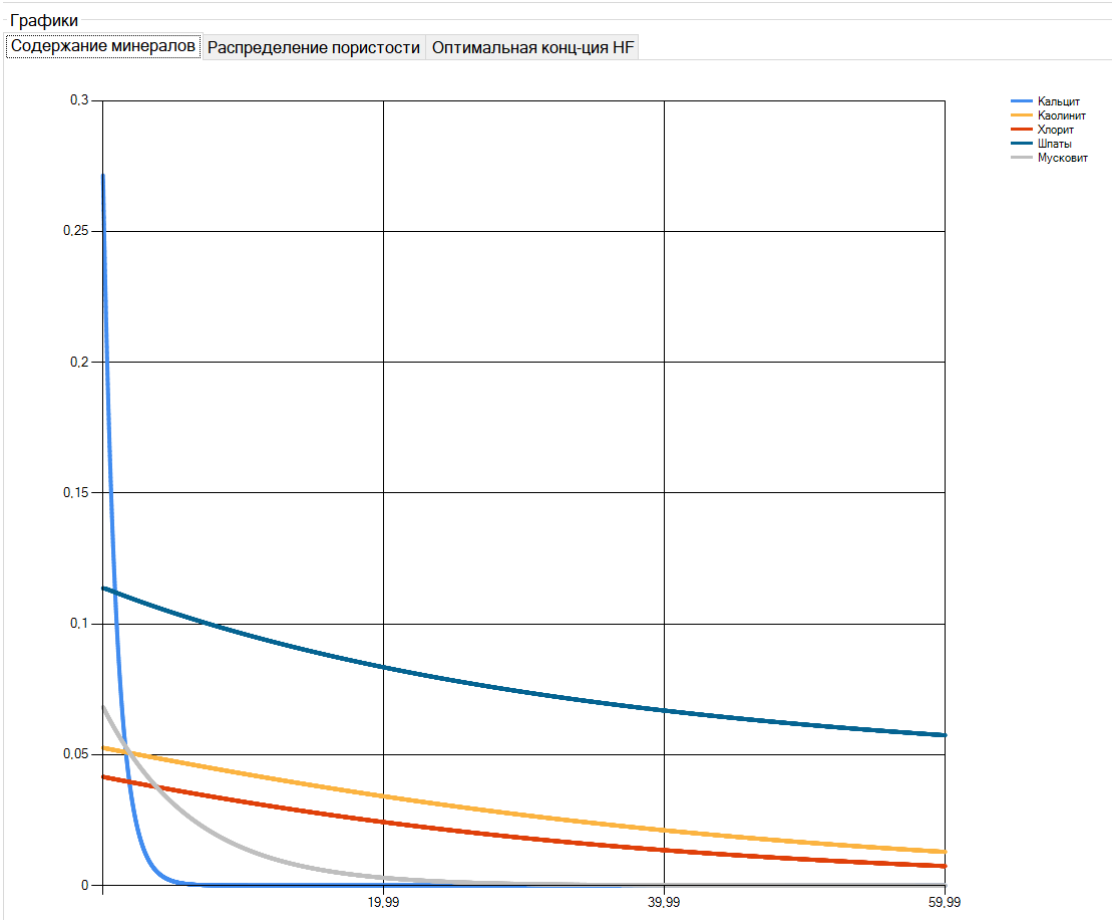

Рисунок 19 – График зависимости содержания минералов в ПЗП от времени реакции

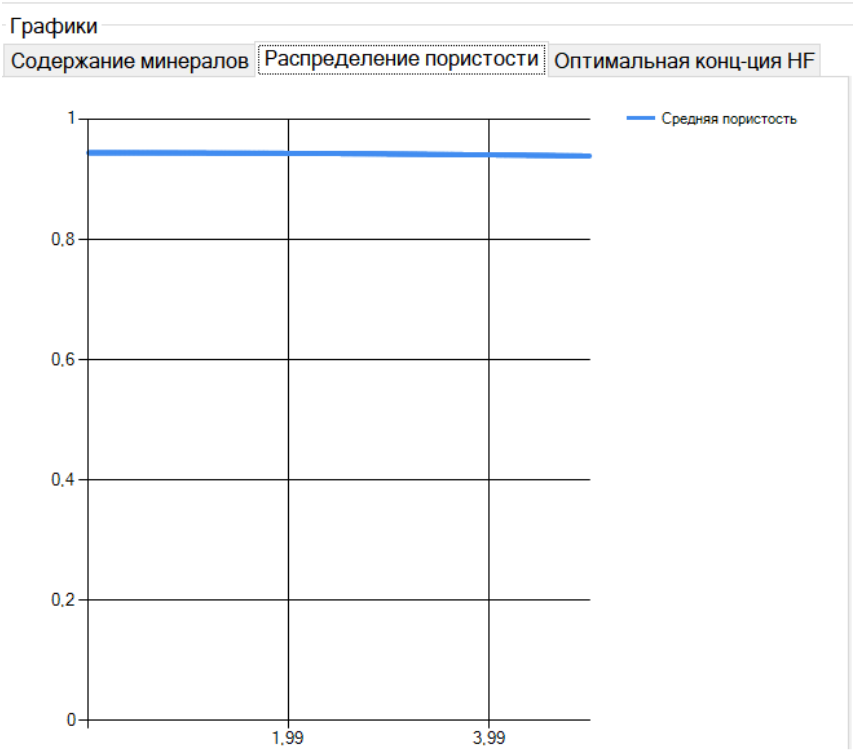

Рисунок 20 – График зависимости пористости по пласту от радиуса зоны загрязнения. На момент остановки обработки пористость на всём расстоянии приняла постоянное значение.

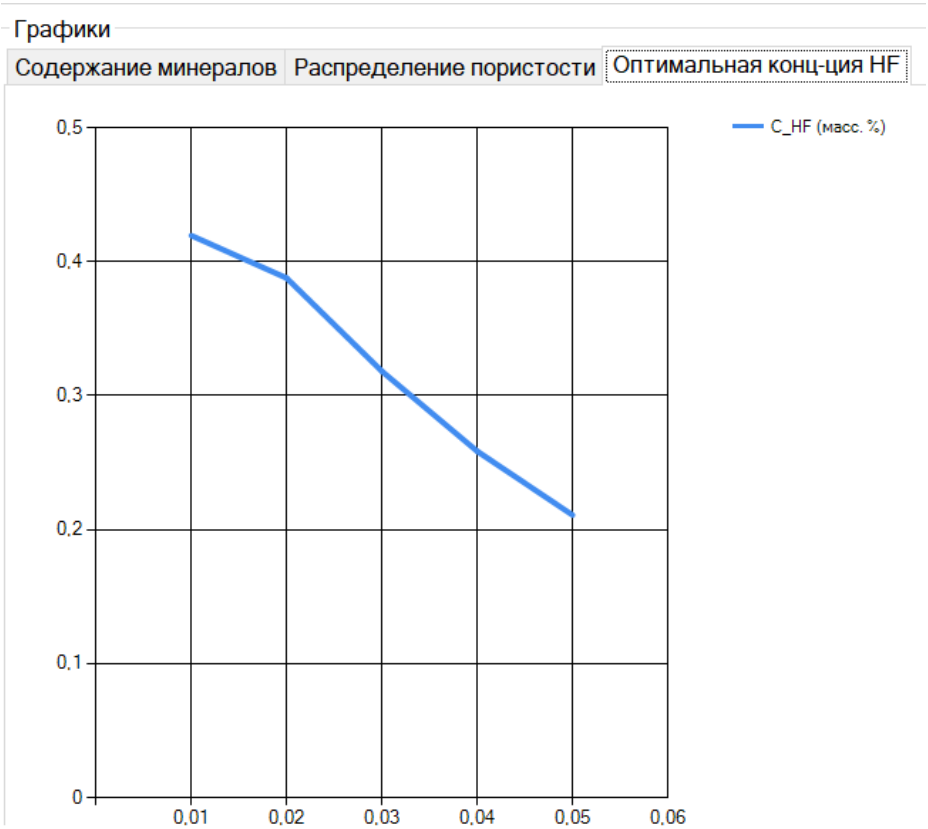

Рисунок 21 – График зависимости средней по пласту (ограничение по радиусу загрязнения) проницаемости от концентрации фтороводородной кислоты в кислотном составе.

Выводы

В результате проделанной работы были сформулированы следующие выводы:

1. Для разработки математической модели кислотной обработки необходимо использовать уравнение фильтрации химически активного компонента в пористой среде и дополнить его определяющими соотношениями, которые будут описывать «химизм» происходящих явлений;
2. Разработанная математическая модель показывает, что наиболее оптимально производить обработку с максимальным давлением, что согласуется с принятыми в индустрии стандартами;
3. В качестве параметра оптимальности проведения операции можно использовать произведение времени и полного объёма кислотного состава, отнесённые к пористости.

Охрана труда

Дипломная работа представляет сбой научно – исследовательский труд, поэтому выполняющий её сотрудник всё своё рабочее время занят интеллектуальным трудом: за учебниками, книгами, компьютером.

