

УДК: 61.51.13; 61.51.19

*Е.Н. Александров<sup>1</sup>, Д.А. Леменовский<sup>2</sup>, А.Л. Петров<sup>1</sup>, В.Ю. Лиджи-Горяев<sup>1</sup>**<sup>1</sup>ИБХФ РАН, Москва**<sup>2</sup>Московский государственный университет, Москва**28en1937@mail.ru; dali@org.chem.msu.ru; petrov\_oren@mail.ru; lgvova@mail.ru*

# ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ И БИТУМОВ С УМЕНЬШЕНИЕМ КОЛИЧЕСТВА ВОДЫ В НЕФТЯНОМ ПЛАСТЕ

Проведено сравнение технологии добычи нефти с использованием бинарных смесей (БС) и применяемых в мире ведущих технологий: гидроразрыв пласта (ГРП) и паровая технология прогрева пласта (SAGD). Выявлены основные преимущества технологии БС как ресурсосберегающей и экономически выгодной. Предложено усовершенствование технологий ГРП и SAGD путём разогрева пласта теплом химических реакций бинарных смесей. Рассмотрено применение новых высокоэнергетических растворов БС на основе металлотермии и их вклад в стимулирование добычи битумов, гидрокрекинг нефти и уменьшение обводненности продуктивного пласта. Дана детальная оценка энергетических и финансовых возможностей БС.

*Ключевые слова:* бинарные смеси, скин-слой, вязкость нефти и битумов, металлотермия, горячий разрыв пласта, гидрокрекинг, уменьшение обводнения пласта.

## 1. Введение

На данный момент лишь две технологии стимулирования добычи углеводородов обеспечивают сочетание больших затрат с надежно прогнозируемой прибылью. Это гидроразрыв пласта (ГРП) холодной жидкостью (США) и нагрев пласта перегретым паром (Канада). Пар применяют также в республиках Коми и Татарстан (Россия) (Александров и др., 2008; Хисамов, 2007).

Известная технология пластового горения для стимулирования добычи нефти в России ныне применяется редко. Причина – официальный запрет на закачку воздуха в скважину в связи с опасностью взрыва смеси воздуха с углеводородами в стволе скважины. Недостаток метода – практически не контролируемая конфигурация фронта пламени. Расчет эффективности, как правило, неоднозначен потому, что при движении фронта пламени может без адекватного увеличения добычи выгорать слишком много нефти.

Привлекательность тепловых методов связана с сильным уменьшением вязкости и возможностью значительного увеличения скорости добычи нефти при нагреве продуктивного пласта. Например, при нагреве на 100 градусов тяжелой нефти плотностью 0,96 т/м<sup>3</sup> вязкость нефти уменьшается в 16 раз. Дебит нефти в случае достаточно высокого пластового давления может увеличиться приблизительно в 16 раз.

При нагреве на 100 градусов обычной (conventional) нефти плотностью 0,86 т/м<sup>3</sup> вязкость нефти уменьшается в 7–8 раз и, соответственно, дебит обычной нефти может быть также значительно увеличен (Александров и др., 2002; 2008; Хисамов, 2007; Шереметьев, Соломатин, 1998; Патент..., 2008; Guntis Moritis, 2006). Приведенные здесь цифры имеют отношение не только к теории, но и к практике.

Увеличение с помощью тепла в десятки раз скорости добычи углеводородов в течение последнего десятилетия произошло на месторождениях Канады.

## 2. Сравнение технологий

Разработка огромных месторождений битумов с помощью нагретого водяного пара в течение нескольких лет вывела Канаду в ряд ведущих нефтедобывающих стран (Guntis

Moritis, 2006). Создан крупнейший технологический комплекс, разрабатывающий битуминозные пески месторождения Альберта (Канада) (Guntis Moritis, 2006). Автор (Guntis Moritis, 2006) считает, что количество углеводородов, добываемых на месторождении Альберта, в ближайшие годы сравняется с добычей нефти в Саудовской Аравии.

