

УДК 665.7.032.57

**А.Е. Воробьев, Г.Ж. Молдабаева, Р.Б. Джимиева,
Н. Безноска**

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ГАЗИФИКАЦИИ И ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ ГОРЮЧЕГО СЛАНЦА В ПЛАСТАХ

Рассмотрены методы получения нефти из твердых полезных ископаемых, в первую очередь — путем разработки месторождений горючих сланцев. Для выбора наиболее экологичной и безопасной технологии разработки месторождений горючего сланца разработана группировка основных факторов, определяющих эффективность их освоения, базирующаяся на различиях в характеристиках полезного компонента, разрабатываемого продуктивного пласта и технологических особенностях.

Ключевые слова: горючие сланцы, термическое воздействие, конверсия керогена, жидкие углеводороды.

Актуальность тематики обусловлена тем, что в связи с истощением активно разрабатываемых в настоящее время традиционных месторождений нефти (рис. 1) необходимо всё большее внимание уделять развитию методов получения нефти из твердых полезных ископаемых, в первую очередь — путем разработки месторождений горючих сланцев. Это обусловлено тем, что запасы горючих сланцев составляют около $6,5 \times 10^{13}$ т.

Так, в пересчете на эквивалентную нефть (условное топливо), выделяемую в стандартной реторте, запасы нефти в горючих сланцах составляют 630 млрд т, что значительно превышает мировые ресурсы жидкого углеводородов — 280 млрд т.

Кроме этого применяющиеся в настоящее время на практике технологии разработки месторождений горючего сланца (открытая и подземная разработка) являются существенным загрязнителем окружающей среды — газами, пылью, сточными водами, токсичной горной массой. К тому же они не безопасны в технологических аспектах.

В то же время имеется конкретный инструмент предвидения и обоснования будущего технологического развития — теория индустриальных циклов, позволяющая определить вектор и характер

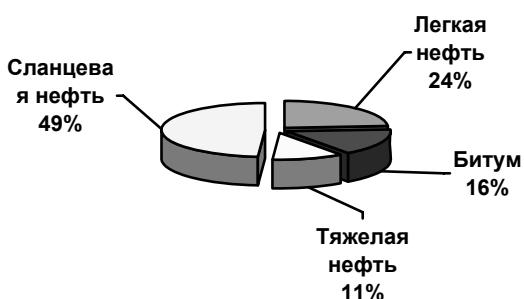
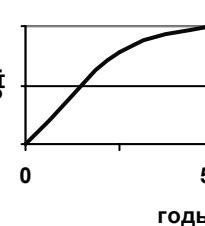
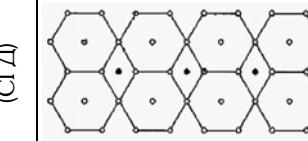
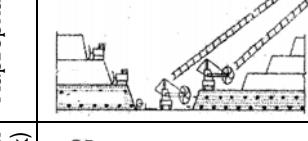
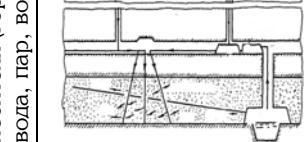
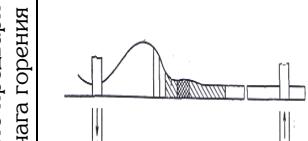


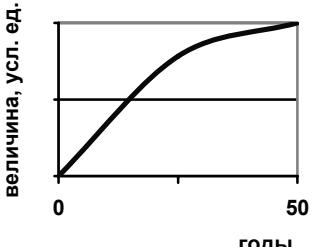
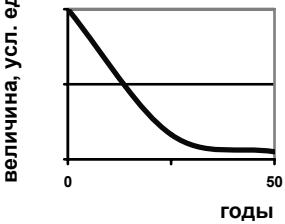
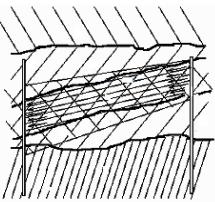
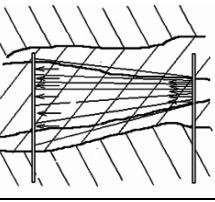
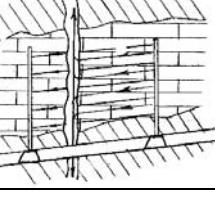
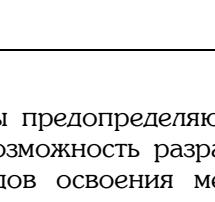
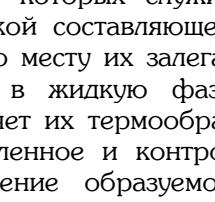
Рис. 1. Соотношение разведанных запасов легкой и тяжелой нефти, битума и сланцевой нефти

