

# Обобщение опыта отечественных и зарубежных ученых в области механизма применения внутрипластового горения

## Рычковский А. А.

*Рычковский Артем Андреевич / Rychkovsky Artem Andreevich – бакалавр,  
кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений,  
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

**Аннотация:** уменьшение КИН (коэффициент извлечения нефти) и увеличение доли трудноизвлекаемых запасов нефти как в России, так и в мире в целом, обуславливает актуальность применения термических методов повышения нефтеотдачи пластов. В представленной статье, речь пойдет о термическом методе добычи нефти с применением внутрипластового горения.

**Ключевые слова:** внутрипластовое горение, иницирование горения, прямоточное сухое внутрипластовое горение.

Метод вытеснения нефти с помощью внутрипластового горения был предложен советским инженером А. Б. Шейнманом в начале 30-х годов двадцатого века. По результатам лабораторных исследований и опытов по внутрипластовому горению впервые в мире были проведены работы на Ширванском месторождении Краснодарского края в 1934 году [2, с. 153]. Сам процесс внутрипластового горения основывается на использовании энергии, полученной при частичном сжигании тяжелых фракций нефти (кокса), а в условиях баженовской свиты еще и на пиролизе керогена [4, с. 98], при нагнетании окислителя в пласт с поверхности. В связи с экзотермической реакцией внутри пласта, рассматриваемый метод включает в себя все преимущества тепловых методов: вытеснение нефти горячей водой и паром, а также смешивающегося вытеснения, происходящего в зоне термического крекинга, где все углеводороды переходят в газовую фазу.

Учитывая накопленный опыт из теоретических исследований и экспериментальных работ, проведенных учеными по всему миру, стали определены основные закономерности процесса внутрипластового горения [3, с. 501]:

- процесс внутрипластового горения в значительной мере зависит от пластового давления, типа породы и нефти, а также от начальной нефтенасыщенности;
- интенсивные экзотермические реакции окисления нефти проходят в узкой зоне продуктивного пласта, которая называется фронтом горения;
- внутрипластовое горение может осуществляться в виде сухого внутрипластового горения (СВГ), влажного внутрипластового горения (ВВГ) и сверхвлажного внутрипластового горения (СВВГ);
- главным параметром для ВВГ и СВВГ является водовоздушный фактор (ВВФ), смысл которого заключается в отношении объема закачиваемой в пласт воды к объему закачиваемого в пласт воздуха;
- на фронте горения СВГ и ВВГ температура достигает в среднем 350-500С°, а при СВВГ колеблется в пределах 200-300С°.

Простейший вариант внутрипластового горения рассматривается в диссертации [4, с. 98], и заключается в том, что его можно осуществить между нагнетательной скважиной, в которую нагнетают воздух, и добывающей, которая служит для отбора продуктов горения. В связи с этим, перед фронтом горения под воздействием горячей воды, водяного пара, а также паров легких углеводородов и газов происходит вытеснение нефти. В результате воздействия высоких температур на зону горения в ней происходит крекинг нефти, благодаря которому из нефти удаляются легкие углеводородные фракции, а горению подвергаются только тяжелые остатки.

### Иницирование горения в пласте

Из справочника Чоловского И. П. [5, с. 272] следует, что иницирование горения может осуществляться различными способами, но главным условием для всех является нагнетание в скважину-зажигательницу окислителя: воздуха; воздуха, обогащенного кислородом или непосредственно сам кислород. В работе Узбекова В. Р. указана температура, необходимая для воспламенения нефти в пластовых условиях, которая колеблется в пределах 140-400С°.

Существует 2 способа иницирования горения в пласте:

- *Самовоспламенение нефти в пласте.* Данный способ основан на возникновении горения в нефтяном пласте, в результате саморазогрева веществ вступающих в реакцию окисления. Если скорость протекания реакции окисления превышает тепловые потери в окружающую среду, то наблюдается повышение температуры с увеличением скорости реакции. В зарубежной практике самовоспламенение наблюдалось на ряде месторождений. Примером такого месторождения может быть Мицвея Сансет, США (штат Калифорния) [1, с. 332].

Характеристика данного месторождения имеет следующий характер:

- глубина залегания продуктивного пласта – 720 метров;
- эффективная толщина пласта – 160 метров;

- плотность нефти –  $0,969 \frac{\text{Г}}{\text{см}^3}$  ;
- температура пласта –  $51,7 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- Условия нагнетания до момента воспламенения – давление 65,6 бар; расход воздуха  $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$  ;
- Время задержки до момента воспламенения – 100 суток.