Неустранимым недостатком паровой технологии, однако, является быстрое обводнение продуктивного пласта, т.к. для извлечения одной тонны битума в пласт закачивают от 2,5 до 5 тонн пара, превращающегося в воду (Александров и др., 2008; Guntis Moritis, 2006). Сильное обводнение делает добычу невыгодной. После извлечения около 20 % запасов битума с помощью пара количество воды в пласте становится близким к количеству нефти, и тепло начинает расходоваться, в основном, на добычу горячей воды (Александров и др., 2008). На крупнейших месторождениях Канады с запасами в 20–30 миллиардов тонн битума такая критическая ситуация возникнет лишь через 50–60 лет. Применение паровой технологии на обычных месторождениях с запасами, меньшими в 10–100 раз, может стать невыгодным уже через 5–10 лет.

Канадская технология нагрева рыхлых битуминозных песков SAGD (steam assisted gravity drainage) рассчитана на движение под действием силы тяжести горячего жидкого битума к горизонтальному стволу скважины, из которой его откачивают. SAGD мало пригодна для добычи нефти, находящейся в твердых породах, в которых сильно затруднено движение нефти под действием силы тяжести.

Ведущие технологии (ГРП и SAGD) могут быть усовершенствованы путем разогрева пласта теплом химических реакций бинарных смесей – БС (Александров и др., 2002; 2008). Бинарные смеси – это жидкие растворы химических реагентов, которые движутся по двум отдельным каналам и реагируют при встрече в зоне продуктивного пласта под давлением, выделяя газ и тепло, уходящие в пласт под давлением, создаваемым самой реакцией. (Аналогом БС, например, является известный «коктейль Молотова», в котором при разрушении сосуда соединяются и горят два реагента.)

Тонна водного раствора БС, содержащая 0,25–0,3 тонны воды, реагирует с выделением тепла в несколько раз

больше, чем приносит в пласт тонна пара. Продукты реакции БС в 10–20 раз меньше обводняют продуктивный пласт, чем паровая технология. Расчет показывает, что при использовании ранее применяемых БС количество воды и нефти в пласте сравняется после извлечения 80–85 % нефтяных запасов пласта (Александров и др., 2008). Ранее не применяемые в скважинах составы БС, разработанные в последнее время на основе металлотермии (Годымчук и др., 2007; Кобяков, Лопухов, 2008), могут стать реальной основой для удаления воды из продуктивного пласта.

По сравнению с ныне действующей паровой технологией развиваемая технология БС в перспективе более выгодна потому, что:

- с использованием ранее применяемых смесей она пригодна для извлечения запасов нефти или битумов любого месторождения практически без увеличения степени его обводнения;
- с помощью БС в сочетании с металлотермией она пригодна для стимулирования добычи нефти с уменьшением количества воды в продуктивном пласте;
- при периодическом прогреве продуктивных пластов может стимулировать более быструю добычу углеводородов и существенно сократить время эксплуатации месторождений.

Следует отметить также, что из-за потерь тепла на коммуникациях пар закачивают на глубину, обычно не превышающую 800–900 м. Бинарные смеси закачивают холодными по отдельным каналам, и потому они могут пройти до любой глубины без потери тепла в коммуникациях.

Практика обработки пласта с вязкой нефтью показала, что горячие газы, образующиеся в зоне реакции, входят в пласт значительно легче, чем жидкость, используемая в технологии «холодного» ГРП. Поэтому при разрыве пласта горячим газом давление, опасное для скважины, возникает реже, чем при разрыве пласта не нагреваемыми жидкостями (Александров и др., 2008). Горячий разрыв пласта предпочтительно производить, применяя реакции БС, в которых выделяется водород (Шереметьев, Соломатин, 1998; Годымчук и др., 2007). Этот газ можно использовать как проникающий теплоноситель, который облегчает развитие и ветвление новых трещин.

### 3. Работа на скважинах с применением мало энергетических БС

Простейший состав мало энергетических бинарных смесей (Шереметьев, Соломатин, 1998) массой 1 кг выделяет в среднем около 2 МДж тепла. Эти реагенты в количествах, недостаточных для масштабного прогрева пласта, в России в последние годы применяли для очистки от загрязнений узкой зоны (скин-слоя) около ствола скважины (Александров и др., 2008; Шереметьев, Соломатин, 1998).