Таблица 1

Взаимосвязь технологических циклов и инновационных технологий разработки месторождений горючих сланцев

| Вид конъюнктурной волны | | Волновая фаза | Характер инноваций | Вид разработки месторождения | | Иллюстрации технологии разработки месторождений |
|-------------------------|--|--|--|--|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Конъюнктурные волны |  Повышательная волна | 2. Фаза начала повышательной волны - увеличение количества изобретений | 1. Фазы депрессии и кризиса – переход технологий на новые принципы | Эпохальные инновации | Примитивный поверхностный ручной сбор | Поверхностный сбор горючих сланцев |
| | | Пионерные инновации | Базовые инновации | Системы разработки месторождений горючих сланцев | Шахтная |  |
| | | Интенсификация методов добычи горючих сланцев | Подача теплоносителя (горячая вода, пар, воздух) | Карьерная |  | |
| | | Образование в продуктивном пласте предварительного очага горения |  |  | | |

Окончание табл. 1

| | | | | | | | | | |
|---|---|--|---|--|--|--|--|--|---|
| Конъюнктурные волны  Повышательная волна |  Понижательная волна | 3. Фаза повышательной волны – применение новых изобретений  | 4. Фаза понижательной волны  | Антиинновации  | Корректирующие инновации  | Улучшающие инновации  | 5. Интенсификация методов добычи горючих сланцев  | 6. Наложение электрического тока  | 7  |
|---|---|--|---|--|--|--|--|--|---|

совершенствования и даже кардинального изменения (смены) действующих техники и технологии (в том числе — и в области экологически более чистой разработки месторождений горючего сланца).

Современные технологии недропользования должны соответствовать следующим требованиям — иметь высокую экономическую эффективность, являться малоотходными и обладать существенной промышленной

безопасностью.

Все эти факторы предопределяют необходимость и возможность разработки новых методов освоения месторождений горючих сланцев, основной идеологией которых служит перевод органической составляющей горючих сланцев по месту их залегания в литосфере в жидкую фазу (прежде всего за счет их термообработки), целенаправленное и контролируемое перемещение образуемой

сланцевой нефти (на основе воздействия знакопеременного напряжения) по продуктивном пласту к эксплуатационной скважине (пробуренной с земной поверхности), т.е. полный уход от традиционных шахтных или карьерных систем разработок, от извлечения сланцевой руды на дневную поверхность (таким образом — отсутствие отвалов), ее обогащения (отсутствие отсева), прямого сжигания сланцевого концентратса на ТЭС (отсутствие золоотвалов).

Вместо того чтобы добывать горючий сланец и затем его перерабатывать в заводских условиях на земной поверхности более целесообразно обеспечить конверсию керогена (твердого органического вещества, содержащегося в минеральной матрице) в высококачественный промпродукт — жидкые углеводороды на месте залегания в пласте.

Термическое воздействие (температура которого может достигать соответственно 22500 К) на горючий сланец обеспечивает перевод в жидкое состояние химически связанных с минеральной матрицей горной породы высокомолекулярных соединений парафина, асфальтенов и смолистых веществ.

В современном звучании эпохальные технологические инновации в области эффективного недропользования лежат в основе становления нового технологического способа производства, базисные — направлены на освоение новых поколений техники (технологии) и технологических укладов, улучшающие инновации — способствуют распространению и дифференциации этих поколений и укладов с учетом специфических требований разных сфер их применения, а псевдоинновации — служат продлению срока жизни устаревших поколений техники (технологии), когда их потенциал в основном уже исчер-

пан (табл. 1). Причем экологичность и безопасность горного производства во многом зависит от выбора (рис. 2) той или иной конкретной технологии разработки месторождений горючих.

Первоначально, с учетом имеющейся взаимосвязи технологических циклов и возможных инноваций, для выбора наиболее экологичной и безопасной технологии разработки месторождений горючего сланца наим была разработана группировка основных факторов, определяющих эффективность их освоения, базирующаяся на различиях в характеристиках полезного компонента, разрабатываемого продуктивного пласта и технологических особенностях.

В соответствии с проведенными исследованиями, к наиболее перспективным для освоения *карьерным способом* относятся месторождения горючих сланцев, с нефтенасыщенностью свыше 15 %.

Так, открытыми методами разрабатываются горючие сланцы на глубине до 90 м, при коэффициенте вскрыши менее 3 : 1 и мощности продуктивного пласта более 5 м.

Однако, разработка горючих сланцев открытым способом (рис. 3) при большой вскрыше (свыше 100 м и при мощности продуктивного пласта равной 1,4—1,6 м) экономически бесперспективна. Причем, степень извлечения полезного компонента из недр напрямую зависит от применяющегося метода добычи (рис. 4) и составляет: при карьерном методе — 65—85 %, а при скважинном — 25—40 %.

Применение *шахтных методов* разработки целесообразно при освоении сланецсодержащих пород, залегающих в продуктивных пластах, мощностью более 5 м, расположенных на глубине 100—400 м в литосфере, с битумонасыщением свыше 15 %.

