

## References

1. World Energy Outlook 2012. Printsipy energoefektivnogo mira. [Websource]. — <http://www.iea.org/publications/publication/Russian.pdf>
2. Davyi V. Razvitye bioenergetiki — put k energeticheskoi bezopasnosti i ekologicheskoi chistote Ukrainy. *Oborudovaniie i instrument. Derevoobrabotka*, 2012, (2), pp. 68–73. (Rus.)
3. Samylin A., Jashin M. Sovremennyye konstruksii gasogenertornykh ustanovok. *LesPromInform*, 2009, (1). [Websource]. — <http://www.LesPromInform.ru> (Rus.)
4. Karp I.N., Nikitin E.E., Pyanykh K.E., Zayvy A.N. Napravleniia zameshcheniia prirodnogo gasa alternativnymi vidami topliva i energii v promyshlennosti i communalnoi energetike. *Energotehnologii i resursobereheniie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2009, (4), pp. 16–25. (Rus.)
5. Kopytov V.V. Gazifikatsiia kondensirovannykh topliv: retrospektivnyu obzor, sovremennoie sostoyaniie del i perspektivy razvitiia. Moscow : Agrorus, 2012, 509 p. (Rus.)
6. Marriott D. Turbines or engines? Selection depends on users requirements and application. *Turbomachinery International*, 2014, Jan./Feb., pp. 16–17.
7. Trusov B.G. Kompyuternoye modelirovaniye phazovykh i khimicheskikh ravnovesiy. *Inzhenernyu Vestnik*, 2012, (10), pp. 1–7. — Electronic resource: 77-48211/483186. (Rus.)
8. Stepanov S.G. Tendentsii razvitiia i novye inzhenernye resheniia v gasifikatsii uglya, *Ugol*, 2002, (11). (Rus.)
9. Stepanov S.G., Islamov S.R., Groo A.A. Avtotermicheskaya tekhnologiya pererabotki nekoksuyushchikhsia ugleyi v polukoks I goryuchiy gas. *Vestnik TEK Kuzbassa*, 2004, (7). (Rus.)
10. Kollerov L.K. Gazomotornyye ustanovki, Moscow; Leningrad : Mashgiz, 1951, pp. 13–14. (Rus.)
11. Karp I., Pyanykh K., Yudin A. Biomass : Combustion and Gasification for Substitution of Natural Gas, *[Industrial Heating]*, June 2013, pp. 39–42.

Received October 10, 2014

УДК 662.67:66.092–977

**Шварцман Л.Я., канд. техн. наук, Троценко Э.А.,  
Баженов Е.В., канд. техн. наук**

**ООО «ИНФОКОМ ЛТД», Запорожье**

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

## Внутрипластовой ретортинг горючих сланцев. Оценка энергетической эффективности

В связи с расширением спектра источников энергии появилась необходимость сравнения эффективности получения традиционных и нетрадиционных энергоресурсов. В качестве количественной оценки перспективности разработки энергоресурса в практику введен критерий сравнения — энергетическая рентабельность (EROEI). Выполнена оценка энергетической рентабельности внутрипластового ретортинга горючих сланцев применительно к предложенному авторами способу термозонированного резистивно-дугового нагрева пласта ископаемого. Использование температурной зависимости электропроводных свойств горючего сланца в сочетании с технологией горизонтального бурения и накопленным опытом автоматизированного управления электротермическими процессами позволяет реализовать альтернативную схему получения углеводородов. Предложенный способ имеет ряд преимуществ по сравнению с широкоприменяемыми способами добычи сланцевого газа и сланцевой нефти такими, как Фрекинг-процесс и внепластовой ретортинг, обеспечивая экологическую безопасность технологии и существенное сокращение капитальных затрат на освоение энергоресурса. *Библ. 13, рис. 1, табл. 2.*

**Ключевые слова:** горючие сланцы, сланцевый газ, сланцевая нефть, внутрипластовой ретортинг, нетрадиционные энергоресурсы, энергетическая эффективность, энергетическая рентабельность (EROEI).

Стабильный рост стоимости традиционных энергоресурсов обусловил повышенный интерес к использованию низкокалорийных твердых энергоносителей, в частности, горючих сланцев [1–3].

Горючие сланцы (ГС) — твердая осадочная горная порода, образованная в результате накопления в условиях кислородной изоляции органического вещества керогена. В ГС содержится керогена 5–40 %, редко до 60 %. Органическое вещество вкраплено в минеральную массу в виде коллоидных частиц шарообразной формы диаметром 20–140 мкм. ГС являются отличным, но достаточно трудным технологическим сырьем. Основная сложность использования ГС в том, что в своем большинстве энергоемкий компонент (теплота сгорания керогена 29–37 МДж/кг) имеет низкую концентрацию в породе.

ГС содержат 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 промышленного способа газодобычи — Фрекинг-процесса, основанного 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 сформирует месторождения, разработка которых доступна для традиционных технологий добычи нефти и газа. Первые результаты применения гидроразрыва пласта получили от некоторых аналитиков энергорынка достаточно жесткую оценку — как работа по принципу «снять сливки и отойти в сторону», так как эта технология позволяет извлечь 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 больших территориях. В результате могут произойти значительные (до десятков сантиметров) техногенные подвижки различных участков пласта. При этом растрескивание горного массива неуправляемо, а трещины разрыва достигают в длину 150 м. Растрескивание массива распространяется в вышележащие пласты (что может приводить к сбросам вод из вышележащих горизонтов), а также в нижележащие пласты (что приводит к загрязнению подземных вод закачиваемой жидкостью). Для выполнения од-

ной операции «гидроразрыва пласта» в пласт закачивается более 4000 т воды [4], а возвращается на поверхность только часть ее: до 30–50 % воды (а точнее химического раствора) остается под землей. Неизбежно происходит загрязнение водных пластов сланцевым газом (с сероводородом, радоном, радионуклидами, тяжелыми металлами и их солями [5, 6]) и работами растворами для гидроразрыва пласта [4].

Гидроразрыв пласта — весьма затратная технология. Горизонтальная скважина стоит 2,6–4 млн долл. [4]. Текущие расходы для одной операции гидроразрыва пласта составляют более 250 тыс. долл. [6]. С целью поддержания расчетного дебета скважины в течение года на каждой скважине (опыт США) проводится в среднем 3–4 технологические операции [4].

Несмотря на достаточно положительные результаты использования технологии Фрекинг-процесса, например, безводного способа GASFRAC (Канада) [2], анализ полученных данных требует осторожного прогнозного оценивания перспектив предложенного способа, учитывая вопросы экологической безопасности.

Эффективное и полное извлечение компонентов-энергоносителей из 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). Значительное содержание водорода обеспечивает высокую калорийность получаемой смеси. Процесс характеризуется высоким выходом горючей массы сланца (до 90 % (мас.)).

После очистки ПГС происходит ее разделение вследствие конденсации на сланцевый газ и сланцевую смолу (сланцевую нефть). Сланцевый газ состоит из смеси метана, водорода, оксида углерода и газов-примесей (в основном углекислый газ и соединения серы). Сланцевая смола состоит из смеси углеводородов: парафины  $C_{12}$ – $C_{32}$ , арены, алкилбензолы, нафталин и его производные, пристан, фитан и др. Преобладают фракции  $C_{14}$ – $C_{16}$ , свойственные дизельному топливу.

Накоплен 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), Тоско II (США), Фушунь (Китай), Paraho Process (США), Lurgi-Ruhrgas (Германия), Chevron STB (США) и др. Энергетическая эффективность технологий обеспечи-

**Таблица 1. Оценки EROEI для различных энергоресурсов (условия США) [11]**

Ресурс	Расчетные данные Чарльза Холла		Данные EROEI Ричарда Хайнберга, 2009 г.
	год	EROEI	
Нефть и газ	1930	> 100	–
Нефть и газ	1970	30	–
Нефть и газ	2005	11–18	–
Общемировая добыча нефти	1999	35	19
Природный газ	2005	10	10
Уголь	1930	> 100	50
Уголь	1970	30	50
Битуминозные пески	–	2–4	5,2–5,8
Сланцевая нефть	–	5	1,5–4
Ядерная энергия	–	15	1,1–15
Гидроэнергия	–	> 100	11–267
Ветровая энергия	2007	18	18
Фотовольтаика	2004	6–8	3,75–10
Этанол из сахарного тростника	1986	0,8–1,7	8–10 (Бразилия)
Кукурузный этанол	2006	0,8–1,6	1,1–1,8
Биодизель	2008	1–3	1,9–9

вается 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 1950–1990-х гг. в Энергетическом институте им. Кржижановского (ЭНИИ), 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 утилизации больших объемов пустой породы при переработке исходного сырья, сосредоточенной в одном месте.

Имеются также экономические ограничения, связанные с ростом глубины залегания рабочих пластов и транспортных издержек доставки сырья к месту переработки. Это будет ограничивать перспективы интенсивного развития технологии внепластовой переработки ГС.

Все больше аргументов в доказательство высокой энергоэффективности и приемлемой экологичности приводится в пользу внутрипластового ретортинга (Shell ICP, Chevron ICP, Exxon Mobil Electrofrac, AMSO EGL Technology) [2]. Внутрипластовый ретортинг исходно уступает по показателям степени извлечения из горючего сланца компонентов-энергоносителей. Однако отсутствие ряда высокочрезвычайно затратных подготовительных и утилизационных операций формирует высокий потенциал перспектив его развития при оценивании и по энергетической, и по экономической эффективности.

Недостатком приведенных способов внутрипластового ретортинга ГС является значительный интервал между началом обустройства месторождения до «первой нефти»: от двух до четырех лет [2]. Кроме этого, упомянутые способы вследствие своей достаточно высокой стартовой капиталоемкости ориентированы на мощные пласты ГС.

Предлагаемый к оцениванию энергетической эффективности внутрипластовой ретортинг способом резистивно-дугового нагрева пласта сланца термозонированными участками (TZ-RA) [9] лишен указанных недостатков. Временной интервал от начала обустройства месторождения до получения товарного продукта составляет несколько суток. Способ обеспечит значительно более простую аппаратную адаптацию технологии по глубине залегания и мощности пласта ГС, в силу чего может претендовать на значительную степень универсальности.

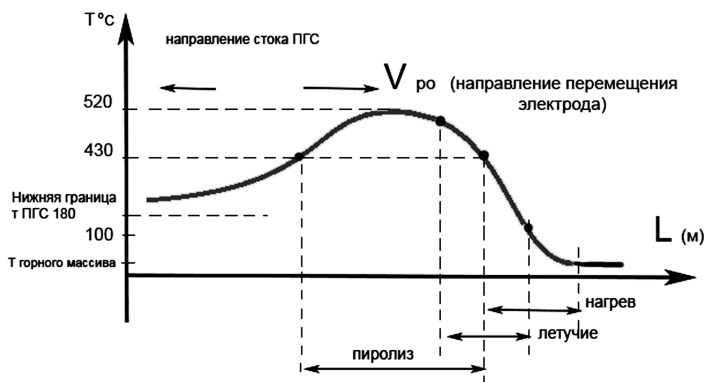
Оценка энергетической эффективности (энергетической рентабельности) выполняется по показателю EROEI (energy returned on energy invested), определяемому как соотношение полученной и затраченной энергии. Различие используемых методик расчета EROEI создает определенные сложности в сравнении перспективности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

В [2] приведены оценки EROEI для разных технологий получения энергоресурсов:

- поверхностный ретортинг сланцев Galoter Process (Россия, Эстония) — 9,5 : 1;
- поверхностный ретортинг сланцев Enefit (Россия, Эстония) — 13 : 1;

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

Параметр (parameter)	Symbol	Definition	Technologies							
			ICP	Galoter	Kiviter	Petrosix	ATP	Tosko II	Lurgi-Ruhrigas	
Доля ресурса, подвергнутого переработке, – об-работанная доля ресурса (Processed share of Re-sources)	R	R = Processed shale / Resources of oil shale	1	0,75	0,3	0,65	0,75	0,75	0,75	0,75
Отношение суммы извлеченной и утилизированной энергии к энергии переработанного сланца (Energy extracted and used)	E	$E = (\text{extracted} + \text{recovered energy}) / \text{HHV of oil shale processed}$	0,5	0,91	0,7	0,7	0,85	0,81	0,87	0,87
Отношение суммы использованной на добычу и переработку к сумме извлеченной и утилизированной энергии (Spent Energy used for mining & processing)	S	$S = \text{energy spent used for mining \& processing} / (\text{extracted} + \text{recovered energy}); (S = 1 / \text{EROEI})$	0,5	0,125	0,33	0,33	0,13	0,12	0,15	0,15
Выход энергии (Energy Output)	O	$O = \text{energy spent used for mining \& processing} / \text{Sum (extracted, recovered energy); } S = R \cdot E \cdot (1 - S)$	0,25	0,6	0,14	0,30	0,55	0,60	0,55	0,55
Прибыль от единицы продукции (баррель нефтяного эквивалента (б.н.э.), 1,576 Гкал) (Unit Profit)	U	$U = (\text{Unit Price} - \text{Unit Full Cost}) / \text{Oil Price (where Unit = B.O.E. of Energy Output)}$	0,67	0,56	0,33	0,44	0,50	0,44	0,50	0,50
Коэффициент использования ресурсов (Rate of Resources Use)	R <sub>1</sub>	$R_1 = O \times U$	0,17	0,33	0,05	0,14	0,28	0,27	0,28	0,28
Дополнительные поступления в пересчете на единицу продукции (Commoditi by-products)	C	$C = \text{Specific Receipts from Commodity By-Products per one B.O.E.} / \text{Oil Price}$	–	0,14	0,06	0,06	0,10	0,10	0,14	0,14
Расходы на природоохранные мероприятия в пересчете на единицу продукции (Environmental Charges)	E <sub>1</sub>	$E = \text{Specific Environmental Costs} / \text{Oil Price}$	0,10	0,05	0,05	0,05	0,50	0,05	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 (R <sub>1</sub> + C – E <sub>1</sub> ))	–	–	0,07	0,43	0,05	0,14	0,33	0,32	0,37	0,37



Распределение температуры внутри пласта в районе рабочей области.

- 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.

Оценки EROEI, приведенные в [10], несколько отличаются 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 [10]:

- 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.

Сложнее с сопоставлением оценок поверхностной переработки сланцев с оценками добычи сланцевой нефти без уточнения методики расчета EROEI, что подтверждают данные табл.1. Приведенные в работе [11] рассуждения по инструментарию EROEI конкретизируют выводы, подкрепленные примером проекта разработки. В настоящее время используют две методики расчета EROEI: на основе учета прямых энергетических и материальных затрат; на основе экономико-энергетического пересчета.

Для сравнения эффективности добычи энергоресурсов предпочтительнее первая методика, так как расчет EROEI по второй методике уступает ей в точности [11]. По первой методике расчета EROEI учитываются капитальные, операционные, природоохранные, ликвидационные энергозатраты. Расход ГСМ и электроэнергии учитывается прямо, а энергозатраты, связанные с расходными материалами (сталь, цемент), рассчитываются из удельной энергоемко-

сти 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 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 зачастую целью

оценивания, так как, 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 оценивания, полноты и достоверности исходных данных, для оценивания термозонированного резистивно-дугового способа внутрислоевого ретортинга (TZ-RA) использовали 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 табл.2, в столбце ICP, приведена усредненная оценка технологий внутрислоевой переработки ГС. Значительное отличие от технологий внепластового (наземного) ретортинга отмечается по оценкам  $E = 0,5$  и  $S = 0,5$ ; оба показателя наихудшие. Эти значения предопределены объективными отличиями условий организации процессов, так как преимуществами внепластового (наземного) ретортинга являются:

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

– аппаратная организация процессов позволяет оптимизировать процесс пиролиза за счет обеспечения заданных физико-химических условий одновременно для всего объема перерабатываемого сырья;

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

Особенностью способа TZ-RA [9] является возможность создания внутри пласта ограниченной термозонированной области (рисунок), параметры которой расчетным путем оптимизируются по мощности и глубине залегания рабочего слоя, теплофизическим свойствам ГС и окружающего горного массива, концентрации и составу керогена. Возможность управления скоростью перемещения рабочей области позволяет регулировать внутри нее градиент температур, а значит, и скорость распространения реакции. Следовательно, кроме регулирования производительности, появилась возможность управлять и составом получаемых продуктов реакции. Теоретическое обоснование [12] этих возможностей общее для внепластового (наземного) и внутрипластового ретортинга.

Возможность управления скоростью распространения реакции внутри массива ГС позволяет повысить степень извлечения компонентов-энергоносителей до  $E^* = 0,65-0,70$ . Росту показателя  $E^*$  способствует 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, что характерно для внепластового ретортинга.

Реализация способа позволяет избежать значительных капитальных и операционных затрат на создание сложной и дорогостоящей системы внутрипластовой теплогенерации, обеспечивающей многолетний нагрев массива ГС (в том числе уже отработанных объемов пласта ископаемого), что характерно для внутрипластового ретортинга по технологиям ИСР. 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 табл.2) составит, например, для  $S^* = 0,20$ :  $O^* = R \times E^* (1 - S^*) = 1 \times 0,7 (1 - 0,2) = 0,56$ . Это сопоставимо с лучшими показателями наземного ретортинга. При

этом эффективность энергозатрат EROEI, равная  $1/S^*$ , имеет значения от 4,35 до 5,27.

С учетом значения  $U$  из табл.2 коэффициент 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, чем у 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 глубокозалегających пластов, что обеспечивает быстрое получение товарной продукции после начала процесса. Эффективность способа может быть увеличена в результате модификации процесса введением перегретого пара и развитием глубины комплексной переработки. Например, безреагентное выщелачивание позволяет обеспечить практически экологически чистое производство [13]. Предварительное извлечение органических веществ из ГС повышает концентрацию содержащихся в сланце урана, скандия, галлия и других рассеянных и редких элементов на 30–80 %, превышая уровень, обеспечивающий экономическую обоснованность промышленной разработки.

### Выводы

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.

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

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

Оценка эффективности предложенного авторами способа резистивно-дугового нагрева пласта сланца термозонированными участками [9], выполненная в соответствии с методикой табл.2, составила  $RF = 0,33$ , показывая потенциальную его эффективность. Эффективность способа обеспечивается сокращением стартовых капитальных вложений, сокращением сроков начала получения товарной продукции, пригод-

ністю для використання на маломощних і глибокозалегаючих пластах.

Предложенийний спосіб [9] оснований на принципах, дозволяючих уникнути значительних капітальних витрат, а також ризику негативних екологічних наслідків, можливих для технологій, реалізуючих Фрекінг-процес («гідроразрива пласта»).

### Список літератури

- Осинов А.М., Шендрик Т.Г., Гришук С.В., Бойко З.В. Проблеми та перспективи використання горючих сланців в Україні // Матеріали VIII Всерос. конф. з міжнарод. участю «Горіння твердого палива» (Новосибірськ, 13–16 нояб. 2012 г.). – Новосибірськ : Ін-т теплофізики СО РАН, 2012.
- Грушевенко Д., Грушевенко Е. Нефть сланцевих плев – новий виклик енергетичному ринку? // Інформ.-аналит. обзор. – М. : Центр вивчення світових енергетичних ринків ІНЭІ РАН, 2012. – Ноябрь. – 49 с.
- Гаврилов А.Ф. Енергетика на базі нових технологій використання низкосортних палив // Роботи ОАО «Енергетичний інститут ім. Кржижановського» (ЭНИИ), Москва. – Режим доступу: – <http://www.mtu-net.ru/lge/>
- Коржубаев А.Г. Сланцевий газ : Пора закривати «Газпром»? // Наука в Сибірі. – 2010. – 1 апр. (№ 13).
- Новиков О.Н. Сланцева нафта, газ або все разом? – Тюмень : Західно-Сибірський філіал ОО «Екологічна група». – Режим доступу: – <http://www.ecolog-alfa.tumn.ru/page7.html>
- Крючков В. Приглашение на сланец // Итоги. – 2013. – 13 мая (№ 19/883).
- Зюба О.Г., Глущенко О.Н. Обзор современных термических методов переработки горючих сланцев и экологические аспекты их применения // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7, № 4.
- Салихов Р. Концептуальный проект сланцевперерабатывающего комплекса «САНГРУНТАУ» на базе установок УТТ-3000 // XVII Междунар. конф. «Нефть и газ Узбекистана» (Ташкент, 15–16 мая 2013 г.). – Режим доступу: – <http://www.oguzbekistan.com/2013/presentations/documents/D2TS3-RuslanSalikhov-RosatmandAtom-energoproekt D2TS3.pdf>
- Пат. 87689 Укр., МПК Е 21 В 43/00, Е 21 В 43/24, Е 21 В 43/30. Спосіб підземної газифікації вуглеводеньмісного пласта / Є.В.Баженов, В.І.Студеняк, Е.А.Троценко, Л.Я.Шварцман. – Опубл. 10.02.14, Бюл. № 3.
- Климов В. Сколько будет стоить добытый в Украине сланцевый газ // Биржевой лидер. – 2013. – 6 нояб.
- Сафронов А.Ф., Голоскоков А.Н. EROEI как показатель эффективности добычи и производства энергоресурсов // Бурение и нефть. – 2010. – № 12.
- Баршевский М.М., Безмозгин Э.С., Шапиро Р.Н. Справочник по переработке горючих сланцев. – Л. : Гостоптехиздат, 1963. – 239 с.
- Новиков О.Н. Комплексная переработка горючих сланцев при добыче сланцевого газа. – Тюмень : Західно-Сибірський філіал ОО «Екологічна група». – Режим доступу: – <http://www.ecolog-alfa-nafta.angr.ru/page36.html>

Поступила в редакцию 04.09.14

**Шварцман Л.Я., канд. техн. наук, Троценко Е.А.,  
Баженов Є.В., канд. техн. наук**

**ТОВ «ІНФОКОМ ЛТД», Запоріжжя**

*бул. Т. Шевченка, 56, 69001 Запоріжжя, Україна, e-mail: dr@ia.ua*

## Внутрішньопластовий ретортинг горючих сланців. Оцінка енергетичної ефективності

У зв'язку з розширенням спектру джерел енергії з'явилася необхідність порівняння ефективності отримання традиційних та нетрадиційних енергоресурсів. Як кількісна оцінка перспективності розробки енергоресурсу у практику було введено критерій порівняння – енергетична рентабельність (EROEI). Виконано оцінку енергетичної рентабельності внутрішньопластового ретортингу горючих сланців стосовно до запропонованого авторами способу термозонного резистивно-дугового нагріву пласта копаліни. Використання теплопературної залежності електропровідних властивостей горючого сланцю разом з технологією горизонтального буріння й накопиченням досвідом автоматизованого управління електротермічними процесами дає змогу реалізувати альтернативну схему отримання вуглеводнів. Запропонований спосіб має ряд переваг у порівнянні з широкозастосованими способами видобутку сланцевого газу й сланцевої нафти такими, як Фрекінг-процес та позапластовий ретортинг, забезпечуючи екологічну безпеку технології та суттєве скорочення капітальних витрат на освоєння енергоресурсу. *Бібл. 13, рис. 1, табл. 2.*

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

**Shvarzman L.Ya., Candidate of Technical Science, Trotsenko E.A.,  
Bazhenov Ye.V., Candidate of Technical Science**  
**INFOCOM LTD, Zaporozhye, Ukraine**

56, Shevchenko Ave., 69001 Zaporozhye, Ukraine, e-mail: dr@ia.ua

## In Situ Retorting of Oil Shale. Estimation of Energy Efficiency

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. Using the temperature dependence of the electrical properties of the oil shale, combined with horizontal drilling technology and experience of automated control of electrothermal processes allows to have an alternative scheme for producing hydrocarbons. The suggested method has several advantages compared to the commonly used methods of shale gas and shale oil production, such as Fracing process and ex-situ retorting – providing an «ecological loyalty» and significantly reduction of the investments for the energy resources development. *Bibl. 13, Fig. 1, Table 2.*

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

### References

- Osipov A.M., Shendrik T.G., Grishhuk S.V., Bojko Z.V. Problemy i perspektivy ispol'zovaniya gorjuchih slancev v Ukraine. *Materialy VIII Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Gorenie tverdogo topliva»* (Novosibirsk, 13–16 nojabrja 2012), Novosibirsk : Institut teplofiziki im. S.S.Kutateladze SO RAN, 2012.
- Grushevenko D., Grushevenko E. Neft' slancevyh plev – novyj vyzov jenergeticheskomu rynku? *Informacionno-analiticheskij obzor. Centr izuchenija mirovyh jenergeticheskikh rynkov INJeI RAN*, Nojabr' 2012, 49 p.
- Gavrilov A.F. Jenergetika na baze novyh tehnologij ispol'zovaniya nizkosortnyh topliv. *Raboty OAO «Jenergeticheskij institut im. Krzhizhanovskogo» (JeNIN)*, Moscow. – Rezhim dostupa: – <http://www.mtu-net.ru/lge/>.
- Korzhubaev A.G. Slancevyj gaz : Pora zakryvat' «Gazprom»? *Nauka v Sibiri*, 2010, 1 Apr. (№ 13). Rezhim dostupa: – <http://www.sbras.ru/HBC/article.phtml?nid=540&id=12>.
- Novikov O.N. Slancevaja neft', gaz ili vse vmeste? *Zapadno-Sibirskij filial OOO «Jekologicheskaja grupa»*, Tjumen'. – Rezhim dostupa: – <http://www.ecolog-alfa.tumn.ru/page7.html>.
- Krjuchkov V. Priglasenie na slanec. *Itogi*, 2013, 13 May (№ 19/883). – Rezhim dostupa: – <http://www.itogi.ru/obsch/2013/19/189715.html>
- Zjuba O.G., Glushhenko O.N. Obzor sovremennyh termicheskikh metodov pererabotki gorjuchih slancev i jekologicheskie aspekty ih primenenija. *Neftegazovaja geologija. Teorija i praktika*, 2012, 7 (4).
- Salihov R. Konceptual'nyj proekt slancepererabatyvajushhego kompleksa «SANGRUNTAU» na baze ustanovok UTT-3000. *XVII Mezhdunarodnaja konferencija «Neft' i gaz Uzbekistana»*, Tashkent, 15–16 may 2013. – Rezhim dostupa: – <http://www.oguzbekistan.com/2013/presentations/documents/D2TS3-RuslanSalikhov-RosatomandAtomenergoproektD2TS3.pdf>
- Pat. 87689 Ukraine, MPK E 21 B 43/00, E 21 B 43/24, E 21 B 43/30. Sposob podzemnoj gazifikacii uglevodorodsoderzhashhego plasta. E.V.Bazhenov, V.I.Studenjak, Ye.A.Trocenko, L.Ya.Shvarzman. – Publ. 10.02.14, Bul. № 3. – Rezhim dostupa: – <http://uapatents.com/12-87689-sposib-pidzemno-gazifikaci-vuglevodenvmisnogoplasta.html>
- Klimov V. Skol'ko budet stoit' dobytyj v Ukraine slancevyj gaz. *Birzhevoj lider*, 06.11.2013. – Rezhim dostupa: – <http://www.profi-forex.org/novosti-mira/novosti-sng/ukraine/entry1008185838.html>.
- Safronov A.F., Goloskokov A.N. EROEI kak pokazatel' jeffektivnosti dobychi i proizvodstva jenergoresurov. *Burenje i Neft'*, 2010, (12). – Rezhim dostupa: – <http://burneft.ru/archive/issues/2010-12/13>
- Barshhevskij M.M., Bezmozgin Je.S., Shapiro R.N. Spravochnik po pererabotke gorjuchih slancev. Leningrad : Gostoptechizdat, 1963, 239 p.
- Novikov O.N. Kompleksnaja pererabotka gorjuchih slancev pri dobyche slancevogo gaza. *Zapadno-Sibirskij filial OOO «Jekologicheskaja grupa»*, Tjumen'. – Rezhim dostupa: – <http://www.ecolog-alfa-nafta.angr.ru/page36.html>

Received September 4, 2014