Растворы неорганической (минеральной) селитры и инициатора реакции (нитрита натрия), разделенные слоем буферного (инертного) раствора, закачивали в скважину по одному каналу – по насосно-компрессорной трубе (НКТ) (Александров и др., 2008; Шереметьев, Соломатин, 1998). Газ, выделившийся после выхода растворов из НКТ и реакции их в обсадной трубе, входил в пласт.

В России, в республиках Татарстан, Удмуртия и Саратовской, Пермской, Оренбургской областях (Александров и др., 2002; Шереметьев, Соломатин, 1998) с применением БС была обработана призабойная зона пласта в несколь-

ких десятках скважин. Этот метод обычно использовали в малодебитных скважинах, дававших 1–2 тонн нефти в сутки. С целью прочистки скин-слоя инициировали реакцию от 0,5 до 1,5 тонн растворов БС. Добавочная нефть (в среднем, в количестве 0,6–0,7 тонн в сутки), полученная таким способом в течение года после обработки, окупала затраты. Тепловой вклад БС в добычу нефти в этом случае был мал, т.к. во время подготовки скважины к откачке нефти большая часть нагретой породы успевала остыть.

При сравнении с количеством добавочной нефти, полученной после обработки скважин разными технологиями выяснено, что при одинаковых затратах вариант технологии БС, применяемый для прочистки скин-слоя с малым объемом рабочего тела, в итоге давал в несколько раз меньше добавочной нефти, чем технология ГРП (США, Канада). Расчет (Александров и др., 2008) показал, что технология БС, способна конкурировать с ведущими мировыми технологиями только при масштабном прогреве пласта.

### 4. Возможности новых высокоэнергетических растворов БС

В последние годы учеными Российской академии наук (РАН) и Московского университета (МГУ) были разработаны высокоэнергетические составы БС, пригодные для теплового стимулирования добычи нефти (Александров и др., 2008; Патент..., 2008). Каждый 1 кг таких БС выделяет от 8 до 20 МДж тепла и способен нагреть на 100 К породу массой от 100 до 250 кг. Составы БС, разработанные в последние годы, выделяют в 4–10 раз больше тепла, чем используемые ранее на скважинах для прочистки скин-слоя.

Разработаны режимы реакции БС с пластовой водой, которые можно использовать для уменьшения количества воды в продуктивном пласте (Патент..., 2008).

Разработаны режимы реакции БС, в которых образующийся в реакции водород может быть использован как средство для гидрокрекинга нефти. Для этого нужен нагрев коллектора до 300–400 °С, который должен происходить в процессе реакции в трещинах пласта без нагрева труб, находящихся в стволе скважины (Патент..., 2008).

Разработаны режимы закачки растворов БС, в которых выделение тепла должно происходить только в продуктивном пласте (Патент..., 2008).

При закачке растворов БС относительно маломощные промышленные насосы способны обеспечить протекание быстрой реакции, выделяющей тепло со скоростью, превышающей мощность современных насосов технического комплекса ГРП (10 000 л.с.). Закачивая бинарные смеси с теплотворной способностью 8–20 МДж/кг со скоростью 8 кг/с, насосы стандартного цементировочного агрегата (ЦА) обеспечивают образование горячей смеси газа с жидкостью (пены), входящей в пласт. Максимальная возможная скорость выделения тепла (мощность) реакции в скважине **при полном перемешивании реагентов** равна:

$$2(4 \text{ кг/с})(8 \div 20) \text{ МДж/кг} \approx (60 \div 160) \text{ МДж/с} \approx (67000 \div 200000) \text{ л.с.}$$

Такая необычно высокая мощность может выделяться только при использовании эффективных смесителей реагентов. Упрощенная схема одного из смесителей разработанных в патенте (Патент..., 2008) представлена на Рис. При этом следует учитывать необходимость тщательной разработки и надежного контроля реакции БС, в которой

выделяется горячий газ, совершающий работу при входе в пласт.

Расчеты и эксперименты на стендах и скважинах показали, что масштабный прогрев продуктивного пласта продуктами реакции бинарных смесей, разработанных в последнее время, позволяет считать ресурсосберегающую технологию БС альтернативой паровой технологии.

## 5. Оценка энергетических и финансовых возможностей БС

В качестве примера рассмотрим стимулирование добычи тяжелой нефти плотностью  $0,96 \text{ т/м}^3$ , находящейся в терригенном коллекторе (песчанике) пористостью 20 % при начальной температуре  $40^\circ\text{C}$ .

