

Технические науки

УДК 553.04+553.9

Тимченко Николай Петрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

Tymchenko Nikolay

Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of the

National Academy of Sciences of Ukraine

Фиалко Наталия Михайловна

доктор технических наук, профессор, заведующая отделом,

член-корреспондент НАН Украины

Институт технической теплофизики НАН Украины

Fialko Nataliia

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department,

Corresponding Member of the NAS of Ukraine

Institute of Engineering Thermophysics of the

National Academy of Sciences of Ukraine

ОЦЕНКА УГРОЗЫ ИСТОЩЕНИЯ ЗАПАСОВ ТРАДИЦИОННЫХ

ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

THREAT ASSESSMENT OF THE DEPLETION OF TRADITIONAL

FUEL-ENERGY RESOURCES

Аннотация. Проведен анализ вопросов глобальной угрозы истощения основных видов традиционных ископаемых энергетических ресурсов. Приводятся данные относительно доказанных мировых запасов энергоресурсов и сроков их исчерпания. Рассматривается теория М.К. Хабберта об исчерпанности месторождений полезных ископаемых.

Анализируется применение теории для оценки запасов ископаемых энергетических ресурсов на территории разных странах.

***Ключевые слова:** ископаемые традиционные ресурсы, кривая Хабберта, доказанные мировые запасы, сроки исчерпания.*

***Summary.** The issues of the global threat seeing depletion of the main types of traditional fossil energy resources were analyzed. The data is given on the proven world reserves of these energy resources and the timing of their depletion. The theory of M.K. Hubbert on the depletion of mineral deposits is considered. The application of the theory to assess the reserves of fossil energy resources in different countries is analyzed.*

***Key words:** fossil traditional resources, Hubbert curve, proven world reserves, expiration dates.*

Одним из важных вопросов, связанных с проблемой угрозы истощения запасов традиционных топливно-энергетических ресурсов (ТТЭР), является наличие оценки их достаточной обеспеченности соответствующими материальными балансами. В дальнейшем анализе воспользуемся данными открытых информационных источников, в частности, статистических отчетов компании British Petroleum (BP), информационных изданий других организаций, например, организаций экспортеров нефти (ОПЕК), МЭА / ОЭСР, WEC, EIA, IRENA, WEO / МВФ. При расчетах сроков исчерпания месторождений различных видов ископаемого топлива используются данные годовых энергобалансов выработки / потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Для сравнения запасов различных видов топлива (твердых, жидких, газообразных) в энергобалансах вместо toe будут использованы тепловые единицы Эксоджоули (1 ЭДж = 10^{18} Дж) и Зетаджоули (1 ЗДж = 10^{21} Дж).

Очевидно, что с течением времени сначала отдельные месторождения, а затем региональные и мировые ресурсы практически

всех видов полезных ископаемых, в том числе горючих, в конце концов, исчерпываются. Жизненный цикл эксплуатации месторождений подчиняется закономерностям теории «пика нефти» (ТПН) Н.К. Хабберта [1]. На рис. 1 приводится, к примеру, динамика добычи нефти в США за период более чем столетия (1910-2019 гг.).



Рис. 1. Динамика добычи полезных ископаемых на примере добычи нефти в США: а) - данные фактической добычи нефти в США в 2010-2019 гг. (1) и их прогнозная логистическая симметричная модель (2) М.К. Хабберта (1956) [1; 2]; б) - схема прогнозирования по модели МИФИ (2017, 2018) динамики добычи невозобновляемых ТТЭР [4; 5]

Кривая 2 на рис. 1, а описывает простейшую модель ТПН. Она не учитывает разброс данных, асимметрию и волатильность распределения фактических данных в реальной картине добычи полезных ископаемых, влияние событий внутренней и внешней экономической политики и тому подобное. Согласно теории М.К. Хабберта [3], апробированной в свое время на фактических данных динамики добычи нефти в США (рис. 1), потребление ископаемых невозобновляемых энергоресурсов происходит по логистической кривой сначала с заметным положительным ускорением, достижением момента так называемого «нефтяного пика», а затем с

постепенным замедлением. Этот подход был обобщен М.К. Хаббертом для большого количества видов полезных ископаемых, в том числе для металлов, в частности, урана.

