

ВНУТРИПЛАСТОВОЙ РЕТОРТИНГ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Л.Я. Шварцман, Э.А. Троценко, Е.В. Баженов

ООО Инфоком; 69001, Украина, г. Запорожье, бул. Т. Шевченко, 56,
e-mail: dr@ia.ua

Розширення спектру джерел енергії визначило проблему порівняння традиційних та нетрадиційних енергоресурсів. В якості кількісної оцінки перспективності розробки енергоресурсу в практику було введено критерій порівняння: енергетична рентабельність – EROEI. У статті здійснено спробу оцінити енергетичну рентабельність внутрішньопластового ретортиingu горючих сланців стосовно запропонованого способу термозонованого резистивно-дугового нагрівання.

Ключові слова: горючі сланці, сланцевий газ, сланцева нафта, внутрішньопластовий ретортинг, нетрадиційні енергоресурси, енергетична ефективність, енергетична рентабельність, EROEI.

Расширение спектра источников энергии определило проблему сравнения традиционных и нетрадиционных энергоресурсов. В качестве количественной оценки перспективности разработки энергоресурса в практику введен критерий сравнения: энергетическая рентабельность – EROEI. В статье выполнена попытка оценки энергетической рентабельности внутривластового ретортинга горючих сланцев применительно к предложенному способу термозонированного резистивно-дугового нагрева.

Ключевые слова: горючие сланцы, сланцевый газ, сланцевая нефть, внутривластовой ретортинг, нетрадиционные энергоресурсы, энергетическая рентабельность, EROEI.

The expanding range of energy sources identified the problem of comparing the efficiency of producing conventional and unconventional energy resources. As a quantitative estimate of the availability of the development of energy resources in the practice a criterion of comparison is introduced: energy return – EROEI. In the present article an attempt was made to estimate the profitability of in-Situ retorting of oil shale in relation to the suggested method of term zoned RC-arc heating of fossil formation.

Key words: oil shale, shale gas, shale oil, in situ retorting, nonconventional energy sources, energy efficiency, energy return on energy invested, EROEI.

Тенденция стабильного роста стоимости традиционных энергоресурсов определила повышенный интерес к использованию низкокалорийных твердых энергоносителей – в частности, например, горючего сланца [1], [2], [3].

Горючие сланцы (ГС) – твердая осадочная горная порода, образованная в результате накопления в осадочных породах в условиях кислородной изоляции органического вещества – керогена. Кероген в ГС составляет от 5% до 40% .редко – до 60%. Органическое вещество вкраплено в минеральную массу в виде коллоидных частиц шарообразной формы диаметром 20 – 140 мкм. ГС содержит в порах и непосредственно сланцевый газ, состоящий преимущественно из метана. Даже незначительная концентрация сланцевого газа (0,32 – 1,0% [4]) в ГС в сложившихся условиях потребления энергоресурсов оказалась достаточной для разработки промышленных способов газодобычи. Наибольшее распространение получил фрекинг-процесс, базирующийся на технологии “гидроразрыва пласта”. В последнее время эта технология была адаптирована для добычи и сланцевой нефти (так называемая нефть сланцевых плев [2]). При помощи “гидроразрыва пласта” оказалось возможным извлекать сырье-энергоноситель до того, как оно естественным путем “созреет” и формирует месторождения, разработка которых доступна для традиционных технологий добычи нефти и газа. Первые результаты получили от некоторых аналитиков

энергорынка достаточно жесткую оценку – как работа по принципу “снять сливки и отойти в сторону”, так как эта технология позволяет извлечь совершенно незначительную часть потенциального энергоресурса сланца, экологически грязна и опасна [5].

Для фрекинг-процесса характерны негативные экологические следствия в силу значительного и интенсивного нарушения целостности недр и применения химических реагентов на территориях большой площади. В результате могут произойти значительные (до десятков сантиметров) техногенные подвижки различных участков пласта. При этом растрескивание горного массива (трещины разрыва достигают в длину 150 м) неуправляемо. Растрескивание массива распространяется как в вышележащие пласты (что может приводить к сбросам вод из вышележащих горизонтов), так и в нижележащие пласты (что приводит к загрязнению подземных вод закачиваемой жидкостью). Для выполнения одной операции “гидроразрыва пласта” в пласт закачивается более 4000 т воды [4], а возвращается на поверхность – только часть: до 30–50 % воды (а точнее химического раствора) остается под землей. Неизбежно происходит загрязнение водных пластов сланцевым газом (с примесями, как правило, сероводорода, радона, радионуклидов, тяжелых металлов и их солей – всем богатством из состава ГС [5], [6]), и рабочими растворами для “гидроразрыва пласта” [4]. При всем этом, и про-

чем, “гидроразрыв пласта” – весьма затратная технология. Горизонтальная скважина стоит \$ 2,6-4 млн [4]. Текущие расходы для одной операции “гидроразрыва пласта” составляют более \$ 250 тыс. [6]. С целью поддержания расчетного дебета скважины в течение года на каждой скважине (опыт США) проводится, в среднем, три-четыре технологические операции [4].