Вязкость нефти плотностью  $0,96 \text{ т/м}^3$  при повышении температуры от  $40^\circ\text{C}$  (313 К) до  $140^\circ\text{C}$  (413 К) уменьшается от 400 до 25 сПуаз (Александров и др., 2008). Затраты тепла на прогрев от 313 К до 413 К одного кубометра терригенного коллектора, содержащего 200 литров нефти плотности  $0,96 \text{ т/м}^3$ , составляют  $Q_{100} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ кДж}$  или 210 МДж. Оценим экономичность режима периодического стимулирования с нагревом пласта два раза в год: с первым нагревом на 100 К (от 313 до 413 К) и последующим остыванием на 50 К. Второй, третий и каждый последующий нагревы на 50 К потребуют в два раза меньших затрат на химреагенты по сравнению с первым нагревом на 100 К.

Отношение тепла, введенного в коллектор с нефтью и тепла, введенного в нефть, заполняющей поры указанного коллектора, видно из равенства:

$$C/C_{\text{н}} \cdot \alpha = 2,29/2,016 \cdot 0,2 = 5,67. \quad (1)$$

Здесь  $C$  и  $C_{\text{н}}$  – теплоемкость коллектора с нефтью (песчаника) и теплоемкость нефти соответственно (Александров и др., 2008);  $\alpha$  – пористость коллектора в долях.

Согласно (1) количество тепла в коллекторе значительно превышает количество тепла в нефти. Поэтому при остывании через нагретый коллектор пористостью 20 % должна пройти и нагреться изначально холодная нефть, объем которой превышает в 5 раз объем нефти в нагретом коллекторе. При откачке нефти через  $1 \text{ м}^3$  нагретого коллектора должна пройти и нагреться изначально холодная нефть, объем которой близок к  $1 \text{ м}^3$ .

Стоимость разных химикатов, нужных для выделения при реакции БС в скважине одного млн. калорий (1 Мкалл = 4,2 МДж) тепла, не превышает 1\$ USD. Для упрощения расчетов будем считать ее равной 1\$. Для нагрева на  $100^\circ\text{C}$  одного кубометра породы пласта вместе с нефтью (коллектора) необходимо 50 Мкалл (210 МДж). Стоимость химикатов для нагрева на  $100^\circ\text{C}$   $1 \text{ м}^3$  коллектора таким образом равна 50 \$.

В итоге мы получили простой результат:

- Каждый  $1 \text{ м}^3$  коллектора, нагретого на 100 градусов при остывании и откачке может дать около  $1 \text{ м}^3$  горячей нефти;
- Для нагрева  $1 \text{ кубометра}$  коллектора нужно истратить на химреагенты не более 50 \$.

В работе (Александров и др., 2008) на конкретном примере показано, что после нагрева пласта мощностью 10 м в окрестности скважины диаметром 10 м время остывания на 50 градусов составит не менее полугода. Дебит вязкой нефти плотностью  $0,96 \text{ т/м}^3$  при этом должен увеличиться от 1 т в сутки до 10–15 т в сутки. Для прогрева  $1 \text{ м}^3$  коллектора с нефтью нужно 50 Мкалл (210 МДж) тепла,

для чего требуется израсходовать в реакции высоко энергетичные БС стоимостью около 50 \$. Учитывая реальный коэффициент полезного действия (КПД) системы закачки (0,8), получаем, что химикаты для разогрева и добычи тонны нефти должны стоить 60–65 \$. (Прочие расходы, кроме стоимости реагентов, здесь не учтены.)

Для сравнения отметим, что по нашим оценкам в Канаде для добычи одной тонны битума тратят 2,5–5 тонн пара, который с учетом КПД закачки (30 %) стоит не менее 125 \$ в расчете на одну тонну нагретого битума.

Для прогрева пласта мощностью 10 м вокруг скважины на расстояние по радиусу 10 м (объемом  $3\,000 \text{ м}^3$ ) и получения около 3 000 тонн добавочной нефти нужно затратить 150 000 \$ на покупку химикатов (Александров и др., 2008).