Сложность работы за компьютером выражается в большом напряжении для глаз, спины (ввиду сидячего образа работы), ягодиц и других частей тела человека. Иными словами, продолжительная работа за персональным компьютером может принести значительный вред здоровью человека.

Поэтому специалистами по охране труда был разработан комплекс мер по предотвращению нежелательных последствий при выполнении такого типа работ.

В наши дни компьютер повсеместно используется в жизни человека: в домашних условиях, в офисах, в магазинах, на производствах, и даже в бытовой технике — другими словами, компьютеры уже стали частью повседневной жизни людей, и их использование только растёт.

Согласно изученным литературным источникам, авторы большинства исследований отмечают, что наибольшему «удару» подвергаются следующие органы тела человека: нервно – зрительный аппарат (в первую очередь глаза, но также страдает и внимание!!), нарушения работы органов сердца, системы кровообращения, образование застойных каналов, что может привезти к артриту и варикозу – всё это результат сидячего вида деятельности; снижение репродуктивной функции также из-за образования застойных зон в области таза и т.д., повышение раздражительности из-за высокой нервной нагрузки, осложнения беременности в редких случаях.

Однако, высокое радиоактивное излучение монитора персонального компьютера является объектом домыслов и пересудов: данная научная тема полностью не исследована и при соблюдении техники безопасности, а именно при соблюдении необходимого расстояния между глазами и монитором, компьютерная «радиация» не представляет опасности. Стоит ещё раз отметить, что для того, чтобы

избежать осложнений, нужно просто выдерживать положенное расстояние. Основным компонентом монитора компьютера является электронное – лучевая трубка. Если в старых образцах данного устройства количество испускаемого излучения было заметно, то на данный момент, в соответствие с установленными стандартами по охране труда, на всех новых мониторах устанавливаются защитные механизмы, которые эффективно снижают радиацию до уровня, практически не заметного относительно естественного радиационного фона планеты Земля.

Мониторы не только испускают радиацию, но ещё и создают статическое электрическое поле. При работе монитора может воссоздаваться потенциал до нескольких сотен тысяч ватт, конечно же, нахождение рядом с таким сильным полем крайне вредно для человека. Но, при отдалении человека от компьютерного экрана эффект в значительной степени убывает. Стоит отметить, что использование специальных плёнок на экран монитора позволяет минимизировать риск ущерба здоровью человека практически до нуля.

Однако, электростатическое поле покрывает не только экран компьютера, также электризуется воздух в окружающей среде. Разноимённо заряженные частицы пыли, которая оседает на экране монитора, и также электризованные частицы пыли из воздуха могут «атаковать» лицо человека и нанести урон его коже. Для того, чтобы избежать таких последствий, необходимо постоянно протирать экран компьютера и проветривать помещение.

Также, воздействию может подвергаться дыхательная система человека: заряженные частицы пыли могут попадать в лёгкие, приводят к падению ЖЕЛ – жизненная ёмкость лёгкого, таким образом, важный показатель здоровья человека будет занижен. Кроме того, пыль, попадая на кожные покровы человека может забить мелкие проходы, через которые происходит транспорт кислорода, что приведёт к забитию пор, образованию акне и другим неприятным последствия. Рекомендуется не работать перед монитором более 3 часов подряд, чтобы не вызвать аллергические реакции кожи.

Большая нагрузка приходится в первую очередь на органы зрения. Служет отметить, что страдают не только сами глаза, но и даже мозг, так как деградируют нейроны, ответственные за восприятие быстро меняющейся информации. Изображение может быть нечётким, искажённым и т.д. что отрицательно влияет на нервную составляющую. Человек, долго вглядываясь в некачественный текст перенапрягает свою нервную систему, от чего она становится менее выносливой и со временем перестаёт справляться с минимальной нагрузкой.

Нельзя не упомянуть отдельным пунктом нагрузку, которая приходится на глаза и глазные мышцы. Так, сами глаза могут испытывать большое напряжение из-за освещения, к которому применяется целый набор требований: яркость, цвет, резкость, напряжение, интенсивность излучения и т.д.; при этом, конечно, вряд ли что – то сможет заменить натуральный солнечный свет. Ведь именно место у окна считается самым приятным и безопасным с точки зрения нагрузки на зрительную систему.

После зрительной системы страдает опорно-двигательный аппарат. В следствие гиподинамии слабеют мышцы, а из-за этого, а также неправильной позы за компьютером, сильно страдает осанка и сам спинной скелет. О важности этих органов не приходится и говорить! У многих сотрудников, долгое время пребывающих за компьютером и не соблюдающих технику безопасноти, возникает синдром запястного канала: так называется заболевание, затрагивающее нервы лучевой кисти. Симптомы данного заболевания следующие: продолжительная боль и онемение пальцев кисти. Причиной возникновения болей служит сдавливание нерва, который находится между лучевой локтевой костями. К людям, подверженным риску возникновения данного заболевания относят всех, чья работа связана тем или иным образом с монотонным повторением сгибательных и разгибательных движений кисти, среди них: пианисты (вследствие больших нагрузок), барабанщики, некоторые художники и т.д.

Подводя черту под всем вышесказанным, хочется отметить, что любая профессиональная сфера деятельности человека связана с определёнными рисками

для здоровья, будь то доставка почты или полёт в космос. Однако, не сегодняшний день, разработано достаточное количество правил и методик, которые входят в охрану труда и технику безопасности. Все они не представляют из себя сложных для изучения трудов, с ними легко ознакомиться и даже, если необходимо, выучить. Приняв их к сведению, можно обезопасить себя и своих близких, сделав ещё один шаг к долгой и счастливой жизни!

Список литературы

1. **Fredd C. N., Fogler H. S.** Influence of transport and reaction on wormhole formation in porous media. *AIChE journal.* 1998 г., Т. 44, 9. - С. 1933-1949.

2. **Булгакова Г. Т., Байзигитова А. В., Шарифуллин А. Р.** Модель матричной кислотной обработки карбонатов: влияние осадка на процесс растворения. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета.* 2009 г., Т. 13, 2.

3. *Fractal nature of acid-etched wormholes and the influence of acid type on wormholes.* **Ming L., ZHANG S., Jianye M.** 5, б.м. : Petroleum Exploration and Development, 2012 г., Т. 39.

4. *3-D simulation and analysis of reactive dissolution and wormhole formation in carbonate rocks .* **P., Maheshwari.**б.м. : Chemical Engineering Science, 2013 г., Т. 90. С/ 258-274.

5. **Williams B. B., Gidley J. L., Schechter R. S.***Acidizing fundamentals.* б.м. : Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, 1979. Society of Petroleum Engineers of AIME.

6. **Fredd C. N., Miller M.J.***Validation of carbonate matrix stimulation models.* б.м. : SPE International Symposium on Formation Damage Control, 2000. SPE 58713.

7. **А.Р., Шарифуллин.***Математическое моделирование кислотных обработок скважин в слоисто-неоднородных карбонатных коллекторах : диссертация кандидата технических наук.* Уфа : БашГУ, 2010.

8.Hill, A.D., Lindsay, D.M., Silberberg, I.N., and Schechter, R.S., “Theoretical and Experimental Studies of Sandstone Acidizing”, SPEJ, 21: 30-42, February, 1981.

9.Bryant, S.L., “An Improved Model of Mud Acid/Sandstone Chemistry”, SPE Paper 22855, 1991

10.Walsh, M.P., Lake, L.W., and Schechter, R.S., “A Description of Chemical Precipitation Mechanisms and Their Role in Formation Damage during Stimulation by Hydrofluoric Acid”, JPT, pp. 2097-2112, September 1982.

11.Sevougian S. D., Lake L. W., Schechter R. S. KGEOFLOW: A new reactive transport simulator for sandstone matrix acidizing //SPE Production and Facilities (Society of Petroleum Engineers);(United States). – 1995. – Т. 10. – №. 1.

12.Quinn M. A. et al. Designing effective sandstone acidizing treatments through geochemical modeling //SPE European Formation Damage Conference. – Society of Petroleum Engineers, 1997.

13.Gdanski R.D., and Peavy, M.A., “Well Return Analysis Causes Re-evaluation of HCl Theories”, SPE Paper 14825, 1986.

14.Bryant S. L. et al. An improved model of mud acid/sandstone chemistry //SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 1991.

15.Murtaza Z. et al. An Improved Sandstone Acidizing Model: The Importance of Secondary and Tertiary Reactions //SPE European Formation Damage Conference. – Society of Petroleum Engineers, 1999.

16. Gunter W. D., Perkins E. H., Hutcheon I. Aquifer disposal of acid gases: modelling of water–rock reactions for trapping of acid wastes //Applied geochemistry. – 2000. – Т. 15. – №. 8. – С. 1085-1095.

17. Ning L. et al. A chemical damage model of sandstone in acid solution //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2003. – Т. 40. – №. 2. – С. 243-249.

18. Ning L. et al. A chemical damage model of sandstone in acid solution //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2003. – Т. 40. – №. 2. – С. 243-249.

19. Small J. S., Hamilton D. L., Habesch S. Experimental simulation of clay precipitation within reservoir sandstones 2: Mechanism of illite formation and controls on morphology //Journal of Sedimentary Research. – 1992. – Т. 62. – №. 3.