Несмотря на наличие информации и о достаточно обнадеживающих результатах, например, безводный способ GASFRAC (Канада) [2], приведенные данные подталкивают к осторожному оцениванию перспектив для технологии фрекинг-процесса, хотя бы исходя из исторического опыта: “Социализм – великопечная штука. Но хорошо бы посмотреть на это в другой стране” (Бисмарк, канцлер Германии, XIX век). Цинично, но в полной мере отвечает целям безопасности страны.

Возвращаясь к оценке энергетической привлекательности ГС, отмечается, что ГС являются перспективным с энергетической точки зрения ископаемым, но достаточно трудным по своей природе технологическим сырьём. Основная сложность использования ГС состоит в низкой концентрации и основного энергоёмкого компонента – керогена (теплота сгорания керогена 29-37 МДж/кг). Высокая диспергированность керогена в пустой породе затрудняет его извлечение. Эффективное и полное извлечение этого компонента – энергоносителя и ГС сегодня возможно только за счет термической переработки сланца – нагрева до температур, приводящих к полной деструкции керогена.

При пиролизе (сухой перегонке) ГС получают значительное количество парогазовой смеси (ПГС). Пиролитическое разложение керогена ГС является сложным физико-химическим процессом, сопровождающееся испарением влаги, выделением газов (СО, СО₂, Н₂С, СН₄, Н₂О, N) и образованием термобитума. Технология пиролиза обеспечивает достаточно полное разделение керогена на твердый компонент – коксозольный остаток (КЗО), и летучие вещества – сланцевый газ и сланцевую смолу (сланцевое масло), эвакуируемые из области реакции в виде смеси газифицированных углеводородов – так называемой ПГС. Значительное содержание в ПГС водорода обеспечивает высокую калорийность получаемой смеси. Процесс характеризуется высоким выходом горючей массы сланца (до 90%, мас.). Уже вне процесса пиролиза, ПГС разделяется на компоненты путем управляемой конденсации на сланцевый газ и сланцевую смолу (сланцевое масло, или другой термин – сланцевая нефть). Полученные углеводородные компоненты используются в энергетике, нефтехимии, биохимии, производстве строительных материалов, фармакологии и пр.

Получаемый в результате пиролиза Сланцевый газ состоит из смеси метана, водорода, окиси углерода и газов-примесей (в основном углекислый газ и соединения серы). Получаемая в результате пиролиза Сланцевая смола

состоит из смеси углеводородов: парафины С₁₂-С₃₂, арены, алкилбензолы, нафталин и его производные, пристан, фитан и пр. химически ценные компоненты (преобладают фракции С₁₄- С₁₆, свойственные дизельному топливу).

Накоплен значительный, более чем вековой, опыт наземной переработки горючих сланцев по технологии **внепластового ретортинга** [2]: *Galoter Process* (ГАЛОТЕР, Россия - Эстония), *Enefit* (модификация процесса *Galoter*), *Kiviter* (Эстония), *Alberta-Taciuk Process* (АТР) (Австралия), *Petrosix* (Бразилия), *Tosco II* (США), *Фушунь* (Китай), *Paraho Process* (США), *Lurgi-Ruhrgas* (Германия), *Chevron STB* (США), и др. Энергетическая эффективность технологий обеспечивается технологическими операциями, оптимизирующими физико-химические условия ведения основного процесса – процесса пиролиза. Ссылки на промышленные результаты [2, 3, 7] демонстрируют высокую эффективность применения горючих сланцев. Лидером по энергетической эффективности внепластового ретортинга является технология «ГАЛОТЕР» (*Galoter Process*), разработанная в 1950-90-х гг. в Энергетическом институте (ЭНИИ им. Кржижановского), г. Москва. Технология ГАЛОТЕР реализуется на производственных установках УТТ-3000 [3], [8]. После модернизации технологии (замена печей полукоксования ГАЛОТЕР на печи с циркулирующим кипящим слоем) в 1990-2000 гг. вновь построенные установки именуют *Enefit-140*, *Enefit-280* (классифицируемые в соответствии с проектной производительностью). Реализуемая на установках технология позволяет уравнивать по экономической эффективности ГС (даже низкокалорийные, с теплотой сгорания до 3,8 МДж/кг) с качественными углями (теплота сгорания которых более 30 МДж/кг), используемыми в традиционных энергогенерирующих установках [3].