Учитывая, что время обработки одной скважины составляет 2–3 суток, стоимость операции с учетом прочих расходов по оценкам не должна превысить 200 000 \$. Полные затраты на получение одной тонны добавочной нефти таким образом не должны превысить 100 \$.

Отметим, что реальность приведенных цифр подтверждена результатами масштабного применения тепла для увеличения добычи углеводородов на месторождениях Канады.

Далее рассмотрены новые способы и приспособления, разработанные для применения технологии БС.

## 6. Способы эффективного применения БС

### 6.1. Способ горячего газового разрыва пласта

Технология БС, в которой, как правило, создаются трещины для быстрого ввода теплоносителя в пласт, является технологией горячего разрыва пласта. Практика работы на стендах и скважинах показала, что в случае тяжелой вязкой нефти трещины в пласте появляются под действием горячих газов при давлении на 20–30 % ниже, чем под действием холодной жидкости (Александров и др., 2008).

Высокую мощность реакции при закачке бинарных смесей можно реализовать с помощью смесителей реагентов, которые обеспечивают степень превращения и коэффициент полезного действия, близкие к единице. В работе (Патент..., 2008) предусмотрены смесители, в которых вращение турбины происходит, частично, за счет энергии, выделившейся в начальной фазе реакции БС. По сути – это машина, которая должна работать на энергии растворов БС. Конструкция защищена от перегрева постоянством температуры испарения раствора, как правило, при рабочем давлении 200–300 бар не превышающей  $250^\circ\text{C}$ .

На рисунке дана схема смесителя.

В зоне, находящейся перед первичным винтом 5, в которой соединяются компоненты С и Б, происходит реакция, энергия которой расходуется на вращение вторичного винта 7. Основная часть энергии в скважине выделяется напротив продуктивного пласта при смешивании компонентов А и С. В этом варианте пакер с циркуляционными клапанами (на рисунке не показанный) находится в скважине на 50–100 м выше (на рисунке – левее).

Такое техническое решение особенно ценно. В первом приближении намечено решение давней проблемы создания двигателя, работающего в скважине. Ранее эту задачу пытались решить с помощью двигателя внутреннего сгорания, опускаемого в скважину. Опытные образцы двигателей, работающие в скважине, сгорали по причине накопления накипи в рубашке охлаждения камеры сгорания.



Возможны два режима горячего разрыва пласта (Рис.).

**Режим 1 (низкотемпературный).** Реакция в стволе скважины протекает при непрерывной закачке растворов А, С и Б, во время которой температура напротив продуктивного пласта не превышает температуру разрушения цементного камня, в котором закреплена обсадная труба (200–250 °С). Такой режим реакции создает трещины, по которым за короткое время в пласт можно ввести несколько десятков тысяч МДж тепла достаточного для прогрева тысяч тонн нефтяного пласта.

**Режим 2 (высокотемпературный).** Реакция в первой стадии протекает в стволе скважины, во время которой в пласте создаются трещины. На второй стадии отключается подача по каналам Б и С, а по каналу А подается смесь инертной жидкости (воды или керосина) и порошка (гранул) металла до заполнения ими трещин в пласте. Затем в трещины закачивается компонент, реагирующий с вышеуказанными порошком или гранулами. (Например, в технологии ГРП такая операция предусмотрена для закрепления трещин искусственным песком или пропантом.)

В этом режиме можно производить нагрев пласта до высокой температуры (300–400 °С). При этом закачка реагентов в скважину не сопровождается нагревом труб или пакера.

Нужно отметить также, что возможным является использование продуктов реакции БС для вращения турбобура, применяемого для бурения глубоких и сверхглубоких скважин. Система клапанов, регулирующая работу реактора БС (Патент..., 2008), в первом приближении достаточна для испытания машины, изображенной на рисунке, если смеситель заменить на турбобур.

## 6.2. Способ гидрокрекинга нефти с уменьшением количества воды в нефтяном пласте

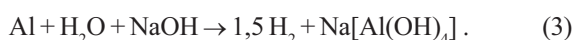
Разработаны составы, способные при высокой температуре реагировать с водой с образованием водорода. Температура 250–400 °С достаточна, чтобы образовавшийся водород при отсутствии окислителя расходовался на гидрокрекинг.