Обычно время задержки воспламенения для месторождений с температурой 50-60°C составляло около 12 суток. Самовоспламенение чаще всего происходит в пластах, залегающих на глубине более 1000 м, характерными особенностями которых являются высокое давление и температура. В то время как в пластах, залегающих на малой глубине, часто приходится прибегать к инициированию горения с помощью технических и химических средств.

По результатам исследований, проведенных Айзиковичем О. М. и Булыгиным М. Г., по расчету времени самовоспламенения нефти, при использовании обобщенных лабораторных данных кинетики окисления легкой нефти [4, с. 100], можно сделать предположение, что самовоспламенение нефти в условиях баженовской свиты произойдет примерно через 10 суток после начала нагнетания окислителя.

*Принудительное воспламенение нефти в пласте.* Для принудительного воспламенения достаточно разогреть призабойную зону нагнетательной скважины (при прямоточном горении) до температуры воспламенения, путем введения определенного количества теплоты в ПЗП нагнетательной скважины. Для этого применяют следующие способы [4, с. 100]:

- использование тепла полученного в результате химической реакции при окислении определенных веществ на забое зажигательной скважины (пирофорные материалы);
- способ нагрева ПЗП электрическим забойным нагревателем, который спускают на кабеле в скважину до интервала верхних перфорационных отверстий;
- применение забойных газовых горелок;
- применение жидкотопливных глубинных нагревателей, спускаемых в скважину на НКТ.

#### **Виды внутрпластового горения**

Метод внутрпластового горения имеет две разновидности по направлению движения окислителя: прямоточное внутрпластовое горение и противоточное. В первом случае воспламенение пласта и подача окислителя происходит в одной скважине. Окислитель и фронт горения движутся в одном направлении, от зажигательной скважины к добывающим. Что касается противоточного внутрпластового горения, то зажигание пласта и нагнетание окислителя в пласт осуществляется в разные скважины. Когда в зажигательной скважине инициировано горение, окислитель подается через нагнетательную скважину в нефтенасыщенную ненагретую часть пласта навстречу распространяющемуся очагу горения. Противоточное горение имеет целый ряд ограничивающих факторов, препятствующих его нормальному функционированию. В пример можно привести фактор, смысл которого заключается в практической невозможности проведения прямоточного горения в залежах с неподвижной нефтью или битумами.

*Прямоточное сухое внутрпластовое горение.* Вид внутрпластового горения, при котором осуществляется нагнетание в пласт только воздуха. При рассмотрении установившегося сухого прямоточного ВГ, Бурже Ж. с соавторами вывел четыре основные зоны, нумерация которых проводилась в направлении распространения горения (Рисунок 1).