Развитие технологии внепластового ретортинга в направлении повышения единичной мощности технологических установок обостряет экологические проблемы, обусловленные необходимостью утилизации больших объемов пустой породы и являющиеся следствием сосредоточенной в одном месте переработки исходного сырья с низкой концентрацией полезного компонента. Кроме того, присутствуют экономические ограничения, связанные с тенденцией роста глубины залегания рабочих пластов и увеличения транспортных издержек по доставке сырья к месту переработки. Именно эти следствия, как видится, будут ограничивать перспективы интенсивного развития технологии внепластовой переработки горючих сланцев.

Сегодня все больше аргументов в доказательство высокой энергоэффективности и приемлемой экологичности приводятся в пользу **внутрипластового ретортинга** (*Shell ICP*, *Chevron ICP*, *Exxon Mobil Electrofrac*, *AMSO EGL Technology*) [2]. Внутрипластовой ретортинг **сегодня** исходно уступает по показателям степени извлечения из горючего сланца компо-

нентов-энергосителей. Но исключение из технологического процесса ряда высокзатратных подготавливаемых и утилизационных операций формирует высокий потенциал перспектив этого направления развития при оценивании и его и по энергетической, и по экономической эффективности.

Как на недостаток известных способов внутривластового ретортинга ГС можно указать на значительный интервал между началом обустройства месторождения и до момента получения «первой нефти», составляющий от двух до четырех лет [2]. Кроме этого, упомянутые способы вследствие своей достаточно высокой стартовой капиталоемкости ориентированы на мощные пласты ГС – обеспечивающие приемлемые итоговые экономические показатели.

При внутривластовом ретортинге обработка ископаемого ведется непосредственно в открытом горном массиве, вследствие чего отсутствует возможность термической лимитации рабочей области. Это приводит к тому, что процессы идут параллельно во всем множестве, характерном для последовательного нагрева горючего сланца от температуры его природного залегания в горном массиве до заданного значения. Таким образом, определяющими факторами являются температура, время нахождения ГС в рабочей области и давление ПГС в зоне реакции.

Для рассматриваемого процесса внутривластовой обработки ГС определяющим фактором является температурное поле, сформированное в рабочей области ведения процесса, и такая его характеристика, как скорость его перемещения внутри пласта ископаемого. Такая постановка задачи обеспечит:

- согласование мощности нагрева с мощностью (толщиной) промышленного пласта ГС, устраняя избыточные потери на нагрев окружающего пласт горного массива;

- перемещение рабочей области внутри пласта со скоростью, обеспечивающей максимальную производительность по ПГС с ограничениями по полноте переработки ГС в отработанном объеме и составу ПГС, определяемому скоростью нагрева ископаемого.

Возможность управления скоростью перемещения рабочей области реакций в предложенном способе (TZ-RA) [9] позволяет регулировать градиент температур внутри рабочей области, а, значит, и скоростью протекания реакций пиролиза – соответственно, кроме регулирования производительностью, имеется возможность управлять не только объемом (количеством), но и составом получаемых продуктов реакции.

Теоретическое обоснование [10] этих возможностей общее как для внепластового (наземного), так и внутривластового ретортинга. Разработанная математическая модель перемещаемого в пласте ГС теплового поля используется для вариативного оценивания технико-экономических показателей внутривластовой газификации горючих сланцев исходя из воз-

можных значений тепловой мощности и скорости перемещения точечного теплогенератора и адаптируется под конкретные физико-химические характеристики горючего сланца. Мощность источника тепла и скорость его перемещения рассчитываются таким образом, что изотерма, условно ограничивающая рабочую область минимальным значением температур, определяющих начало процессов пиролиза ГС, находилась бы на границе разделения пласта ГС и пустой породы в горном массиве. Логика базовой посылки состоит в том, что теплопроводность горючего сланца на порядок ниже теплопроводности пород, составляющих окружающий горный массив – предопределяя естественные ограничения тепловых потерь в горный массив за счет оптимизации параметров теплового поля путем приведенного ограничения.

Независимо от природы источника тепла, теплогенерирующий канал целесообразно расположить внутри пласта на равном расстоянии от его граничных поверхностей. Данные допущения для процедуры оптимизации теплогенерации обеспечивают схему симметричной и равномерной аккумуляции тепла внутри пласта ГС. Несимметричное расположение канала теплогенерации (или расположение канала вне пласта ГС) привело бы к неэффективности нагрева ГС. Температурное поле рабочей области строится исходя из допущения гомогенности его теплофизических характеристик – пренебрегая при первоначальном анализе процесса анизотропностью теплопроводящих свойств ГС как слоистого материала. Глубина залегания пласта ГС, как фактор параметризации модели используется для корректировки мощности источника тепловой энергии исходя из принципа суперпозиции (наложения) тепловых полей – создаваемого и естественного температурного поля Земли. Значительное отличие показателей теплопроводности пустой породы и ГС определяют целесообразность учета мощности пласта при определении размеров рабочей области – локальной термозонированной области разогрева в пласте ГС. Тепловые потери рассеяния неизбежны, но могут быть ограничены обоснованным определением границы рабочей области исходя из разрешения противоречия:

- увеличение размеров рабочей области приведет к увеличению объема ГС в реакции, соответственно к увеличению производительности по целевым продуктам;

- увеличение размеров рабочей области приведет к непропорциональному увеличению тепловых потерь на нагрев пустой породы.