В работах (Патент..., 2008; Годымчук и др., 2007; Кобяков, Лопухов, 2005) предложен набор реагентов, пригодных для металлотермии. Для этого пригодны алюминий, магний, галлий, индий или их сплавы. При взаимодействии с водой вышеуказанные металлы производят два эффекта.

Первый заключается в собственно химическом взаимодействии металла, например, алюминия с водой. Это мощная экзотермическая реакция, сопровождающаяся выделением большого количества водорода:



В принципе, реакция имеет ряд кинетических ограничений, которые необходимо преодолевать. Это достигается изменением рН среды от нейтральной в любую сторону, например, добавлением кислоты, или щелочи (Патент..., 2008). При недостатке щёлочи протекает реакция:



Реакции (2, 3) «убирают» из пласта 1 кг воды на 1 кг введенного алюминия.

Второй эффект заключается в гидратации образовавшегося катиона алюминия молекулами воды при избытке щёлочи:



В гидратной форме один атом алюминия может связать 6 молекул воды. Этот процесс термонейтрален, т. е. идет практически без выделения тепла. Но и он, в свою очередь, может связать еще около 4 кг воды на 1 кг исходного алюминия.

В рамках современных проблем металлотермия, внедренная на промыслы, должна стать основой для нефтедобычи с уменьшением количества воды в продуктивных пластах. Кроме указанного здесь процесса масштабной алюмотермии (Патент..., 2008), в котором предусмотрена закачка в пласт тепла в количестве 100–150 тыс. МДж, известна более слабая металлотермическая обработка призабойной зоны пласта (ПЗП). В работе (Кобяков, Лопухов, 2005) предложен способ прочистки скин-слоя ПЗП тепловым импульсом в 10–15 МДж с помощью реакции твердофазных окислителей (оксидов титана, ванадия, хрома, марганца, железа, кобальта, никеля, меди, цинка, ниобия, молибдена, вольфрама, свинца) с твердофазными топливными материалами (магнием, алюминием, кремнием, кальцием). Продукты некоторых из этих реакций также способны образовывать с водой кристаллогидраты и могут применяться для борьбы с обводнением пластов. В (Кобяков, Лопухов, 2005) возможность удаления воды из пласта не предусмотрена.

В заключение следует отметить, что внедрение термохимии и металлотермии на промыслы может встретиться с серьезными трудностями, т.к.:

- не разработана и промышленностью не выпускается отечественная техника для безопасной контролируемой закачки большого количества тепла в продуктивный пласт;
- в частности, в промышленных условиях не изучены возможность выделения большой массы водорода в пласте и каналы его расходования в пласте и частичного выхода на поверхность;
- стендовые эксперименты, выполненные в РАН и МГУ, предстоит продолжить в виде масштабных опытно-промышленных работ на промыслах, которые необходимо проводить одновременно с внедрением новой техники.

Обнадеживающим фактором являются оценки потенциала технологий БС и металлотермии, указывающие на перспективу удаления воды из пласта, с получением достаточного для окупаемости количества добавочной нефти.

Если рентабельная металлотермия придет на промыслы, проблема эксплуатации обводненных месторождений приблизится к решению. В настоящее время результаты стендовых испытаний показывают, что на части малообводненных месторождений металлотермия достаточно близка к рентабельному использованию уже сегодня.

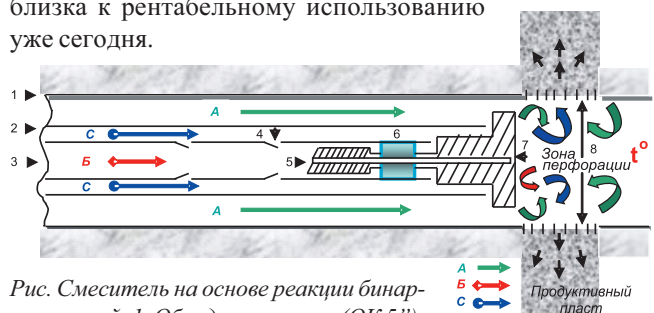


Рис. Смеситель на основе реакции бинарных смесей. 1. Обсадная колонна (ОК 5''); 2. Насосно-компрессорная труба (НКТ 3''); 3. Насосно-компрессорная труба (НКТ 1,5''); 4. Клапан внутренний НКТ 1,5''; 5. Шнек (винт) первичный; 6. Подшипник широкий; 7. Шнек (винт) вторичный; 8. Зона перфорации. А – суспензия  $\text{Al} + \text{H}_2\text{O}$  (или  $\text{C}_n\text{H}_{n+2}$  где  $n < 12$ ); Б – водный раствор инициатора ( $\text{NaBH}_4 + \text{NaOH}$ ); С – водный раствор селитры и азотной кислоты.

