

О методе расчета EROEI с учетом коэффициента полезного использования энергии

© 2014 Темукуев Тимур Борисович

кандидат экономических наук

Кабардино-Балкарская государственная сельскохозяйственная академия
им. В.М. Кокова

360030, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 1в

Email: energoconsul@mail.ru

Рассматривается метод расчета EROEI (Energy Returned On Energy Invested) с учетом коэффициента полезного использования энергии. Для точного определения соотношения полученной и инвестированной энергии при добыче топлива на промысле или шахте для используемых там материалов, тепловой и электрической энергии необходимо учитывать энергетические потери на всех этапах технологической цепи.

Ключевые слова: EROEI, коэффициент полезного использования энергии, коэффициент воспроизводства энергии, топливо, теплота сгорания.

Проблемой энергетического анализа экономической деятельности в разное время интересовались многие известные ученые, но какой-либо стройной теории никто не предложил. В 70-е гг. прошлого века американский биолог Чарльз Холл (Charles Hall), занимавшийся изучением миграции лосося, ввел в научный оборот понятие "EROEI", утверждая, что хищник не может тратить больше энергии, чем получает ее на охоте. Затем Холл перенес эту идею на добычу нефти и с группой ученых стал работать над проблемой¹.

В настоящее время рассматриваемое понятие имеет два варианта написания и два значения: если EROEI (англ. - Energy Returned On Energy Invested), то это соотношение полученной и инвестированной энергии; если же EROI (англ. - Energy Return On Investment), то это соотношение полученной энергии и инвестиций. Принятые соотношения можно записать в виде следующих формул:

$$Er = \frac{E}{E_3} \quad (1)$$

и

$$Ei = \frac{E}{C}, \text{ МДж/руб.} \quad (2)$$

где Er - EROEI;

E_2 - энергия, полученная с топливом или от устройства, преобразующего энергию Солнца, Земли и т.п., Дж;

E_1 - энергия, затраченная на добычу (производство) энергии E_2 , Дж;

Ei - EREI;

C - средства, затраченные на добычу (производство) энергии E_2 , руб.

Любой хищник, как и все живые организмы (не составляет исключения и лосось), не в состоянии тратить больше той энергии, которую он получает с пищей, т.е. здесь все происходит в соответствии со вторым законом термодинамики. Таким образом, любой живой организм можно рассматривать как обычный тепловой двигатель, работающий с коэффициентом полезного действия (КПД) меньше 1, поскольку всю энергию из пищи ни один организм извлечь не может.

В общем случае КПД для лосося за фиксированный промежуток времени определится по формуле

$$\eta = \frac{E_{1(\tau)}}{E_{2(\tau)}}, \quad (3)$$

где $E_{1(\tau)}$ - энергия, затраченная лососем за время τ ;

$E_{2(\tau)}$ - энергия, полученная лососем с пищей за время τ .

Лосось, потребляя пищу, может перемещаться, расти и давать потомство, но не в состоянии производить энергию. Поэтому понятие EROEI, распространяя с лосося на добычу топлива, нужно рассматривать в ином ключе. Если энергия, затрачиваемая лососем, всегда меньше энергии, полученной им с пищей, то, когда речь идет о добыче топлива, энергия, полученная с топливом, всегда больше энергии, затраченной на ее добычу. Когда полная энергия, затраченная на добычу топлива, сравнивается с энергией, содержащейся в добытом топливе, добыча топлива на данном месторождении с энергетической точки

зрения становится бессмысленной. По сути EROEI в такой интерпретации есть не что иное, как коэффициент воспроизводства энергии (КВЭ). Так, при использовании ископаемого топлива КВЭ можно определить по формуле

$$\pi = \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (4)$$

где Q_2 - количество всей энергии, добытой на месторождении, Дж;

Q_1 - количество затраченной энергии за время проведения всех работ на месторождении, Дж.

Следует отметить, что π больше 1, поскольку Q_2 и Q_1 не связаны между собой вторым законом термодинамики, ибо топливо, добываемое на месторождении, является источником энергии, т.е. энергоносителем. Если же π будет меньше или равно 1, то данный технологический процесс с энергетической точки зрения становится бессмысленным, независимо от того, относится он к гелиоустановке или к месторождению ископаемого топлива.

В России проблемой вычисления EROEI занимаются исследователи под руководством А.Ф. Сафронова. Они, в частности, приводят данные по расчету EROEI для ряда энергоресурсов, в основном применительно к американским условиям, полученные Холлом и уточненные Ричардом Хейнбергом на 2009 г. Так, численное значение EROEI для общемировой добычи нефти составляет 19, природного газа - 10, угля - 50, битуминозных песков - 5,2-5,8, сланцевой нефти - 1,5-1,4, ядерной энергии - 1,1-1,5, гидроэнергии - 11-267, ветровой энергии - 18, фотовольтаики - 3,75-10, этанола сахарного тростника - 0,8-1,7 (в Бразилии - 8-10), кукурузного этанола - 1,1-1,8, биодизеля - 1,9-9².

По мере добычи ископаемых топлив величина их EROEI уменьшается в силу разных причин, поскольку вначале, как правило, разрабатываются богатые и легкодоступные залежи. Эта тенденция наблюдается и в России, для которой на основании данных по прямым совместным энергозатратам при добыче нефти и газа определено численное значение EROEI для трех лет: 31,7 в 2005 г., 29,9 в 2007 г. и 29,5 в 2008 г.³

Для частных случаев EROEI (т.е. численное значение E_r) во многом будет зависеть от того, насколько точно определили E_1 , поскольку при разработке одних месторождений используется энергия, полученная на других месторождениях. При неточном определении величины затрат энергии будет создаваться иллюзия энергетической рентабельности месторождения.

Например, затраты энергии, связанные с работами на объектах при добыче нефти и газа, условно делят на группы: капитальные, текущие, ликвидационные⁴. Соответственно этапы работ - это обустройство, эксплуатация и ликвидация объектов на месторождении.

Рассмотрим описанную в работе⁵ методику расчета EROEI добычи газа на основе фактических данных на примере Вилуойского газоконденсатного месторождения. Выделив в общем случае несколько производственно-технологических этапов добычи и переработки энергоресурсов в готовый продукт (извлечение и первичная переработка ресурса на промысле, транспортировка, вторичная переработка, складирование готовой продукции), за основу методики расчета EROEI нулевого километра исследователи взяли принцип разделения всех энергозатрат на капитальные, операционные и ликвидационные:

$$ER_{нк} = \frac{E_2}{E_{11} + E_{12} + E_{13}}, \quad (5)$$

где E_2 - энергия добытого на месторождении топлива;

E_{11} - энергия, затраченная на капитальные работы, т.е. на строительство промышленной базы, бурение скважин, создание внутрипромысловой инфраструктуры;

E_{12} - энергия, затраченная на операционные работы, связанные непосредственно с добычей и первичной подготовкой энергоресурса;

E_{13} - энергия, затраченная на ликвидационные работы, связанные с демонтажем всех зданий и сооружений, рекультивацией земель после завершения разработки месторождения.

Все энергозатраты являются суммой прямых (E_{li}^n), выражаемых в энергетических величинах, и вспомогательных (E_{li}^e) энергозатрат, связанных с затратой энергии на производство материалов, которые необходимы для организации этапа добычи. При таком делении энергозатрат формула (5) приобретает вид

$$Er_{нк} = \frac{E_2}{E_{11}^n + E_{11}^e + E_{12}^n + E_{12}^e + E_{13}^n + E_{13}^e}. \quad (6)$$

Теоретически учет прямых энергозатрат не представляет особой сложности, так как он ведется на всех промыслах.

Поскольку учет вспомогательных энергозатрат является сложной задачей, исследователи ограничились вычислением энергозатрат на основные конструкционные материалы, используемые на промысле (металлы, цемент и битум). На базе исследований английских ученых были приня-

ты удельные энергозатраты, МДж/кг, производства некоторых конструкционных материалов (среднее - минимум - максимум): сталь 31,25 - 6 - 95,70; цемент 5,08 - 0,1 - 11,73; стекло 20,08 - 2,56 - 62,10; алюминий 157,1 - 8 - 382,7; медь 69,02 - 2,4 - 152,71; титан 470,67 - 257,84 - 744,70; битум 47 - 2,40 - 50,00.

На операционные энергозатраты пришлось 75 %, а остальные 25 % составили капитальные затраты. Значение EROEI нулевого километра, рассчитанное за период промышленной разработки добычи, составило 121, что на порядок выше, чем значение, полученное американскими исследователями⁶.

Значение EROEI, вычисленной по формуле (6), зависит не только от глубины учета прямых и вспомогательных энергозатрат, но и от точности и полноты вычисления потерь, связанных с выработкой и транспортировкой энергии. Чтобы получить полное представление о затратах, рассмотрим этап превращения энергии, содержащейся в топливе, в электрическую энергию, используемую на данном промысле.

Пусть в некоем месторождении планируется добыть B кг топлива, тогда общее количество первичной теплоты (энергии) определится из выражения:

$$\sum Q_o = B \cdot Q_n^o, \quad (7)$$

где Q_n^o - все количество первичной энергии, которое содержится в 1 кг природного топлива, т.е. топлива, находящегося в недрах земли, Дж/кг.

Разность между теплотой сгорания природного состава топлива Q_n^o и высшей теплотой сгорания рабочего состава топлива Q_6^p есть та энергия, содержащаяся в составе добываемого из-под земли топлива, которая не используется. В первую очередь это неиспользуемый попутный газ в нефти и горючий конденсат в газе, а также та часть твердого топлива, которая не отделена от породы и выброшена с ней в отвалы. Поскольку часть энергии, Дж/кг, не используется, она и составит потери при добыче:

$$\Delta Q_2 = Q_n^o - Q_6^p. \quad (8)$$

Если в недрах содержится только одна компонента без горючих примесей, которые теряются в этапе добычи топлива, то $Q_n^o = Q_6^p$.

За коэффициент полезного использования энергии (КПИЭ) принимается⁷ отношение полезно использованной первичной энергии на определенном этапе технологической цепи от добычи топлива до использования энергии Q_i (в пере-

счете на 1 кг) к рассматриваемому количеству первичной энергии природного топлива Q_n^o :

$$\mu_{oi} = \frac{Q_i}{Q_n^o}. \quad (9)$$

При подсчете КПИЭ необходимо учитывать не только эксплуатационные потери, но также потери на создание установки, ее монтаж, последующий демонтаж и т.п., т.е. все возможные потери первичной энергии. Фактически поэтапно вычисляется то, как обесценивается энергия, содержащаяся в топливе, находящемся в недрах земли, до того как она от промысла (шахты) дойдет в виде электричества или тепла до потребителя и будет им использована.

КПИЭ всей системы - от добычи топлива до использования энергии - определится по следующей формуле:

$$\mu_{oi} = \frac{Q_i}{Q_n^o}, \quad (10)$$

где Q_i - полезно использованная энергия, Дж/кг.

На любом этапе абсолютные потери первичной энергии, выраженные в долях или процентах, определяются по формуле

$$q_i = \frac{\Delta Q_i}{Q_n^o}, \quad (11)$$

где ΔQ_i - все возможные потери первичной энергии на рассматриваемом этапе, Дж/кг.

В общем случае для отдельно взятого этапа потери первичной энергии, Дж/кг, можно представить так:

$$\Delta Q_i = \Delta Q_i^k + \Delta Q_i^m + \Delta Q_i^{pk} + \Delta Q_i^{zap} + \Delta Q_i^{np}, \quad (12)$$

где ΔQ_i^k - потери первичной энергии на капитальные затраты (строительство объекта, монтаж и демонтаж оборудования), Дж/кг;

ΔQ_i^m - затраты первичной энергии на изготовление и утилизацию оборудования, Дж/кг;

ΔQ_i^{pk} - эксплуатационные затраты первичной энергии, Дж/кг;

ΔQ_i^{zap} - затраты первичной энергии, связанные с работой людей и выданной им зарплатой, Дж/кг;

ΔQ_i^{np} - прочие затраты первичной энергии, Дж/кг.

Достаточно просто определяются только эксплуатационные затраты, а наиболее сложно - затраты, связанные с работой людей, так как их труд тоже нужно эквивалентно перевести в энергию. Для этого потребуется разработка специальной методики.

Если всю технологическую систему от добычи топлива до использования энергии разбить на ряд этапов, то из них наиболее значимых будет семь: добыча; переработка и транспортирование топлива; получение электрической и тепловой энергии; передача тепловой и электрической энергии; распределение и потребление тепловой и электрической энергии. При необходимости любой из этих этапов можно разбить на составляющие.

Обозначим потери первичной энергии, Дж/кг, при: ΔQ_2 - добыче топлива; ΔQ_3 - транспортировании топлива; ΔQ_4 - переработке (предпродажной подготовке) и хранении топлива; ΔQ_5 - генерировании электрической и тепловой энергии; ΔQ_6 - передаче электрической и тепловой энергии; ΔQ_7 - распределении электрической и тепловой энергии; ΔQ_8 - использовании (потреблении) электрической и тепловой энергии.

Тогда абсолютное количество первичной энергии, Дж/кг, которым располагает топливо, соответственно на каждом этапе определится по формулам (13-15). Для топлива после:

- добычи

$$Q_2 = Q_n^o - \Delta Q_2 ; \quad (13)$$

- транспортирования

$$Q_3 = Q_2 - \Delta Q_3 ; \quad (14)$$

- переработки

$$Q_4 = Q_3 - \Delta Q_4 . \quad (15)$$

Топливо в действительности с располагаемой энергией Q_4 поступает к производителю электрической или тепловой энергии. Абсолютное количество первичной энергии, Дж/кг, с учетом предыдущих потерь определится по формулам (16-19):

- после выработки

$$Q_5 = Q_4 - \Delta Q_5 ; \quad (16)$$

- после транспортирования по магистральным линиям электропередач (трубопроводам)

$$Q_6 = Q_5 - \Delta Q_6 ; \quad (17)$$

- после транспортирования по распределительным линиям электропередач (трубопроводам)

$$Q_7 = Q_6 - \Delta Q_7 ; \quad (18)$$

- полезно использованная

$$Q_1 = Q_7 - \Delta Q_8 . \quad (19)$$

Таким образом, абсолютное количество полезно использованной первичной энергии, Дж/кг, определится по формуле

$$Q_1 = Q_n^o - (\Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4 + \Delta Q_5 + \Delta Q_6 + \Delta Q_7 + \Delta Q_8) . \quad (20)$$

Чтобы получить безразмерную величину, разделим правую и левую части уравнения (20) на Q_n^o . Тогда абсолютная доля потерь первичной энергии для i -го этапа определится из вы-

ражения $q_i = \frac{\Delta Q_i}{Q_n^o}$, где ΔQ_i - потери энергии на i -м этапе.

КПИЭ всей системы от добычи топлива до потребления тепловой и электрической энергии включительно определится по формуле

$$\mu_{01} = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8) . \quad (21)$$

При известных абсолютных потерях на всех стадиях (от добычи топлива до текущего этапа включительно) КПИЭ можно определить из уравнений (22-27).

Для топлива после:

- добычи

$$\mu_{02} = 1 - q_2 ; \quad (22)$$

- транспортирования

$$\mu_{03} = 1 - (q_2 + q_3) ; \quad (23)$$

- переработки

$$\mu_{04} = 1 - (q_2 + q_3 + q_4) . \quad (24)$$

Для электрической и тепловой энергии после:

- генерирования

$$\mu_{05} = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5) ; \quad (25)$$

- передачи по магистральным линиям и трубопроводам

$$\mu_{06} = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) ; \quad (26)$$

- распределения энергии в сетях

$$\mu_{07} = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7) . \quad (27)$$

Поскольку для разработки нового месторождения угля, нефти или газа необходимо использовать электрическую энергию, горюче-смазочные материалы, которые уже получены в результате использования топлива, добытого на другом месторождении, при определении EROEI на любой стадии необходимо рассматривать как минимум две системы.

Например, при разработке Вилюйского газоконденсатного месторождения электрическая энергия, горюче-смазочные материалы, металл, цемент были получены в результате использования энергии от каких-то других источников. КПИЭ обозначим для них в общем случае как

μ_{1i} , помня, что для каждого конкретного случая он будет иметь свою величину, отличную от других. Для электроэнергии одна величина, для труб другая, для цемента третья и т.д. Таким образом, учет КПИЭ увеличит потребление первичной энергии при подсчете EROEI.

С учетом сказанного в самом общем виде формулу (6) можно записать как

$$Er_{нк} = \frac{E_2}{\frac{E_{11}^n}{\mu_{1i}} + \frac{E_{11}^g}{\mu_{1i}} + \frac{E_{12}^n}{\mu_{1i}} + \frac{E_{12}^g}{\mu_{1i}} + \frac{E_{13}^n}{\mu_{1i}} + \frac{E_{13}^g}{\mu_{1i}}}$$

или

$$Er_{нк} = \frac{E_2}{\frac{E_{11}^n}{\mu_{11}} + \frac{E_{11}^g}{\mu_{11}} + \frac{E_{12}^n}{\mu_{12}} + \frac{E_{12}^g}{\mu_{12}} + \frac{E_{13}^n}{\mu_{13}} + \frac{E_{13}^g}{\mu_{13}}} \quad (28)$$

В формуле (28) учтены все затраты энергии до нулевого километра магистрального газопровода за исключением затрат энергии на собственные нужды из добытого газа, если таковые имеются. Эти потери энергии следует определять по формуле (8) с добавлением потерь энергии из добываемого газа на собственные нужды, которое было использовано на промысле до нулевого километра магистрального газопровода включительно. С учетом потерь энергии добытого газа, т.е. КПИЭ на газоконденсатном месторождении, которое обозначим в общем случае как μ_{22} , на первом километре магистрального газопровода $Er_i = \mu_{22} \cdot Er_{нк}$.

EROEI будет уменьшаться по мере удаления от скважины и определится по формуле

$$Er_i = \mu_{2i} \cdot Er_{нк} \quad (29)$$

В той точке технологического цикла от добычи до использования тепловой и электрической энергии, где Er_i станет равно 1, заканчивается энергетическая ценность данного энергоносителя. При экспорте энергоносителей Er_i можно определять до границ государства.

Для покупателя энергоносителей EROEI никакого значения не имеет, поскольку цену на них устанавливает рынок, где тон задает дешевое топливо. А вот прибыль продавца будет определяться величиной EROEI: чем выше затраты, тем меньше прибыль.

Поскольку как μ_{1i} , так и μ_{2i} всегда меньше 1, то значение Er_i , вычисленное с учетом КПИЭ, будет существенно ниже, чем то, которое получено по формуле (1). С учетом КПИЭ формула (1) примет следующий вид:

$$Er = \frac{E_2}{E_1} \quad \text{или} \quad Er = \frac{\mu_{1i} \cdot E_2}{E_1} \quad (30)$$

При расчете EROEI для гидроэлектростанций, гелиоустановок, установок, использующих геотермальную энергию, необходимо учитывать фактор времени, т.е. брать соотношение энергии, полученной или предполагаемой получить за весь период эксплуатации установки или объекта, к энергии, затраченной за весь период – от начала работ до полной ликвидации установки или объектов. Как в первом, так и во втором случае необходимо учитывать КПИЭ.

В полной мере все затраты энергии учесть невозможно из-за отсутствия соответствующих данных. Нужно учитывать потребление энергии основными технологическими этапами.

Выводы

1. Для получения полного представления об энергетической ценности энергоресурсов при расчете EROEI необходимо использовать данные о полных затратах энергии, учитывая их обесценивание по мере перемещения по технологической цепочке, т.е. от месторождения топлива до потребителя, которое определяется КПИЭ.

2. Необходимо постепенно переходить на такие методы расчета, которые позволяли бы определить энергетическую рентабельность использования того или иного топлива или создания установок.

¹ Hall Ch. Why EROI matters // The Oil Drum. URL: <http://www.theoil Drum.com/node/3786>.

² Сафронов А.Ф., Голоскоков А.Н. EROEI как показатель эффективности добычи и производства энергоресурсов // Бурение и нефть. 2010. □ 12. С. 48-51. URL: <http://burneft.ru/archive/issues/2010-12/13>.

³ Там же.

⁴ Там же.

⁵ Сафронов А.Ф., Соколов А.Н., Черненко В.Б. Методика расчета EROEI на примере разработки Средневиллюйского газоконденсатного месторождения // Нефтегазовое дело. 2011. □ 6. С. 197-209. URL: <http://www.ogbus.ru>.

⁶ Там же.

⁷ Темукуев Т.Б. Метод определения коэффициента полезного использования энергии // Экономика и управление: тр. XXIV Российской школы. Т. 2. Наука и технологии. М., 2004. С. 425-432.

Поступила в редакцию 03.02.2014 г.