Графическая интерпретация теплового поля – семейство изотерм для $v_{op} \neq 0$, для некоторого множества входных параметров, показана на рис. 1. Скорость перемещения области реакций v_{op} функционально связана со скоростью распространения реакций пиролиза v_{pn} таким образом, что бы реакции были завершены во всех точках объема до момента их выхода из температурной области пиролитического разложения ГС.

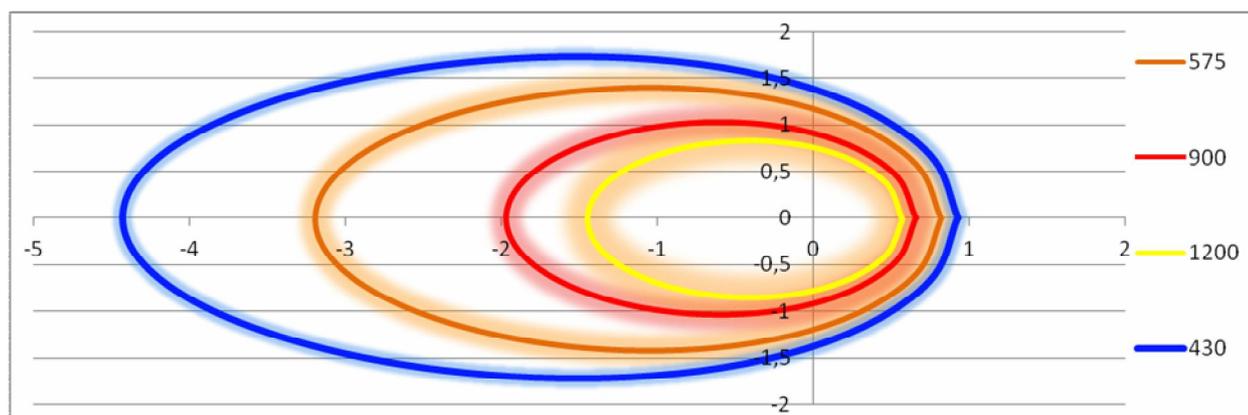


Рисунок 1 – Семейство изотерм ($T = 430^{\circ}\text{C}/575^{\circ}\text{C}/900^{\circ}\text{C}/1200^{\circ}\text{C}$), описывающих температурное поле внутри пласта от перемещаемого источника тепла

Предлагаемый к оцениванию энергетической эффективности внутрипластовой ретортинг способом резистивно-дугового нагрева пласта сланца термозонированными участками – способ TZ-RA [9] – в значительной степени свободен от многих недостатков указанных выше способов термической обработки горючих сланцев. Основанный на использовании температурной зависимости электропроводных свойств горючего сланца, позволяющей создать внутри пласта ископаемого устойчивый электропроводный канал управляемой теплогенерации, обеспечивая управляемый термический режим переработки ГС. Управление температурным и манометрическим режимом обеспечивает заданный режим пиролитической обработки включений в породу керогена. Предварительные расчеты показывают возможность путем регулирования скорости перемещения теплового фронта управлять газопроницаемостью обрабатываемого слоя пласта ископаемого. Газифицированные углеводородные компоненты в составе ПГС эвакуируются на поверхность для последующей очистки и сепарации на жидкие (сланцевая нефть) и газообразные (сланцевый газ) составляющие. Варианты практической реализации способа обеспечивают возможность создания как “точечного”, перемещаемого с заданной скоростью “теплогенератора”, так и создание устойчивого теплогенерирующего канала по всей длине горизонтальной скважины.

Способ обеспечивает упрощение аппаратной реализации и адаптацию технологии по глубине залегания и мощности пласта ГС, в силу чего может претендовать на значительную степень универсальности. Временной интервал от начала обустройства месторождения до получения товарного продукта значительно сокращается. Обеспечивая сопоставимые с широко применяемыми способами добычи сланцевого газа и сланцевой нефти показатели энергетической эффективности, предложенный способ имеет ряд преимуществ:

- отсутствие необходимости прокладки токопроводящих элементов внутри пласта ископаемого;

- отсутствие необходимости использования большого количества воды и химических реагентов;
- устранение из технологического процесса перемещения больших масс пустой породы;
- устранение загрязнения грунтовых вод химическими реагентами;
- устранение риска обезвоживания территории;
- устранение риска проседаний и обвалов почвы.