20. Xu T., Apps J. A., Pruess K. Numerical simulation of CO2 disposal by mineral trapping in deep aquifers //Applied geochemistry. – 2004. – Т. 19. – №. 6. – С. 917-936.

21. Zerai B., Saylor B. Z., Matisoff G. Computer simulation of CO2 trapped through mineral precipitation in the Rose Run Sandstone, Ohio //Applied Geochemistry. – 2006. – Т. 21. – №. 2. – С. 223-240.

22. Zerai B., Saylor B. Z., Matisoff G. Computer simulation of CO2 trapped through mineral precipitation in the Rose Run Sandstone, Ohio //Applied Geochemistry. – 2006. – Т. 21. – №. 2. – С. 223-240.

23. Taha R. et al. Simulation of sandstone-matrix acidizing in heterogeneous reservoirs //Journal of Petroleum Technology. – 1986. – Т. 38. – №. 07. – С. 753-767.

24. Li Y. H. et al. Mathematical modeling of secondary precipitation from sandstone acidizing //Spe Journal. – 1998. – Т. 3. – №. 04. – С. 393-401.

25. Suchet P. A., Probst J. L. Modelling of atmospheric CO2 consumption by chemical weathering of rocks: application to the Garonne, Congo and Amazon basins //Chemical Geology. – 1993. – Т. 107. – №. 3-4. – С. 205-210.

26. Ausset P. et al. Experimental study of limestone and sandstone sulphation in polluted realistic conditions: the Lausanne Atmospheric Simulation Chamber (LASC) //Atmospheric Environment. – 1996. – Т. 30. – №. 18. – С. 3197-3207.

27. Bottner P. et al. Decomposition of 13C-labelled plant material in a European 65–40 latitudinal transect of coniferous forest soils: simulation of climate change by translocation of soils //Soil Biology and Biochemistry. – 2000. – Т. 32. – №. 4. – С. 527-543.

28. Labrid J. C. et al. Thermodynamic and kinetic aspects of argillaceous sandstone acidizing //Society of Petroleum Engineers Journal. – 1975. – Т. 15. – №. 02. – С. 117-128.

29. Small J. S., Hamilton D. L., Habesch S. Experimental simulation of clay precipitation within reservoir sandstones 1: Techniques and examples //Journal of Sedimentary Research. – 1992. – Т. 62. – №. 3.

30. Cheng L. et al. Simulation of dynamic foam-acid diversion processes //SPE Journal. – 2002. – Т. 7. – №. 03. – С. 316-324.

31. Berger G. et al. Kinetic constraints on illitization reactions and the effects of organic diagenesis in sandstone/shale sequences //Applied Geochemistry. – 1997. – Т. 12. – №. 1. – С. 23-35.

32. Arulanandan K., Canclini J., Anandarajah A. Simulation of earthquake motions in the centrifuge: J Geotech Engng Div ASCE, V108, NGT5, May 1982, P730–742 //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – Pergamon, 1982. – Т. 19. – №. 6. – С. 130.

33. Mansch R., Bock E. Simulation of Microbiologically and chemically Influenced corrosion of Natural Sandstone //Microbiologically Influenced Corrosion Testing. – ASTM International, 1994.

34. Li C. Fine scale sandstone acidizing coreflood simulation : дис. – 2004.

35. Moss P. D., Edmunds W. M. Processes controlling acid attenuation in the unsaturated zone of a Triassic sandstone aquifer (UK), in the absence of carbonate minerals //Applied Geochemistry. – 1992. – Т. 7. – №. 6. – С. 573-583.

36. Bryan N. D. et al. The simultaneous modelling of metal ion and humic substance transport in column experiments //Journal of Environmental Monitoring. – 2005. – Т. 7. – №. 3. – С. 196-202.

37. Sumotarto U. et al. An integrated sandstone acidizing fluid selection and simulation to optimize treatment design //SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 1995.

38. Zhang H., Hiscock K. M. Modelling the impact of forest cover on groundwater resources: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands, UK //Journal of Hydrology. – 2010. – Т. 392. – №. 3-4. – С. 136-149.

39. Smith B. J. et al. Modelling the rapid retreat of building sandstones: a case study from a polluted maritime environment //Geological Society, London, Special Publications. – 2002. – Т. 205. – №. 1. – С. 347-362.

40. Smith B. J. et al. Modelling the rapid retreat of building sandstones: a case study from a polluted maritime environment //Geological Society, London, Special Publications. – 2002. – Т. 205. – №. 1. – С. 347-362.