### 6.3. Способ искусственного фонтанирования

При вводе большой массы растворов в пласт, отодвигающих нефть от скважины, возникает вопрос о времени возвращения нефти и начала продуктивной добычи. Экспериментальная обработка скважины 169 Курбатовского месторождения Пермской области указала на возможность управляемого фонтанирования, ускоряющего возвращение нефти к скважине (Александров и др., 2008).

Продуктивный терригенный пласт мощностью 12,4 м, находящийся на глубине 1780 м и содержащий нефть плотностью 0,85 т/м<sup>3</sup>, легко принял 2100 литров реагирующих бинарных смесей, после чего с помощью свабирования в течение 23 часов откачали 25 т жидкости, в которой к концу откачки содержалась нефть (80 %) и вода (20 %). Нарастание количества газа в жидкости указывало на возможность фонтанирования. Скважину закрыли и выдержали под давлением в течение 2 часов. После открытия задвижки наблюдался интенсивный выход газа. Через 15 минут начался приток нефти, который в течение 4 часов составил 5,4 м<sup>3</sup>. В это время при герметизированном устье в районе устьевой арматуры измеренное давление в НКТ составило 1,5 атм.

По данным Заказчика начальный дебит перед капитальным ремонтом скважины составил 2 м<sup>3</sup>/сутки. По информации, полученной нами через три месяца дебит скв. 169 по истечении двух месяцев после обработки практически вернулся к прежней величине. Полное количество добавочной нефти за два месяца было оценено в 45–48 т. Стоимость химреагентов, затраченных на обработку составила около 1000 \$. Поскольку скважина 169 ранее не фонтанировала, неожиданный выброс нефти был вызван газом, выделившимся при обработке, который, растворяясь в жидкости, улучшил возможности газлифта нефти.

При масштабной закачке массы БС, соизмеримой с массой рабочего тела современной технологии ГРП (30–100 т), этот эффект, похожий на выброс жидкости газом при открытии бутылки с шампанским, может заметно ускорить добычу.

### Заключение

По сравнению с ныне действующей паровой технологией, применяемой для разработки месторождений битуминозных песков, технология БС пригодна для стимулирования добычи нефти и битумов, находящихся в любых коллекторах.

Технология БС на основе неорганической и органической селитры применима для извлечения запасов нефти или битумов любого месторождения практически без его обводнения (Александров и др., 2008).

Технология БС на основе металлотермии предназначена для извлечения запасов нефти или битумов любого месторождения с понижением степени обводнения продуктивного пласта (Патент..., 2008).

Технология БС при периодическом прогреве продуктивных пластов может стимулировать быструю добычу битумов и нефти и существенно сократить время коммерчески выгодной разработки нефтяных месторождений (Александров и др., 2008).

Технология БС может дополнить современный мощный метод холодного гидроразрыва пласта (США) в потенциале более мощным методом горячего разрыва пласта продуктами реакции бинарных смесей (Александров и др., 2002; Патент..., 2008).

Применение бинарных смесей, разработанных в после-

дние годы, открывает новые возможности промышленной термохимии. В частности, разработаны режимы реакций БС, в которых выделяется водород. Этот газ, обладающий уникальной подвижностью, можно использовать как легко проникающий теплоноситель, который может облегчить развитие и ветвление новых трещин (Патент..., 2008).

Разработаны режимы реакции БС, в которых образующийся в реакции водород может быть использован как средство для гидрокрекинга нефти. Для этого нужен нагрев коллектора до 250–400 °С, который можно осуществить реакцией в трещинах пласта без нагрева ствола скважины (Патент..., 2008). Предложен способ закачки растворов БС, в которых конструкция скважины (пакер, трубы, клапаны) не подвергается тепловой нагрузке, и выделение тепла происходит только в продуктивном пласте (Патент..., 2008).

Клапаны, устанавливаемые на каналах подачи реагентов, должны закрываться при достижении давления газа в зоне реакции, опасного для скважины, и открываться после ухода газа в пласт и понижения давления (Александров и др., 2002).

Приспособление, разработанное для циклического ввода горячего газа в пласт, может функционировать как необычно мощный двигатель, работающий на забое скважины. Работу двигателя в скважине могут обеспечить маломощные промышленные насосы, закачивающие растворы БС с поверхности. Применение высокоэнергетических БС, однако, требует в целях безопасности быстрой своевременной коррекции режима подачи реагентов. Для этого более пригодны дозировочные насосы, работа которых должна контролироваться надежной автоматической системой управления (АСУ).

При превышении опасной для скважины границы давления и температуры, подача реагентов должна прекращаться, а после разгрузки газа, уходящего в пласт, возобновляться.

Для испытания скважинного двигателя потребуются тщательно разработанные меры по технике безопасности.

В свете изложенного реальным представляется создание, возможно, вначале затратной, а в перспективе коммерчески выгодной технологии промышленной термохимии, в частности, промышленной металлотермии, что позволит решить проблему добычи нефти с уменьшением количества пластовой воды вначале на мало обводненных месторождениях. После решения этой задачи можно будет ставить вопрос об «оживлении» сильно обводненных законсервированных месторождений в недрах большинства которых осталось не менее половины запасов углеводородов.

### Литература

- Александров Е.Н., Леменовский Д.А., Петрищев В. Патент № 2224103. 2002.
- Александров Е.Н., Козлов С.Н., Лиджи-Горяев В.Ю., Петров А.Л. Ресурсосберегающая технология стимулирования добычи нефти путем нагрева продуктивного пласта. *Наука и технологии в промышленности*. 2008. Т. 1-2. 71.
- Александров Е.Н., Леменовский Д.А., Коллер З. Патент РСТ/EP2008/008725.
- Годымчук А., Ильин А., Астанкова А. Окисление нанопорошка алюминия в жидкой воде при нагревании. *Известия Томского политехнического университета*. Т. 310. № 1. 2007. 14.
- Кобяков В.П., Лопухов Г.П., Патент РФ № 2295637. 2005.
- Хисамов Р.С. Опыт ОАО «Татнефть» в добыче высоковязких битуминозных нефтей. *Георесурсы*. 2007. № 3(22). 8-10.
- Шереметьев Н.В., Соломатин А.Г. Патент РФ № 2102589. 1998.
- Guntis Moritis. *Oil & gas Journal*. 2006.

E.N. Aleksandrov, D.A. Lemenovsky, A.L. Petrov, V.Yu. Lidgi-Goriaev. **Resource-efficient technology for heavy oil and bitumen recovery with low water cut.**

An oil recovery technology using binary mixtures (BMs) is compared with the leading technologies currently being used around the world: hydraulic fracturing (hydrofrac) and steam-assisted gravity drainage (SAGD). The key advantages of the thermochemical BM technology as a resource- and cost-efficient one are demonstrated. It is suggested to improve the hydrofrac and SAGD efficiencies by heating the formation by the heat produced in the binary-mixture reaction zone. Metallothermic reactions of new highly energetic BMs and their potential for stimulation of natural bitumen production, heavy oil hydrocracking, and reduction of water cut are discussed. The prospects of the thermochemical BM technology are evaluated in terms of energy and cost efficiencies.

*Keywords:* binary mixture, skin, oil/bitumen viscosity, metallothermic reactions, high-temperature hydraulic fracturing, heavy oil hydrocracking, reduction of water cut.

*Дмитрий Анатольевич Леменовский*

доктор химических наук, профессор

МГУ им. М.В. Ломоносова

119899, Москва, Воробьевы горы. Тел.: (495)-939-1234

*Евгений Николаевич Александров*

доктор химических наук, зав. лабораторией ИБХФ РАН

*Александр Леонидович Петров*

аспирант ИБХФ РАН

*Владимир Юрьевич Лиджи-Горяев*

аспирант ИБХФ РАН

Институт биохимической физики РАН. 119991, Москва,  
ул. Косыгина, 4, корп.11. Тел.: (495)-939-7318.