Оценка энергетической эффективности (энергетической рентабельности) выполняется по показателю **EROEI** (*energy returned on energy invested*), определяемому как соотношение полученной энергии к величине затраченной. Различие используемых методик расчета EROEI создает определенные сложности в сравнении перспективности ресурсов, тем не менее в рамках конкретной методики критерий является эффективным инструментом стратегического оценивания перспектив способа разработки энергоресурса.

Так, по данным [2] оценки EROEI для различных технологий получения энергоресурсов:

- поверхностный ретортинг сланцев *Galoter Process (Россия - Эстония) 9,5:1*;
- поверхностный ретортинг сланцев *Enefit (Россия - Эстония) 13:1*;
- традиционная нефть (оценка Департамента Энергетики США, 2011 г.) **10,8:1**;
- сланцевая нефть (США, 2005 г.) **2 (до 7):1**, (США, 2011 г.) **15,8:1**.

В то же время оценки EROEI, приведенные в [11], несколько отличны и составляют для традиционной нефти **18:1**, для сланцевой нефти **5:1**, для традиционного газа **10:1** (и оценкой для сланцевого газа менее **5:1**). Приведенные оценки комментируются в [11]:

- как подтверждающие истощение источников традиционной нефти и рост стоимости в связи с увеличением доли ее добычи на морских месторождениях США;
- как более осторожные оценки эффективности технологии добычи сланцевой нефти и газа относительно показателей традиционных способов нефте- и газодобычи.

Таблица 1 – Оценки EROEI для различных энергоресурсов (условия США) [12]

№ з/п	Ресурс	Расчетные данные Чарльза Холла		Данные EROEI Ричарда Хайнберга, 2009 г.
		Расчетный год	EROEI	
1	Нефть и газ	1930	>100	
2	Нефть и газ	1970	30	
3	Нефть и газ	2005	11 – 18	
4	Общемировая добыча нефти	1999	35	19
5	Природный газ	2005	10	10
6	Уголь	1930	>100	50
7	Уголь	1970	30	
8	Битуминозные пески		2-4	5,2 – 5,8
9	Сланцевая нефть		5	1,5 - 4
10	Ядерная энергия		15	1,1 - 15
11	Гидроэнергия		>100	11 - 267
12	Ветровая энергия	2007	18	18
13	Фотовольтаика	2004	6 - 8	3,75 - 10
14	Этанол из сахарного тростника	1986	0,8 - 1,7	8 - 10 (Бразилия)
15	Кукурузный этанол	2006	0,8 - 1,6	1,1 - 1,8
16	Биодизель	2008	1 - 3	1,9 - 9

Сложнее с сопоставлением оценок поверхностной переработки сланцев с оценками добычи сланцевой нефти без уточнения методики расчета EROEI – что подтверждают данные таблицы 1 из другого источника [12]. Конкретизируют приведенные рассуждения по инструментарию EROEI выводы, приводимые в источнике [12] и подкрепленные примером проекта разработки. А именно, в настоящее время используют две методики расчета EROEI:

- на основе учета прямых энергетических и материальных затрат;

- на основе экономико-энергетического пересчета.

Для целей сравнения эффективности добычи энергоресурсов предпочтительнее первая методика – расчет EROEI по второй методике уступает в точности [12]. По первой методике в расчетах EROEI учитываются капитальные энергозатраты, операционные, природоохранные, ликвидационные энергозатраты. Расход ГСМ, электроэнергии учитывается прямо, тогда как энергозатраты, связанные с расходными материалами, такими как сталь, цемент, учитываются исходя из удельной энергоемкости производства одной единицы расходного материала.

Универсальность и простота концепции оценок EROEI, к сожалению, не подкреплены простотой их расчета. В формировании оценки учитываются прямые энергозатраты, непосредственно связанные с производственной деятельностью, и косвенные энергозатраты, обеспечивающие весь цикл жизнедеятельности добычи ископаемого. Учет прямых затрат ведется и достаточно жестко регламентирован, но доступность к информации ограничена. Косвенные затраты в значительной степени зависят от методики их учета, определяемой глубиной и, за-

частую, целью оценивания – ведь кроме самого процесса добычи топлива решаются вопросы его транспортировки, распределения, получения от топлива полезной конечной работы или энергии, утилизации отходов всех этих процессов.