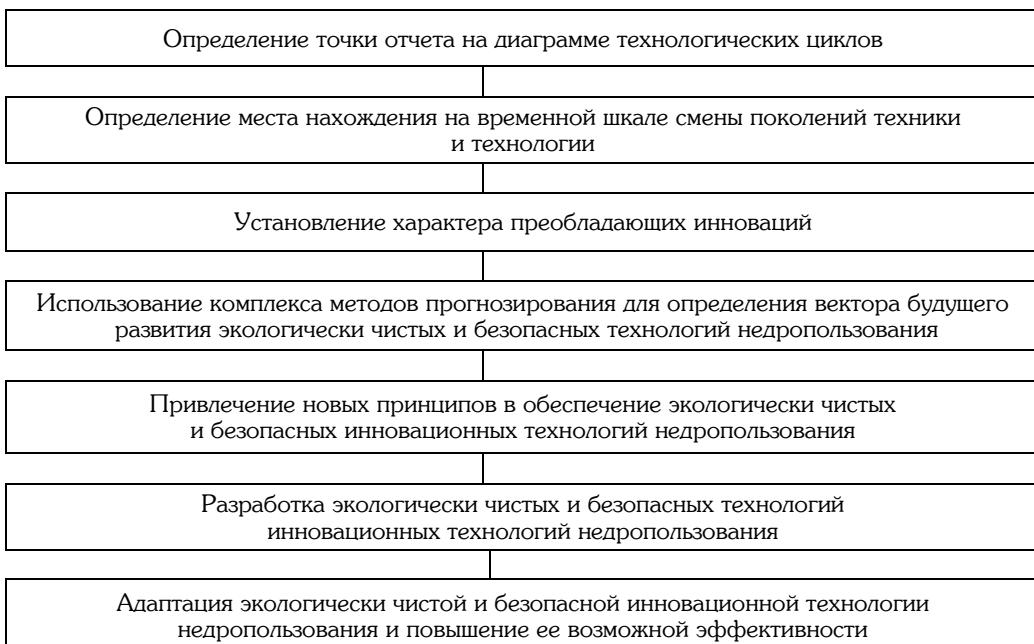


Рис. 2. Алгоритм выбора экологически чистых и безопасных инновационных технологий недропользования

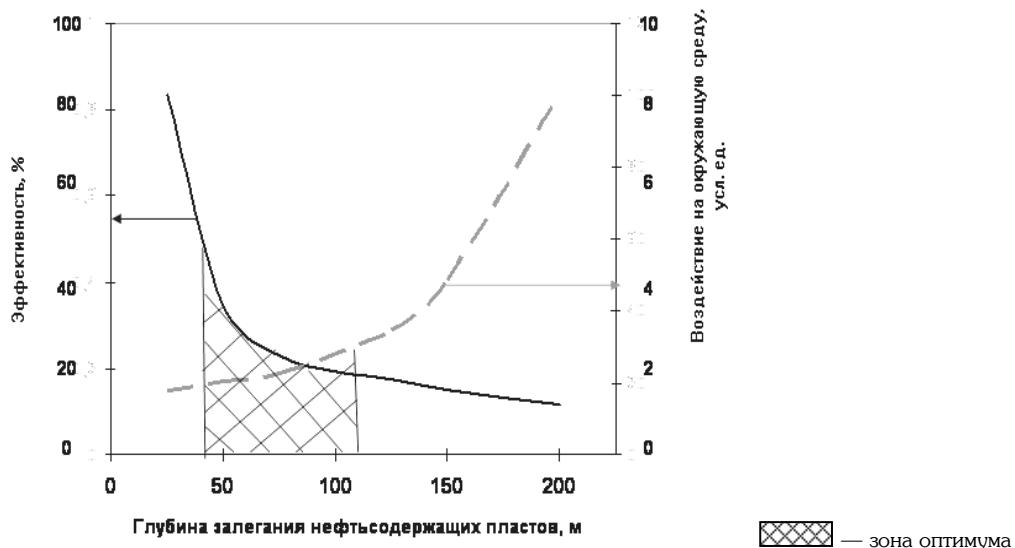


Рис. 3. Зависимость эффективности и экологичности технологии открытой разработки от глубины залегания месторождений горючего сланца

Принципиальное отличие шахтной разработки месторождений горючего сланца, от известных методов открытой разработки заключается в пере-

нose технологических процессов по добыче полезного ископаемого с поверхности непосредственно в продуктивный пласт или в близлежащие к

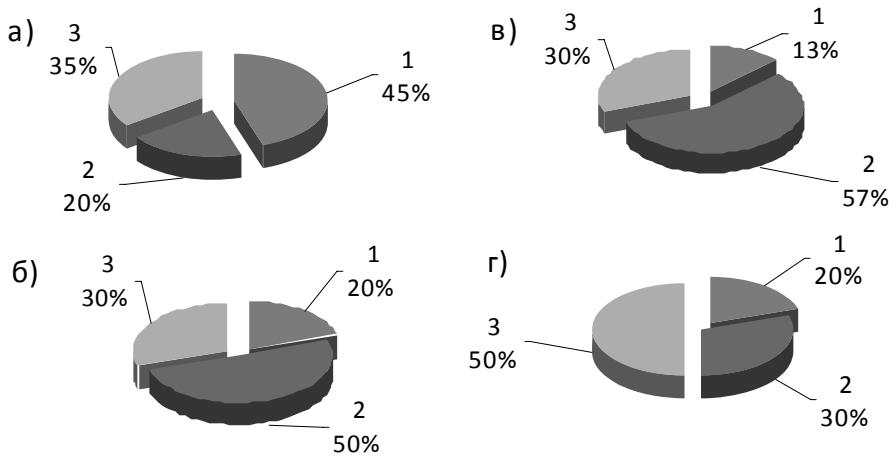


Рис. 4. Сравнительная эффективность различных систем разработки месторождений горючего сланца: а) извлечение полезного компонента из недр; б) экологическая безопасность; в) себестоимость получения полезного компонента; г) внешние ограничения применимости (глубина залегания, трещиноватость массива, климатические факторы и др.); 1 – открытая разработка, 2 – скважинная разработка, 3 – шахтная разработка

нему горизонты. Этим достигается существенное снижение экологической нагрузки на окружающую среду.

В целом, способы подземной добычи горючих сланцев можно разделить на рудные и шахтно-скважинные.

При *рудном способе* разработки горючий сланец извлекается на дневную поверхность. Впоследствии в заводских условиях содержащийся в них полезный компонент (сланцевая нефть) экстрагируется растворителями, паром или горячей водой (зачас-

тую — с добавкой поверхностно-активных веществ).

К недостаткам рудных способов разработки месторождений сланца относятся существенные объемы горных пород, неизбежно извлекаемые при ведении подземных горных работ (рис. 5) и являющиеся впоследствии загрязнителями окружающей среды (почв, вод и атмосферы) при долговременном хранении в отвалах.

Кроме этого, шахтные технологии, реализуемые в настоящее время на Ленинградском месторождении горючих сланцев (Россия), характеризуются завышенными размерами охранных целиков, что приводит к заниженному извлечению полезного ископаемого из недр (рис. 6).

Причем, при имеющихся глубинах горных работ (50–150 м) применение различных технологий подземной выемки неизбежно приводит к дефор-

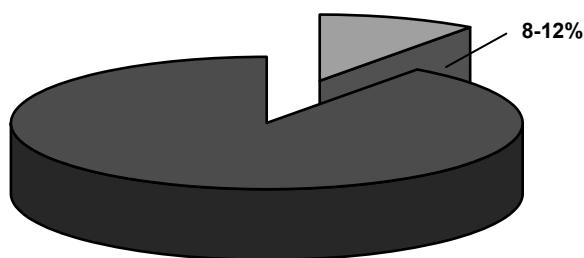


Рис. 5. Потери горючих сланцев в опорных целяках

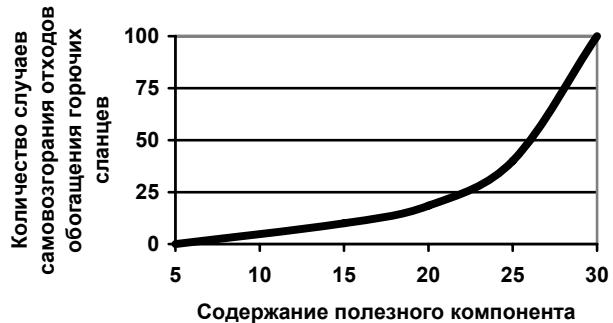


Рис. 6. Зависимость случаев самовозгорания отвалов обогатительных фабрик горючих сланцев от содержания полезного компонента в горной массе



Рис. 7. Золоотвал Таллинской ТЭС

мации подрабатываемого массива горных пород, включая земную поверхность (ее обрушение в выработанное пространство шахты).

По окончании горных работ и последующего дробления горной массы до крупности 300 мм на обогатительных фабриках, в ней неизбежно остаются нераскрытыми сростки, которые после обогащения попадают в породные отвалы, и с ними теряется до 5—7 % извлеченного из недр сланца.

Хранение в условиях земной поверхности минеральных отходов

обогащения, содержащих определенное количество горючего сланца, также оказывает негативное влияние на окружающую среду.

Кроме того, при долговременном хранении такие отвалы зачастую самовозгораются (рис.6) и в результате происходит значительное загрязнение атмосферы образующимися токсичными газами (CO_2 , CO , SO_2 , H_2S и др.).

При последующем сжигании горючих сланцев на ТЭЦ (для нужд энергетики) возникает большое количество токсичных отходов поступающих в золоотвал (рис. 7), объем которых напрямую связан с качеством сжигаемого сланца определенной линейной зависимостью. Причем все разновидности серы (содержащейся в горючем сланце) при термической обработке на ТЭС претерпевают значительные изменения в химическом составе. Так, органическая сера частично переходит в сероводород и другие летучие сернистые соединения, а все остальное остается в золе (обуславливая ее повышенную токсичность).

При обеспечении технологии подземной разработки месторождений горючего сланца наблюдается более полное извлечение минерального сырья из недр и более высокое (надежное) сохранение дневной поверхности от проседания и обрушения (рис. 8).

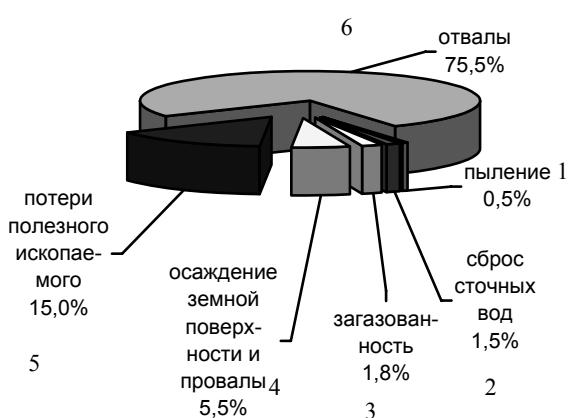
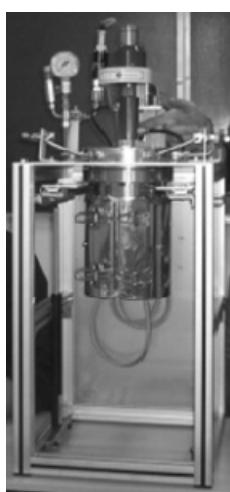


Рис. 8. Характеристика экологических проблем на сланцевых шахтах: 1 – пыление; 2 – сброс сточных вод; 3 – загазованность; 4 – оседание земной поверхности и провалы; 5 – потери полезного ископаемого; 6 – отвалы

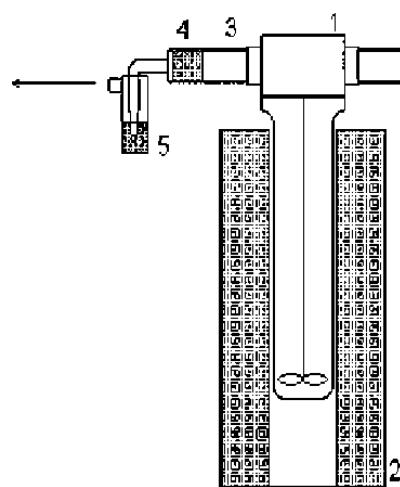
В частности, если карьеры негативно сказываются на естественном рельефе местности и на экологической ситуации в целом, а чисто скважинные системы для большинства месторождений горючих сланцев малоэффективны или просто непри-

емлемы (в силу имеющихся физико-химических свойств полезного компонента), то шахтно-очистная система не так негативно влияет на окружающую среду, обладая при этом многими преимуществами карьерной и скважиной добычи.

Помимо этого, в случае ликвидации шахт (например, в ОАО «Ленинградсланец») возникнет необходимость постоянных бюджетных затрат на их поддержание в сухом состоянии из-за опасности экологического загрязнения фенолами грунтовых вод и прилегающего водного бассейна в районе северо-западной государственной границы России (Нарвское водохранилище, Финский залив). Объем водоотлива на этих шахтах достигает 50 млн. м³ в год с высотой подъема более 100 м, при этом 80 % воды требует обязательной очистки.



а)



б)

Рис. 9. Фото (а) и схема (б) установки для пиролиза горючих сланцев

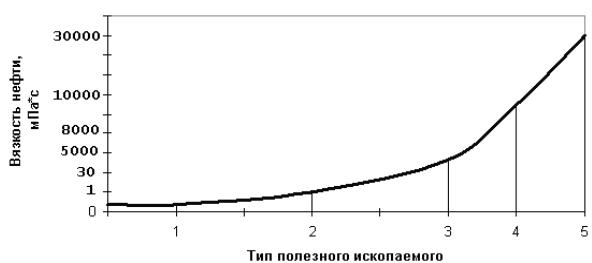


Рис. 10. Значение вязкости нефти для различных ее видов: 1 – жидккая (традиционная) нефть; 2 – высоковязкая нефть; 3 – аномально высоковязкая нефть; 4 – битумы; 5 – горючие сланцы

Поэтому, для существенного повышения темпов добычи углеводородного сырья и обеспечения полностью выработки запасов горючего сланца используют разнообразные способы теплового (термического) воздействия на продуктивный пласт.

Эксперименты по исследованию пиролиза горючих сланцев проводились на установке, изображенной на рис. 9.

Установка состоит из стального реактора 1, снабженного мешалкой и обогревателем 2. Реактор снабжен тефлоновым штуцером 3 для вывода образующейся смеси. Штуцер 3 соединен с пробоотборником 4 из резины, снабженным затвором 5 для предотвращения перемешивания, получаемой в процессе пиролиза смеси. Синтезируемая смесь, проходя через затвор, поступает в эвдиометр, служащий для измерения ее количества.

Условия проведения экспериментов по пиролизу горючих сланцев:

- субстрат — кероген горючих сланцев;
- размер частиц субстрата: < 0.5 мм;
- навеска субстрата — 200 г.;
- температурный диапазон — 250—480 °C;
- период обработки — 2—4 часа.

Влияние температуры на значение массопереноса углеводородов предлагается учитывать с помощью следующей формулы:
 $f(T_V) = 1 - \exp(-bT_V)$, (1)
где: b — эмпирический коэффициент.

Сланцевая нефть в минеральной и для ее перевода в текучее состояние матрице горючих сланцев находится в химически связанном состоянии

(рис. 10) требуется значительная энергия, что может дать термообработка (подвижной очаг горения). Так, энергия диссоциации связи C-H (в зависимости от молекулярной массы и структуры молекулы) колеблется в пределах 320—435 кДж/моль, а энергия диссоциации связи C-C — 250—348 кДж/моль. Причем при разрыве связи C-H от углеводородной молекулы отдывается водород, а при разрыве связи C-C — углеводородная молекула разрывается на две неравные части.

Для эффективного разрыва подобных связей в молекулах углеводородных соединений горючего сланца необходимо обеспечить многофакторное энергетическое воздействие (рис. 11). Причем, характер разрушения химических связей керогена при термическом разложении в большей мере зависит от значения скорости нагревания горючих сланцев. Так, при медленном нагреве керогена избирательно разрушаются наименее прочные связи. При большой скорости нагревания ускоряется и деструкция, но отстает от темпа повышения температуры, поэтому сдвигается в область более высоких температур.

При термической обработке горючего сланца происходят сложные пре-

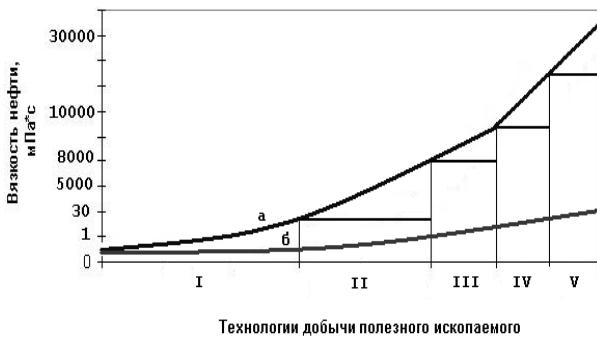


Рис. 11. Взаимосвязь значений вязкости нефти и эффективных технологий разработки месторождений: а – изначальная вязкость полезного ископаемого; б – получаемая вязкость полезного ископаемого; I – скважинная самоизливом; II – скважинная + ПАВ; III – теплоскважинная (пар) + ПАВ; IV – теплоскважинная (пар) + ПАВ + микроорганизмы; V – термоскважинная + ПАВ + ультразвук + электромагнитная обработка

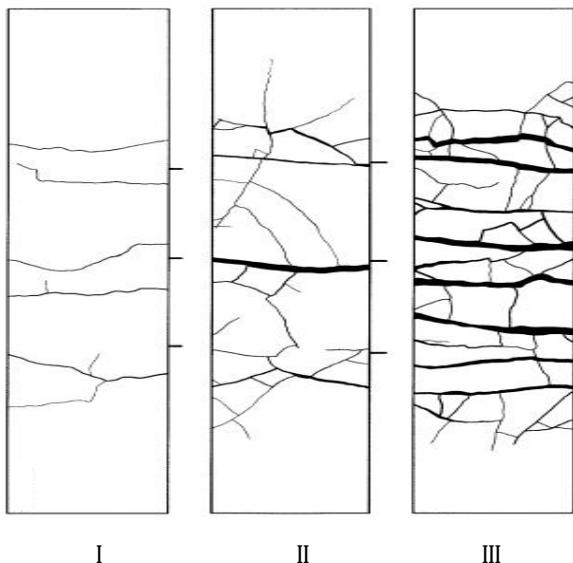


Рис. 12. Рост трещин в массиве горючих сланцев:
I – II – III – этапы развития трещиноватости

вращения, характер которых зависит как от химического строения веществ, составляющих органическую массу, так и от условий их нагревания. В результате протекающих при этом тер-

мохимических превращений керогена образуются в неодинаковом количестве и разного состава жидкие, газо- и парообразные, а также твердые продукты горения.

Это объясняется тем обстоятельством, что при нагреве сланцев до 450°C органический материал разлагается со следующим примерным содержанием: 66 % его превращается в нефтепродукты, 9 % — в газ и 25 % — в кокс.

В процессе подземной термодеструкции горючих сланцев наблюдается несколько зон:

- зона обильного выделения газа и подсольной воды (в режиме от 200 до 400 °C). Происходит выход ароматических углеводородов, в том числе, сланцевого бензина, толуола, бензола и сольвента;
- зона обильного выделения смолы (в режиме от 350 до 600 °C). При выходе смолы в пределах 20–25 % можно получить 1 т сланцевой смолы с 6 т сортового сланца;
- зона экзотермической реакции и образования пиролизных газов (в режиме от 600 до 950 °C) (ориентировочный состав газа: H₂ — 37 %; CH₄ — 20–30 %; CO₂ — 20–18 %; CO — 13–16 %; H₂S — 0,5–2,3 %; непредельные углеводороды — 5 %);

- зона превращения углеродного коксового остатка с помощью кислорода в горючие газы (в режиме от

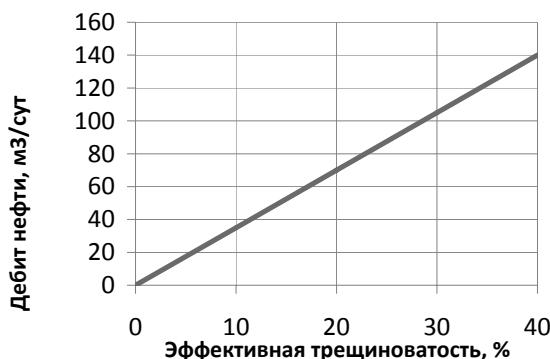


Рис. 13. Зависимость передвижения объема сланцевой нефти по пласту от его трещиноватости

950 до 1300 °C).

Суть термоскважинной разработки горючих сланцев с получением энергоносителей и металлов заключается в комплексировании двух известных способов скважинной разработки полезных ископаемых: подземного пиролиза и подземного выщелачивания металлов. Поэтому при разработке металлоносных горючих сланцев задачей подземного пиролиза ставится не только получение эко-

номически целесообразного количества горючего газа и сланцевой нефти, но и подготовка месторождения для последующего подземного выщелачивания.

Медь, серебро, кадмий, селен и висмут связаны прямой зависимостью с количеством сульфидов, рассеянных в массе горючих сланцев. Так, в ленинградских сланцах в минеральной части сульфидов были определены молибденит (49 %), ферромолибдит (27 %) и повелит (23 %).

При осуществлении подземного выщелачивания при годовой отработке 1 млн т горючего сланца можно получить:

- энергетический газ, калорийностью не ниже 960 ккал/м³, в объеме 0,7 млрд. м³ и нефтепродуктов в объеме 163 тыс. т;
- объем подготовленной золы к отработке, при зольности 70 %, составит 750 тыс. т.

С коэффициентом извлечения при выщелачивании 0,75 % и потерях до 30% объем добычи металлов может составить (т): Sr — 1240; Mo — 310; V — 300; Te — 206; U — 24—45 т и т.д.

В ходе исследований было установлено, что развитие деформационных процессов в массивах горных пород (горючих сланцев) зависит как от их исходного физико-механического состояния, так и в значительной степени от вида и скорости нагрузления.

Причем разрушение горных пород массива под влиянием внешнего воздействия начинается с дефекта (зародыша трещины), который первоначально проявляется в виде микротрещин (рис. 12).

Система трещин в пластах горючего сланца который первоначально

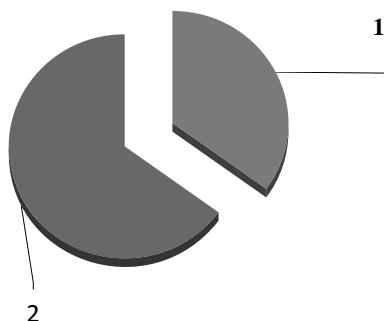


Рис. 14. Соотношение эффективности в обеспечении миграции сланцевой нефти по трещиноватому горному массиву: 1 — динамическая составляющая, 2 — термическая составляющая

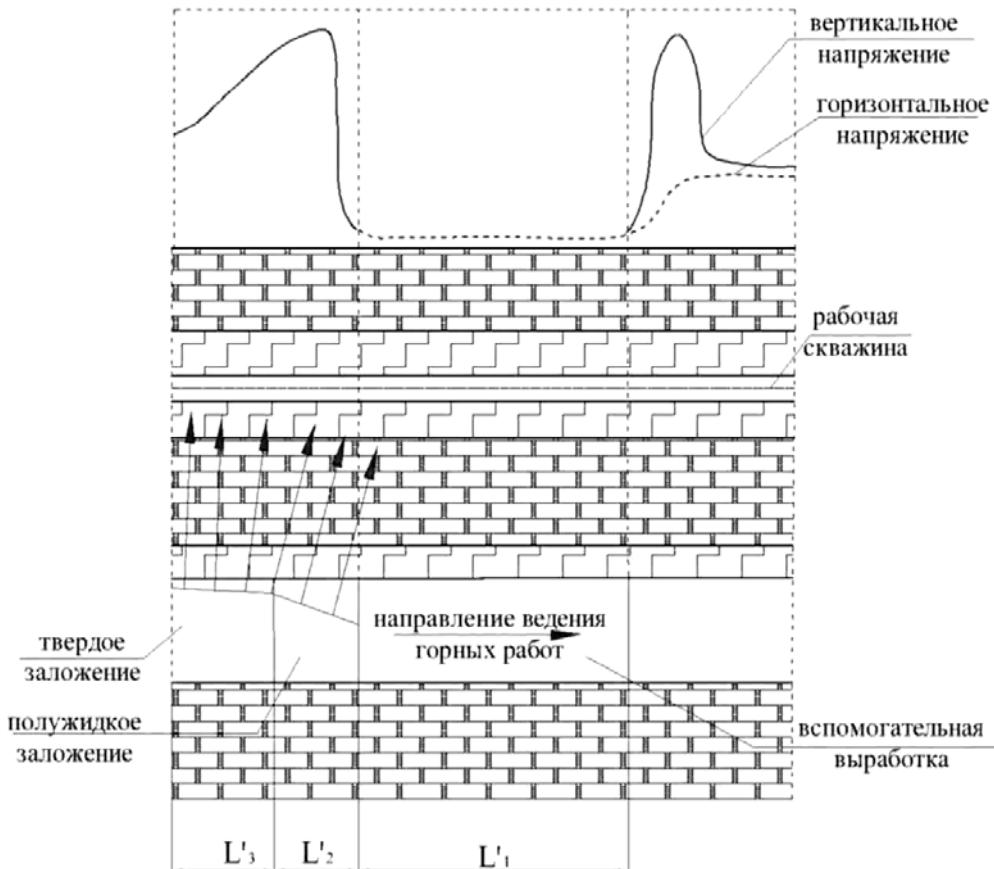


Рис. 15. Взаимосвязь технологической схемы с чередованием зон сжатия и раскрытия пласта горючих сланцев

проявляется в виде микротрещин (рис. 13), активно реагирует на внешние динамические воздействия (рис. 13), такие, как взрыв зарядов ВВ или гидроизрыв пласт (ГРП). Скорее всего, при этом в пласте не только возникают новые, но и «оживляются» старые трещины, обусловленные в прежние периоды вследствие тектонических движений.

Важным представляется соотношение потенциальной эффективности термической и динамической составляющих в обеспечении целенаправленной миграции синтези-

руемой (выжимаемой из сланца) нефти (рис. 14).

Такая неравномерность объясняется силами, приводящими к миграции сланцевой нефти по пласту, т.е. особенностями их воздействия.

Если термическая составляющая обеспечивает некоторое увеличение исходного объема сланцевой нефти, что приводит к ее миграции (вытеснению) и одновременно — к тепловой миграции, то горное давление (динамическая составляющая) производит механическое выдавливание сланцевой нефти.

Знакопеременный метод (рис. 15) воздействия пласт горючего сланца характеризуется следующими особенностями:

- создаются значительно более высокие сжимающие и растягивающие градиенты давления в масштабе, соизмеримом с размерами пор;
- существует возможность локального и направленного воздействия на определенные зоны продуктивного пласта (как по его радиусу, так и по мощности);

• происходит совместное воздействие на продуктивный пласт теплом и высокими знакопеременными градиентами давления.

В результате такого знакопеременного физического воздействия происходит увеличение выхода сланцевой нефти из продуктивного пласта, и одновременно снижение имеющегося экологического воздействия на окружающую среду при снижении энергетических затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А.Е., Джимиева Р.Б. Обоснование инновационных технологий шахтной разработки месторождений сланца и высоковязкой нефти. — Владикавказ, Изд-во СКГТУ, 2008. — 122 с.

2. Воробьев А.Е., Разоренов Ю.И., Игнатов В.Н., Джимиева Р.Б. Инновационные геотехнологии разработки месторождений горючего сланца и высоковязкой нефти. Новочеркасск. НПИ. 2008. 214 с. ГИАС

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Воробьев Александр Евгеньевич – профессор, доктор технических наук, РУДН,rudn@rudn.ru

Молдабаева Г.Ж. – Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,
Джимиева Р.Б. – Владикавказский горно-металлургический техникум,
Безноска Н. – Карагандинский государственный технический университет, Казахстан.



ГОРНАЯ КНИГА



Методика оценки анизотропии и поврежденности геоматериалов методом лазерной ультразвуковой спектроскопии с использованием установки «Геоскан-02МУ»
Автор: Лысенко П.Ю.
Год: 2013
Страниц: 12
ISBN: 0236-1493

Представлены сведения о закономерностях генерации упругих волн в результате термоупругого эффекта в геоматериалах. Описаны принцип действия и основные технические характеристики лазерного ультразвукового структуроскопа «Геоскан-02МУ». Изложена методика проведения измерений поврежденности и анизотропии с использованием указанной аппаратуры на образцах горных пород.