Теория М.К. Хабберта была обнародована в 1956 году и получила широкое признание после успешного предсказания ею пика нефтяной добычи в США (1970 г., 3,52 млрд. баррелей, погрешность 17,3%). С этим нефтяным пиком практически совпал первый нефтяной кризис (1972 г.). Неудачная попытка М.К. Хабберта во время второго нефтяного кризиса (в 1979г.) спрогнозировать мировой нефтяной пик на примерно на 2000 год продемонстрировала очевидные ограничения ТПН. С определенными оговорками ТПН можно успешно использовать для оценки состояния тщательно разведанных локальных месторождений и бассейнов в ряде географических областей, стран и в пределах постоянных технологических и социально-экономических приближений. Например, данная теория удовлетворительно согласуется с практикой добычи нефти в ФРГ (пик добычи-1996 г.), Египте (1998 г.), Индонезии (1991г.), Великобритании (1999 г.), Норвегии (2000 г.), Мексике (2003 г.).

Сейчас использование ТПН при оценке запасов энергосырья требует учета не только влияния технологического прогресса, а еще и действия экономических факторов (например, степени инвестиционной обоснованности), наличия новых моделей развития экономики и добавления более сложных математических подходов. Известны современные долгосрочные оценки мировой добычи нефти, природного газа, угля, рудного сырья, полученные на базе теории М.К. Хабберта, например, с привлечением методов логит-регрессии [6] или пробитового моделирования [7].

С целью повышения качества прогноза, в модели МИФИ традиционный подход М.К. Хабберта был доработан. В частности, в ней отсчет времени ведется не с начала освоения ресурса, а переносится на

текущее время, начиная с которого делается прогноз (рис. 1, b). Тогда данные из «истории» добычи соответствуют $t < 0$, текущего времени - $t = 0$, а прогнозируемого - периоду $t > 0$. Расчеты характеристик добычи проводятся, исходя из оценок общего количества данного ресурса, остающегося в недрах (M) и который описывается функцией $M = \int G(t) dt$, где, согласно с [4; 5]

$$G(t \geq 0) = G_M \exp[-k_0 (t - T_M)^2 / (2T_M)], \quad (1)$$

где $G(t \geq 0)$ - функция Гаусса; k_0 - значение темпа добычи топлива или сырья на начальной стадии прогнозируемого периода (при $t = 0$); G_M - максимум (пик) годовой добычи; T_M - период достижения пика добычи.

При получении (1) предполагалось, что, во-первых, скорость изменения добычи dG/dt пропорциональна уровню добычи $G(t)$ и, во-вторых, уменьшение темпа добычи с течением времени имеет линейный характер

$$k(t) = k_0 (1 - t/T_M). \quad (2)$$

При таких условиях авторам [4; 5] удалось установить аналитическую связь между параметрами M , G_M , T_M , G_0 (G_0 - уровень добычи ресурса на начальной стадии прогнозируемого периода при $t = 0$); а добыча ресурса отразить в виде трехпараметричной кривой Гаусса (1).

При практическом использовании модели МИФИ требуется знание трех выходных величин: фактического значения годовой добычи G_0 , которая является исходной для прогноза; величины ресурсов (запасов) ископаемого топлива M , оставшихся на момент начала прогнозируемого периода и одного из параметров - k_0 или G_M . Источниками этих величин у авторов [4; 5] были данные из World Nuclear Association (WNA) и British Petroleum.

Некоторые результаты оценки параметров относительно добычи ТТЭР на 2016 год по модели Хабберта-МИФИ приведены в табл. 1 и на рис. 1, б.

Таблица 1

Оценка параметров мировой добычи ТТЭР по моделям типа М.К. Хабберта, в т.ч. по модели МИФИ * [4; 5]

Параметр добычи	Уголь	Нефть	Газ	Уран **	Всего	
Ресурс М по данным [bp], 2019, ЗДж	21,93	10,62	7,16			
Ресурс М по данным [4; 5]	ЗДж	23,4	10,4	7,3	3,4	44,5
	%	52,6	23,4	16,4	7,64	100
Период исчерпания $T_{2016}=R/P$, лет	153	51	53	128	84	
Год исчерпания добычи	2170	2068	2070	2145	2101	
Период достижения пика T_m , лет	42	7	12	35	16	
Год пиковой добычи	2059	2024	2029	2052	2033	

* Принятые соотношения между единицами измерения:

1 т н.э. = 41868 МДж; 1 экв. баррель = 6,12·10⁹ Дж; средняя калорийность угля 20,5 МДж / кг; средняя калорийность природного газа 36-39 МДж / м³; эффективная калорийность природного урана 424 ГДж / кг.

** Ресурс урана определен с учетом складских запасов объемом 0,5 Мт; вместо годовой добычи использована годовая потребность действующих АЭС на природном уране.

Важным параметром, который следует из теории Хабберта, является индекс RPR (Reserves-to-Production ratio), или $R / P = T_0$, который представляет собой количественную оценку продолжительности добычи ресурсов, в том числе топливных. В этом индексе R определяет доказанные объемы запасов сырья отдельных месторождений, бассейнов, субрегионов, стран, регионов, мира; P - соответствующая годовая добыча.

В целом перспективы продолжительности использования месторождений ТТЭР определяются точностью оценок, во-первых, их геологических и промышленных запасов, во-вторых, интенсивностью их потребления (спросом) и себестоимости единицы продукции. Сложность оценок RPR можно проиллюстрировать на примере нефти. По данным ЕИА, в период с 1972 по 2004 гг. разными авторами и исследовательскими центрами было сделано не менее 36 прогнозов относительно года достижения нефтяного пика. Разброс результатов прогнозов (отбросив по

три крайних, то есть по 30 прогнозам) покрывал диапазон в 40 лет - с 2000 по 2040 годы. По утверждению IEA в 2006 году производство сырой нефти в мире достигло рекордного уровня в 70 млн. баррелей в сутки и в течение следующего прогнозного периода никогда не достигнет определенного пикового уровня [8, с. 48, 101, 119, 125]. Однако, прогнозы по данному пику не оправдались. Так, в 2019 году добывалось по 95,192 млн. баррелей / сутки [9].

В указанных прогнозах также не учитывались возможности производства нетрадиционных видов нефти, особенно учитывая «сланцевый бум» («Shale Gale») в США (рис. 1, а), в связи с которым нефтяной пик ожидается в 20-30 годы 21 в. Расчеты R / P - ratio весьма приблизительные не только из-за ошибок и погрешности результатов инженерно-геологических изысканий, но и из-за неопределенности физических характеристик топлив (теплоты сгорания, плотности, меняющегося состава примесей и др.). Вследствие вариативности оценок этих параметров, прогресса технологий, непрозрачности, даже спекулятивности данных о подтвержденных резервах нефти (и других ископаемых) период исчерпания нефтяных залежей у различных авторов колеблется в довольно широких пределах, но, тем не менее, отображается обозримыми сроками.

Литература

1. Hubbert M.K. Nuclear Energy and the Fossil Fuels, Presented before the Spring Meeting of the Southern District, American Petroleum Institute, Plaza Hotel, San Antonio, Texas, March 7-8-9, 1956. URL: <http://www.hubbertypeak.com/hubbertypeak/1956/1956.pdf>
2. Ritchie H. 2017, How long before we run out of fossil fuels? URL: <https://ourworldindata.org/how-long-before-we-run-out-of-fossil-fuels>
3. Brandt R. Testing Hubbert Energy Policy. Vol. 35, Issue 5, May 2007. PP. 3074-3088.

4. Ulyanin Yu.A., Kharitonov V.V., Yurshina D.Yu. Prospects for nuclear energy in the conditions of exhaustion of traditional energy resources // Nuclear Energy. 2017. №4. PP. 5-16. (Rus)
5. Ulyanin Yu. A., Kharitonov V. V., Yurshina D. Yu. Forecasting the dynamics of depletion of traditional energy resources // Problems of forecasting. 2018. №2. PP. 60-71. (Rus)
6. Höök M., Zittel W., Schindler J., Aleklett K. 2010. Global coal production outlooks based on a logistic model // Fuel. Vol 89. PP. 3546-3558.
7. Rutledge D. Estimating long-term world coal production with logit and probit transforms // International Journal of Coal Geology. 2011. Vol. 85. PP. 23-33.
8. World Energy Outlook 2010, IEA, 2010. PP. 48, 101, 119, 125. URL: <https://www.oecd.org/berlin/46389140.pdf>
9. World oil production from 1998 to 2019. URL: <https://www.statista.com/statistics/265203/global-oil-production-since-in-barrels-per-day/>