Понимая зависимость EROEI от выбора методики оценки, полноты и достоверности исходных данных, для оценивания способа TZ-RA были использованы данные сравнительного анализа технологий ретортинга [8] (табл. 2). Приведенные данные выражают некоторую усредненную оценку эффективности промышленных способов переработки ГС и являются результатом многофакторного анализа, выполненного лидерами в проектировании и строительстве соответствующих производств [8]. Как видно, используемая методика является более информативной для оценивания экономических перспектив способа, включая критерий EROEI только как составной элемент. Методика позволяет учитывать значительно более широкий спектр факторов, порожденных полным жизненным циклом месторождения.

В таблице 2, в столбце **ICP** приведена усредненная оценка технологий внутрислоевого переработки ГС. Значительное отличие от технологий внеслоевого (наземного) ретортинга отмечается по оценкам $E = 0,5$ и $S = 0,5$ – оба показателя наихудшие. Эти значения показателей предопределены объективными отличиями условий организации процессов, так как преимуществами внеслоевого (наземного) ретортинга являются:

- тщательная подготовка к основному процессу (пиролизу) используемого сырья (оптимизация фракционного состава и влагосодержания) – что оптимизирует процессы теплообмена с теплоносителем;

Таблица 2 – Сравнение промышленных технологий реторинга горючих сланцев [8]

параметр (parameter)	symbol	definition	Technologies						
			ICP	Galoter	Kiviter	Petrosix	ATP	Tosko II	Lurgi-Ruhrgas
Доля ресурса, подвергнутого переработке – обработанная доля ресурса (Processed share of Resources)	R	R = Processed shale / Resources of oil shale;	1	0,75	0,3	0,65	0,75	0,75	0,75
Отношение суммы извлеченной и утилизированной энергии к энергии переработанного сланца (Energy extracted and used)	E	E = (extracted + recovered energy) / HHV of oil shale processed;	0,5	0,91	0,7	0,7	0,85	0,81	0,87
Отношение суммы использованной на добычу и переработку к сумме извлеченной и утилизированной энергии (Spent Energy used for mining & processing)	S	S = energy spent used for mining & processing / (extracted + recovered energy) ; (S = 1/EROEI);	0,5	0,125	0,33	0,33	0,13	0,12	0,15
Выход энергии (Energy Output)	O	O = energy spent used for mining & processing) / Sum (extracted, recovered energy) ; S = R x E x(1 - S);	0,25	0,6	0,14	0,30	0,55	0,60	0,55
Прибыль на единицу продукции (единица – б.н.э - баррель нефтяного эквивалента, 1,576 Гкал) (Unit Profit)	U	U = (Unit Price – Unit Full Cost) / Oil Price (where Unit – B.O.E. of Energy Output) ;	0,67	0,56	0,33	0,44	0,50	0,44	0,50
Коэффициент использования ресурсов (Rate of Resources Use)	R₁	R₁ = O x U;	0,17	0,33	0,05	0,14	0,28	0,27	0,28
Дополнительные поступления в пересчете на единицу продукции (Commoditi by-pro-ducts)	C	C = Specific Receipts from Commodity By-Products per one B.O.E. / Oil Price	-	0,14	0,06	0,06	0,10	0,10	0,14
Расходы на природоохранные мероприятия в пересчете на единицу продукции (Environmental Char-ges)	E₁	E = Specific Environmental Costs / Oil Price	0,10	0,05	0,05	0,05	0,50	0,05	0,05
Конечный результат (доля от произведения рыночной цены барреля нефти на объем ресурсов, выраженный в б.н.э., формирующая прибыль от применения технологии) Final Result (R₁ + C – E₁)			0,07	0,43	0,05	0,14	0,33	0,32	0,37