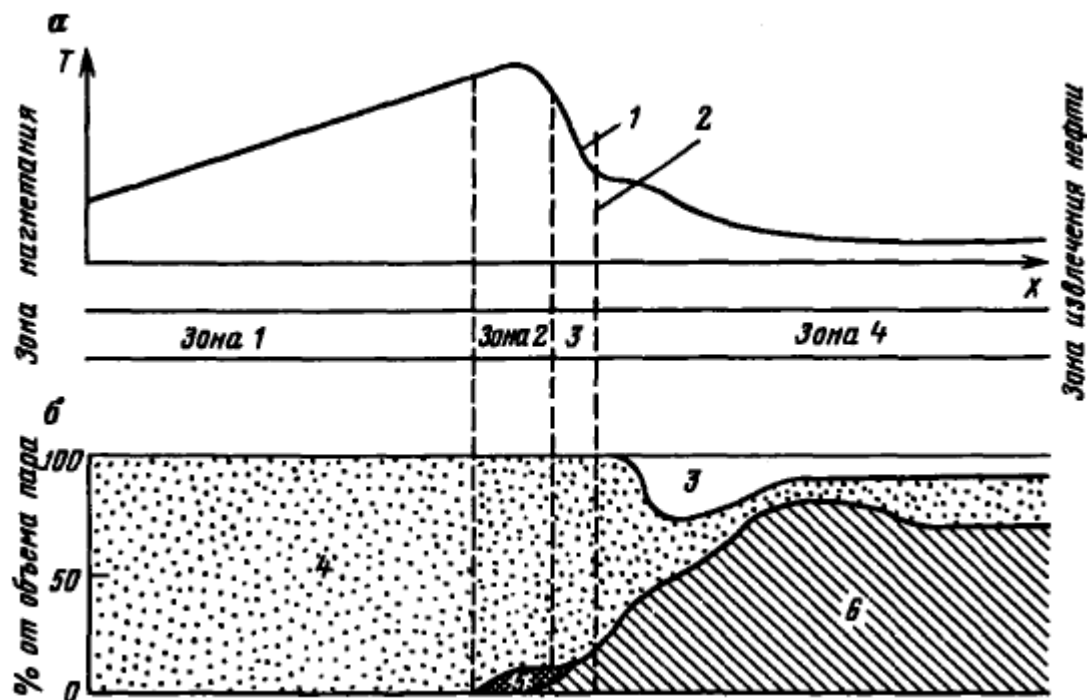


Рис. 1. Профили температуры (а) и насыщенности (б) при внутрипластовом прямоточном горении: 1 - распространение фронта; 2 - перемещение воздуха; 3 - вода; 4 - газ; 5 - кокс; 6 - нефть [1, с. 240]

Зона 1. В данной зоне произошел процесс горения, проходя через нее нагнетаемый воздух нагревается при контакте с коллектором и утилизирует часть тепловой энергии, которая выделилась при горении. Из вышесказанного следует, что зона представляет собой теплообменник, в котором температура снижается в направлении нагнетательной скважины.

Зона 2. Представляет собой зону горения, в которой происходит потребление кислорода для сжигания углеводородов и кокса, осажденного на поверхности породы. Температура в этой зоне, в основном, определяется свойствами и количеством твердых и газообразных веществ, присутствующих в единице объема зоны.

Зона 3. Является зоной коксования, в ней тяжелые фракции, которые не были смещены и не переведены в газообразное состояние, подвергаются пиролизу (химическое превращение углеводородов при нагревании).

Зона 4. В этой зоне при достаточном падении температуры заканчиваются химические превращения. Через данную зону происходит фильтрация газообразных и жидких продуктов.

При данном виде внутрипластового горения на забое воздушнонагнетательной скважины происходит процесс поджога нефти, вследствие чего зона горения начинает перемещаться нагнетаемым воздухом в направлении добывающих скважин. Однако значительная доля тепловой энергии (до 80 % и более) [5, с. 272], генерируемой в пласте, рассеивается в окружающих породах вследствие теплопроводности. Тепло будет эффективно использоваться только в том случае, если оно будет переноситься в область, находящуюся перед фронтом горения, и опережать его. При этом будет обеспечиваться извлечение легких фракций нефти из пласта до прихода фронта горения, где остаток нефти сгорает. Исправить сложившуюся ситуацию можно путем совместного нагнетания в пласт воздуха и воды. Данное совмещение получило название влажное горение.

*Прямоточное влажное внутрипластовое горение.* Осуществление данного вида горения заключается в нагнетании в пласт воздуха и воды в определенном соотношении. Если отношение количества нагнетаемой воды к количеству нагнетаемого воздуха не слишком велико, то происходит горение.

Нагнетаемая вода, соприкасаясь с нагретой движущимся фронтом породой, испаряется. Полученный пар, увлекаемый потоком газа, передает выделившуюся теплоту в область, находящуюся впереди фронта горения, где вследствие этого развиваются зоны поджога с насыщенным паром и сконденсированной горячей водой [5, с. 272].

В данном случае Бурже Ж. в своей книге выделил пять зон:

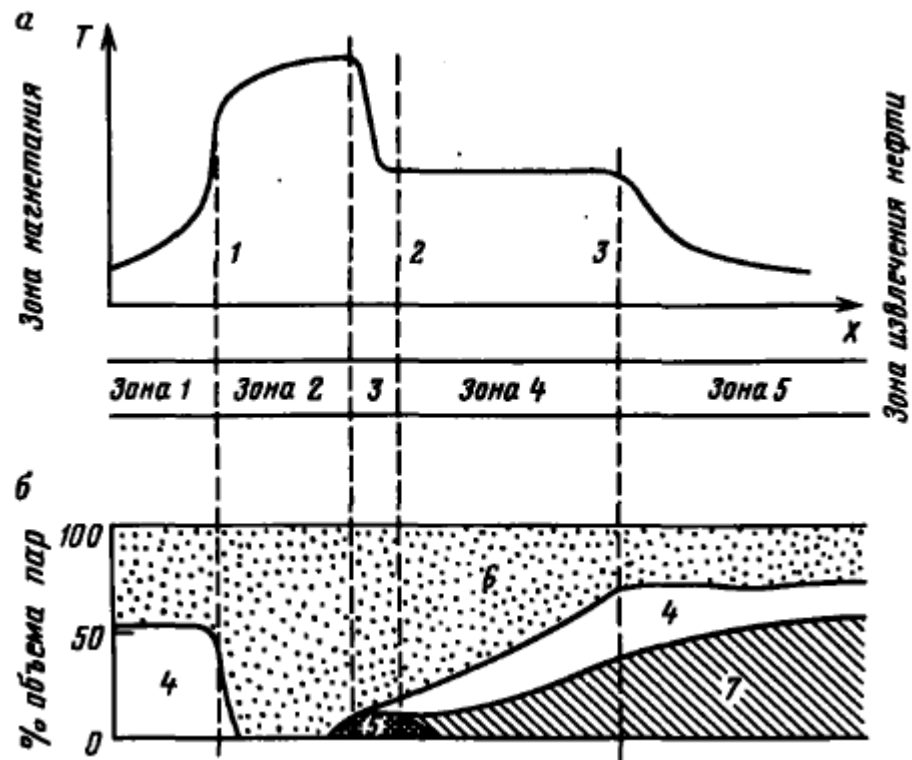


Рис. 2. Профили температуры (а) и насыщенности (б) при влажном внутрипластовом прямоточном горении: 1 – фронт парообразования; 2 – фронт горения; 3 – фронт конденсации; 4 – вода; 5 – кокс; 6 – газ; 7 – нефть [1, с. 242]

Зона 1. Выгоревшая зона, в ней почти отсутствуют углеводороды. Здесь происходит двухфазное течение пара с водой. Большая часть нагнетаемой воды не достигает фронта горения.

Зона 2. Поступившая вода находится в газообразном состоянии, а коллекторы насыщены смесью нагнетаемого воздуха и водяного пара.

Зона 3. Она представлена зоной горения. Потребление кислорода идет на сжигание не вытесненных из зоны углеводородов и кокса, который, в свою очередь, оседает на стенках коллектора на границе с зоной 4.

Зона 4. Зона парообразования и конденсации. В этой зоне реализуется постепенная конденсация паров воды, нагнетаемой в пласт, а также воды, получаемой в ходе химических реакций. Также важно отметить, что легкие и средние фракции испаряются и выносятся на границу с зоной 5.

Зона 5. В данной зоне наблюдается резкое падение температуры вследствие наличия слоя воды, за которым находится слой нефти. Характеристики пласта за этой зоной приближаются к своим исходным.

При влажном горении нефтегазоизвлечение достигается благодаря факторам, свойственным процессу вытеснения нефти паром, а также факторам, свойственным собственно процессу горения – вытеснение нефти водогазовыми смесями.

#### Заключение

Развитие тепловых методов в России и в зарубежье обуславливает большую стоимостью специального оборудования и необходимость использования достаточно плотных сеток скважин, что малоэффективно при больших глубинах залегания пластов. Тем не менее, тепловым методам нефтеизвлечения высоковязких нефтей и природных битумов практически нет альтернативы, в том числе внутрипластовому горению. Данный вид теплового воздействия на пласт имеет ряд преимуществ перед другими физико-химическими методами повышения нефтеотдачи, важнейшим из них является возможность достижения более высокой нефтеотдачи в условиях различных физико-геологических условий залегания нефтяных месторождений, а также использование при осуществлении ВГ только воздуха и воды.

#### Литература

1. Бурже Ж., Сурио П., Комбарну М. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов [Текст] / Ж. Бурже, П. Сурио, М. Комбарну. М.: Недра, 1975. 332, 422 с.
2. Желтов Ю. В. Применение термических технологий при разработке нефтяных месторождений [Текст] / Ю. В. Желтов, Г. Е. Малофеев, И. Д. Чоловская // Научно-технический журнал. 1999. № 2. 154 с.
3. Кудинов В. И. Основы нефтегазопромыслового дела [Текст] / В. И. Кудинов. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, Удмурский госуниверситет, 2004. 501 с.

4. *Узбеков В. Р.* Применение тепловых методов воздействия на породы-коллектора баженовской свиты в целях: интенсификации притока, увеличения нефтеотдачи и вовлечения в разработку запасов керогена [Текст]: диссертация / В. Р. Узбеков / Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. 98, 100 с.
5. *Чоловский И. П.* Спутник нефтегазопромыслового геолога [Текст]: И. П. Чоловский. М.: Недра, 1989, 272 с.