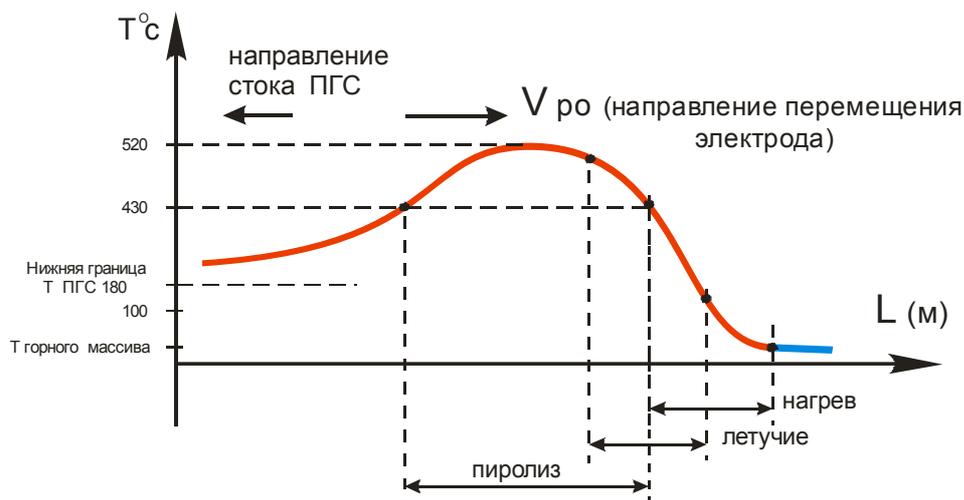


Рисунок 2 – Распределение температуры внутри пласта в районе рабочей области

- аппаратная организация процессов позволяет оптимизировать процесс пироллиза путем обеспечения заданных физико-химических условий одновременно для всего объема перерабатываемого сырья;

- аппаратная организация процессов позволяет утилизировать тепло выводимых из процесса компонентов.

Особенностью рассматриваемого способа TZ-RA [9] является возможность создания внутри пласта ограниченной термозонированной области (рис. 2), параметры которой расчетным путем оптимизируются по мощности и глубине залегания рабочего слоя, теплофизическим свойствам ГС и окружающего горного массива, концентрации и составу керогена. Возможность управление скоростью перемещения рабочей области позволяет регулировать внутри нее градиент температур, а, значит, и скорость распространения реакции. Кроме регулирования производительности, появилась возможность управлять и составом получаемых продуктов реакции. Теоретическое обоснование [10] этих возможностей обще как для внепластового (наземного), так и внутривластового ретортинга.

Возможность управление скоростью распространения реакции внутри массива ГС позволяет повысить степень извлечения компонентов-энергоносителей до $E^* = 0,65 - 0,7$. Росту показателя E^* способствуют и низкая теплопроводность окружающего ГС массива, что обеспечивает аккумуляцию тепла внутри слоя ГС.

Реализация способа TZ-RA позволяет избежать значительных капитальных затрат на обеспечение добычи и подготовки сырья, строительство производственных помещений и комплектацию производства громоздким технологическим оборудованием, решения проблем утилизации большого количества пустой породы – характерным для внепластового ретортинга. Реализация способа позволяет избежать значительных капитальных и операционных затрат создания сложной и дорогостоящей

системы внутривластовой теплогенерации, обеспечивающей многолетний нагрев массива ГС (т.ч. и уже отработанных объемов пласта ископаемого) – характерным для внутривластового ретортинга по технологиям ICP. Как следствие – уменьшение оценки S до значений $S^* = 0,19 - 0,23$ (в зависимости от мощности и глубины залегания пласта ГС).

Оценка выхода энергии (в соответствии с алгоритмом расчета по таблице 2) составит, как например для $S^* = 0,20$: $O^* = R \times E^* \times (1 - S^*) = 1 \times 0,7 \times (1 - 0,2) = 0,56$, что сопоставимо с лучшими показателями наземного ретортинга. При этом эффективность энергозатрат $EROEI (= 1/S^* - \text{см. определение } S \text{ в таблице 2})$ имеет значения от 4,35 до 5,27.

Используя значение U из той же таблицы, оценка коэффициента использования ресурса составит $R_1^* = O^* \times U = 0,56 \times 0,67 = 0,38$.

Без учета получения попутной продукции ($C = 0$), расходы на окружающую среду будут не более наземных производств $E_1^* = 0,05$. Тогда конечный результат составит $RF = R_1^* + C - E_1^* = 0,38 + 0 - 0,05 = 0,33$.

Полученная оценка сопоставима с показателями технологий внепластового ретортинга. Дополнительным преимуществом предлагаемого способа является допустимость его адаптации для маломощных пластов сланца, для глубоководных пластов – обеспечивая быстрое получение товарной продукции после начала процесса. Эффективность способа может быть увеличена путем модификации процесса введением перегретого пара и развитием глубины комплексной переработки – например, безреагентное выщелачивание позволяет обеспечить практически экологически чистое производство [13]. Предварительное извлечение органики из ГС повышает концентрацию содержащихся в сланце урана, скандия и др. рассеянных и редких элементов на 30-80% – превышая уровень, обеспечивающий экономическую обоснованность промышленной разработки.

Выводы

1. Поиск альтернативных источников углеводородных энергоресурсов с целью обеспечения существующей системы энергопотребления ставит задачи сравнительной оценки их эффективности. Критерий EROEI может быть использован для предварительного оценивания перспективности разработки энергоресурса.

2. Критерий EROEI не учитывает полноту использования энергетического потенциала природного ископаемого, что являлось бы важным моментом в оценивании перспективы разработки ископаемого с точки зрения стратегической оценки использования природных ресурсов.

3. Динамика оценок критерия EROEI показывает рост эффективности технологий внепластового ретортинга горючих сланцев.

4. Оценка эффективности предложенного авторами способа резистивно-дугового нагрева пласта сланца термозонированными участками [9], выполненная в соответствии с методикой Таблицы 2, составила $RF = 0,33$ – показывая потенциальную его эффективность. Эффективность способа обеспечивается сокращением стартовых капитальных вложений, сокращением сроков начала получения товарной продукции, пригодностью для использования на маломощных и глубокозалегающих пластах.

5. Предложенный способ [9] основан на принципах, позволяющих избежать значительных капитальных затрат, а также риска негативных экологических последствий, возможных для технологий, реализующих фрекинг-процесс (“гидроразрыв пласта”).

Литература

1 Проблемы и перспективы использования горючих сланцев в Украине / Осипов А. М., Шендрик Т.Г., Гришук С. В., Бойко З. В. // Институт физико-органической химии и углехимии (ИнФХОУ) им. Л.М. Литвиненко Национальной академии наук Украины, Донецк, Украина: материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» / Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск, 13–16 ноября 2012).

2 Нефть сланцевых плев – новый вызов энергетическому рынку?: информационно-аналитический обзор / Грушевенко Д., Грушевенко Е.; под ред. Макарова А., Митровой Т., Кулагина В. // Центр изучения мировых энергетических рынков ИНЭИ РАН. – Ноябрь 2012. – 49 с.

3 Энергетика на базе новых технологий использования низкосортных топлив / Гаврилов А.Ф. // Работы ОАО «Энергетический институт им. Кржижановского» (ЭНИИ), г. Москва. Статья в формате PDF. Режим доступа: <http://www.mtu-net.ru/lge/>.

4 Сланцевый газ: пора закрывать “Газпром”? / Коржубаев А.Г. // Наука в Сибири: еженедельная газета СО РАН, №13 (2748) 01.04.2010. Режим доступа: <http://www.sbras.ru/HBC/article.phtml?nid=540&id=12>.

5 Сланцевая нефть, газ или все вместе? (Россия) О. Н. Новиков. Западно-Сибирский филиал ООО “Экологическая группа”, г. Тюмень. Режим доступа: <http://www.ecolog-alfa.tum.ru/page7.html>.

6 Приглашение на сланец / Крючков В. // ИТОГИ, № 19/883 13.05.2013 Режим доступа: <http://www.itogi.ru/obsch/2013/19/189715.html>

7 Обзор современных термических методов переработки горючих сланцев и экологические аспекты их применения / Зюба О.Г., Глущенко О.Н. // Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия. Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7. – №4.

8 Концептуальный проект сланцеперерабатывающего комплекса “САНГРУНТАУ” на базе установок УТТ-3000 / ОАО “СПб АтомЭнергоПроект г. Санкт-Петербург, ООО “ТТУ Лтд” г. Санкт-Петербург // 17-я Международная конференция “Нефть и газ Узбекистана” (Ташкент. 15-16 мая 2013). Режим доступа: http://www.oguzbekistan.com/2013/presentations/documents/D2TS3-RuslanSalikhov-Rosatomand-Atomenergoproekt_D2TS3.pdf, <http://www.oil-shale.ru/>.

9 Пат. 87689 Украина, Способ подземной газификации углеводородсодержащего пласта / Баженов Е.В., Студеняк В.И., Троценко Э.А., Шварцман Л.Я – № и 2013 11803; заявл. 07.10.13; опубл. 10.02.14, Бюл. № 3. – 5 с. Режим доступа: <http://uapatents.com/12-87689-sposib-pidzemno-gazifikaci-vuglevodenvmismogo-plasta.html>

10 Справочник по переработке горючих сланцев / Барцевский М.М., Безмозгин Э.С., Шапиро Р.Н. – Ленинград: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, Ленинградское отделение, 1963 – 239 с.

11 Сколько будет стоить добытый в Украине сланцевый газ / Климов В. // Биржевой лидер. – 06.11.2013. Режим доступа: <http://www.profi-forex.org/novosti-mira/novosti-sng/ukraine/entry1008185838.html>.

12 EROEI как показатель эффективности добычи и производства энергоресурсов / Сафронов А.Ф., Голоскоков А.Н. // Бурение и Нефть. – 2010. – № 12. Режим доступа: <http://burneft.ru/archive/issues/2010-12/13>

13 Комплексная переработка горючих сланцев при добыче сланцевого газа / Новиков О.Н. – Тюмень: Западно-Сибирский филиал ООО “Экологическая группа”. Режим доступа: <http://www.ecolog-alfa-nafta.angr.ru/page36.html>

Стаття надійшла до редакційної колегії 12.10.14

Рекомендована до друку професором Семенцовим Г.Н. (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором Критською Т.В. (Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя)