

ПЕРСПЕКТИВЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ИСЧЕРПАНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Ю.А. Ульянин, В.В. Харитонов, Д.Ю. Юршина

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)
115409, Россия, Москва, Каширское шоссе д. 31*



Впервые получена аналитическая взаимосвязь между производством энергии на АЭС мира и их обеспеченностью природным ураном в условиях исчерпания традиционных ресурсов до конца текущего века. Приводятся результаты прогнозирования динамики возможного роста дефицита традиционных энергетических ресурсов – углеводородов (уголь, нефть, природный газ) и природного урана с течением времени вследствие возрастающих потребностей в энергии (с темпом 1 – 2% в год), с одной стороны, и исчерпания невозобновляемых ресурсов, с другой стороны. Прогнозирование основано на современных геологических данных об извлекаемых запасах углеводородов и урана, а также на математической модели динамики добычи невозобновляемых ресурсов. Все варианты расчетов показывают, что в рамках действующей парадигмы обращения с добываемыми традиционными источниками энергии их запасы будут в значительной мере исчерпаны до конца текущего века, а пики их добычи ожидаются до середины века. Динамика установленной мощности АЭС современного дизайна будет повторять динамику исчерпания природного урана, а вклад АЭС в обеспечение человечества энергией будет снижаться, увеличивая суммарный дефицит традиционных источников энергии. Тем не менее, к 2100 г. вклад ядерной энергии (на тепловых нейтронах) в первичные источники может увеличиться до 10%, потому что углеводороды будут выбывать еще быстрее, чем уран. Но это количество ядерной энергии будет ничтожно мало по сравнению с потребностью в первичной энергии после 40-х годов даже при самом низком темпе роста потребности (1%/год). Рост «вилки» между растущими потребностями в энергии и сокращающимся предложением исчерпаемых традиционных энергоресурсов делает необходимым развитие ядерного бридинга – расширенного воспроизводства искусственного ядерного топлива (^{239}Pu из ^{238}U и, возможно, ^{233}U из ^{232}Th) не позднее 30-х годов текущего века.

Ключевые слова: ядерная энергия, глубина выгорания топлива, природный уран, невозобновляемые традиционные энергоресурсы, углеводороды, динамика добычи, темп добычи, пик добычи, ядерные реакторы-бридеры.

ВВЕДЕНИЕ

Среди критериев долгосрочного устойчивого развития энергетики одним из основных называют обеспеченность энергоресурсами на длительную перспективу [1 – 4]. Развитие цивилизации сопровождается неуклонным ростом добычи энергетических

© Ю.А. Ульянин, В.В. Харитонов, Д.Ю. Юршина, 2017

ресурсов и металлов, играющих важную роль «драйверов технологий и прогресса». До сих пор традиционные углеводороды (уголь, нефть и природный газ) обеспечивают почти 90% всего энергопотребления человечества, в том числе и для производства металлов [5 – 7]. В то же время геологические оценки ископаемых традиционных ресурсов весьма ограничены, что естественно ставит вопрос о динамике их истощения и перспективах энергетических технологий, включая ядерную энергетику. В работе приводятся современные геологические данные об энергетическом потенциале углеводородов и природного урана и глобальной динамике их добычи. На основании этих данных и математической модели, учитывающей баланс масс добываемых и остающихся в недрах ископаемых источников энергии, получен аналитический прогноз динамики истощения традиционных энергоресурсов. Показано, в какой мере добыча природного урана может ограничивать развитие ядерной энергетики в текущем веке и как может увеличиваться «вилка» между растущими потребностями в энергии и падающей добычей истощаемых традиционных энергоресурсов. Сократить возможный дефицит традиционных энергоресурсов, который может быстро нарастать после 40-х годов текущего века, возможно с помощью интенсивного развития ядерного бридинга – расширенного воспроизводства искусственного ядерного топлива (^{239}Pu и, возможно, ^{233}U) из сырьевых нуклидов ^{238}U и ^{232}Th , энергетического потенциала которых хватит на несколько тысячелетий.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ НА АЭС И ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО УРАНА

Важной энергетической и экономической характеристикой ядерного топлива является так называемая *глубина выгорания* топлива (Burnup Fraction, или удельная энерговыработка), определяемая как тепловая энергия, выделившаяся при сгорании единицы массы ядерного топлива (при заданном изотопном составе) за весь период использования в реакторе [3, 8]. Глубину выгорания топлива B обычно выражают количеством мегаватт-суток (тепловой энергии) на килограмм топлива (МВт-сут/кг или ГВт-сут/т). Время пребывания топлива в реакторе (и глубина выгорания) ограничивается под влиянием, в основном, двух факторов: снижения концентрации делящихся изотопов и накопления продуктов деления. С глубиной выгорания связана потребность в периодической подпитке реактора топливом, т.е. потребность реактора в обогащенном уране, работе разделения изотопов урана и природном уране. Чем выше глубина выгорания, тем реже реактор останавливается на перегрузку и тем больше выручка АЭС от продажи электроэнергии. В действующих энергетических реакторах на тепловых нейтронах глубина выгорания составляет всего 40 – 50 ГВт-сут/т. В целях повышения экономической эффективности реакторов разрабатываются новые типы топлива с большей глубиной выгорания (до 70 – 80 ГВт-сут/т).

Для обеспечения работы ядерного реактора с тепловой мощностью Q (Вт или ГВт) и с электрической установленной мощностью $W = \eta Q$ (Вт или ГВт) при КПД (брутто) η и коэффициенте использования установленной мощности (КИУМ) требуется среднегодовое количество топлива (обогащенного уранового продукта)

$$P = Q/B = \text{КИУМ} \cdot W / \eta B. \quad (1)$$

Так, при $W = 1000$ МВт, $\eta = 1/3$, КИУМ = 0,85 и $B = 40$ ГВт-сут/т получаем потребность в обогащенном уране $P \approx 23$ тУ/год на один реактор.

В процессе обогащения урана (разделения изотопов) на обогатительных предприятиях природный уран, называемый исходным сырьем (или питанием – Feed), с расходом F (т/год) и концентрацией $c = 0.7115\%$ ^{235}U (по массе) поступает на вход разделительного производства (в виде гексафторида урана UF_6). В результате разделения изотопов образуются два потока урана: обогащенный урановый продукт (отбор, Enriched

Uranium Product) с расходом P (т/год) и концентрацией $x > c$ и обедненный уран (Depleted Uranium) или отвал (Waste) с расходом D (т/год) и концентрацией $y < c$. Так как выполняется баланс масс по полному количеству урана и по ^{235}U до и после разделения, то получается следующая взаимосвязь трех потоков (расходов) урана с различными концентрациями в них ^{235}U [3, 8 – 10]:

$$F = P(x - y)/(c - y), \quad D = P(x - c)/(c - y). \quad (2)$$

Отсюда следует, что на производство 1 т обогащенного урана ($P = 1$ т) с обогащением $x = 4,4\%$ (для типичного реактора PWR) и с типичным содержанием ^{235}U в отвале $y = 0,2\%$ требуется $F \approx 8,2$ т природного урана, при этом образуется $D = F - P \approx 7,2$ т обедненного урана (отвала). Следовательно, для ежегодной подпитки реактора топливом в количестве $P \approx 23$ тУ/год требуется ежегодно добывать около 189 т природного урана.

По данным WNA (World Nuclear Association – Всемирная ядерная ассоциация) [10] в 2016 г. на АЭС мира (447 реакторов с установленной мощностью 391 ГВт в 31-ой стране на 01.01.2017) произведено $E = 2,49 \cdot 10^{12}$ кВт·ч электроэнергии, что составило 10,6% от всего производства электроэнергии в мире. Годовая потребность действующих АЭС в природном уране составила $F = 63,4$ кт. Если принять среднемировую глубину выгорания топлива $B = 40$ ГВт·сут/тУ и КПД АЭС $\eta = 1/3$, то мировая потребность в обогащенном урановом продукте в 2016 г. составила $P = E/\eta B \approx 7,8$ ктУ/год, что дает отношение $F/P = 8,1$ (почти как в вышеприведенном примере).

Таким образом, приближенно можно считать, что каждая тонна природного урана позволяет произвести на АЭС около $E/F \approx 40$ ГВт·ч электроэнергии или около $q = E/\eta F \approx 424$ ТДж тепловой энергии (1 ТДж = 10^{12} Дж). Эту величину ($q \approx 424$ ГДж/кг) можно назвать «эффективной калорийностью природного урана» в современных ядерных реакторах, превышающей калорийность нефти (около 42 МДж/кг) приблизительно в 10 тыс. раз. При полном сгорании ^{235}U , содержащегося в 1 кг природного урана, тепловыделение составило бы $q_5 \approx 570$ ГДж, что выше «эффективной калорийности» вследствие неполного сгорания ^{235}U в реакторе, которое не компенсируется дополнительным сгоранием накопившегося в топливе (при работе реактора) плутония. Итак, годовое производство тепловой энергии на традиционных (современных) АЭС мира Q (или электроэнергии $E = \eta Q$) можно связать с годовым производством F природного урана в некотором году t простым выражением

$$Q(t) = q(t)F(t), \quad (3)$$

которое свидетельствует о том, что при снижении производства природного урана с течением времени (вследствие истощения его традиционных ресурсов) производство энергии на АЭС также будет снижаться. В процессе модернизации конструкции АЭС и ядерного топливного цикла величина «эффективной калорийности» природного урана может с течением времени возрастать за счет повышения глубины выгорания топлива, использования МОКС-топлива и других технологий. Однако нас интересует динамика традиционной ядерной энергетики и ее возможности в обеспечении мировых потребностей в первичных источниках энергии с учетом их истощения, включая истощение урана.

МОДЕЛЬ ИСЧЕРПАНИЯ НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ

Модель динамики истощения ограниченного ресурса предложена К. Хаббертом в 1956 г. [11 – 13] (см. подробное описание в [12]). Он показал, что для любой заданной географической области – для отдельного месторождения или для всей планеты график скорости добычи $G(t)$ данного ресурса по времени t должен иметь колоколообразную форму (рис. 1).

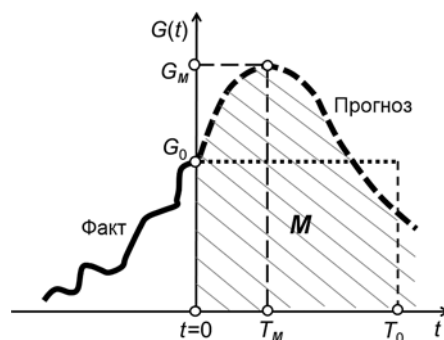


Рис. 1. Схема прогнозирования динамики добычи невозобновляемого ресурса с известным начальным уровнем добычи G_0 и оставшимся в недрах количеством ресурса M по модели МИФИ. $T_0 = M/G_0$ – период полного исчерпания при постоянной ежегодной добыче G_0 («R/P-ratio»)

Добыча сначала быстро наращивается, затем достигает пика (максимума) G_M в некоторый момент времени T_M и после этого уменьшается вплоть до окончательного исчерпания ресурса. В 1972 г. добыча нефти в США действительно достигла пика. Прогноз Хабберта в общих чертах оправдался, после чего его работа получила широкое признание. К недостаткам модели Хабберта относят симметричность кривой $G(t)$ и ее расхождение с текущим значением добычи при сильной волатильности исторических данных [3, 12]. Поэтому авторами используется модель, разработанная в МИФИ [3, 12, 14]. За начало отсчета времени $t = 0$ выбираем настоящий момент, с которого необходимо сделать прогноз. Прошлые (история добычи) соответствуют отрицательным значениям $t < 0$, а будущее (прогнозируемый период) – положительным $t > 0$. Полное количество данного ресурса, еще остающегося в недрах, обозначим через M . В модели МИФИ приняты три допущения для сглаженных (трендовых) характеристик добычи:

– уравнение материального баланса для оставшегося в недрах ископаемого $M(t \geq 0)$

$$M = \int_0^{\infty} G(t) dt ; \quad (4)$$

– скорость изменения добычи dG/dt пропорциональна уровню добычи $G(t)$, т.е.

$$dG/dt = k(t) \cdot G(t), \quad (5)$$

где коэффициент $k(t)$ – трендовый темп добычи (1/год), зависящий от времени (иногда величину $k(t)$ называют эффективностью использования ресурса или эффективностью экономики, так как чем больше величина $k(t)$, тем выше скорость роста добычи при том же ее уровне);

– темп добычи линейно уменьшается с течением времени прогноза:

$$k(t) = k_0(1 - t/T_M), \quad (6)$$

где k_0 – значение темпа в начальной стадии прогнозного периода (при $t = 0$), а не в начале освоения ресурса, как у Хабберта. Важно отметить, что темп добычи k_0 в начале прогнозного периода отражает существующие потребности в рассматриваемом ископаемом и сделанные инвестиции в будущую добычу. В итоге для динамики добычи ресурса получено аналитическое выражение в виде гауссовой кривой, расположенной правее $t = 0$ (см. рис. 1):

$$G(t \geq 0) = G_M \exp[k_0 T_M (1 - t/T_M)^2 / 2]. \quad (7)$$

Взаимосвязь максимума (пика) годовой добычи G_M с начальным уровнем добычи $G_0 = G(t = 0)$, начальным темпом добычи k_0 и периодом T_M достижения пика добычи определяется выражениями

$$G_M = G_0 \cdot \exp(k_0 T_M / 2) \quad \text{или} \quad T_M = 2 \cdot k_0^{-1} \ln(G_M / G_0). \quad (8)$$

Подстановка (7) и (8) в балансовое соотношение (4) дает взаимосвязь важнейших

параметров добычи k_0 , T_M и G_M , определяющих ее динамику, с оставшимся в недрах количеством извлекаемого ископаемого M :

$$M = G_M T_M \rho(\varepsilon). \quad (9)$$

Здесь введены безразмерные параметр ε и функция $\rho(\varepsilon)$, имеющие вид [3]

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{k_0 T_M}{2}} = \sqrt{\ln \frac{G_M}{G_0}}; \quad \rho(\varepsilon) = \sqrt{\pi} \frac{1 + \Phi(\varepsilon)}{2\varepsilon}; \quad \Phi(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\varepsilon \exp(-z^2) dz. \quad (10)$$

$\Phi(\varepsilon)$ называется функцией Лапласа или интегралом вероятностей. Эта функция монотонно растет от нуля до единицы при увеличении ε от нуля до ∞ .

Для практического использования данной модели, главные результаты которой представлены выражениями (7) – (10), требуется знание трех величин: последнего фактического значения годовой добычи G_0 , являющегося начальным для прогноза; величины оставшихся (на момент начала прогнозного периода) извлекаемых ресурсов (запасов) ископаемого топлива M и одного из параметров – k_0 или G_M . Рассмотрим оба варианта (назовем их соответственно К и Г).

Вариант К удобен тогда, когда известен (или задан) начальный темп добычи k_0 , т.е. известны величины M , G_0 и k_0 . Если начальный темп добычи (на момент начала прогнозного периода) не задан, его можно оценить путем усреднения за несколько предшествующих прогнозу лет, учитывая волатильность добычи. По известным величинам k_0 , M и G_0 определяется безразмерный комплекс $k_0 M / G_0$ и вычисляется безразмерный параметр ε из трансцендентного уравнения

$$k_0 M / G_0 = \rho_k(\varepsilon); \quad \rho_k(\varepsilon) = 2\rho(\varepsilon) \cdot \varepsilon^2 \exp(\varepsilon^2) = \sqrt{\pi} (1 + \Phi(\varepsilon)) \cdot \varepsilon \cdot \exp(\varepsilon^2), \quad (11)$$

а затем искомые параметры пика добычи

$$G_M = G_0 \exp(\varepsilon^2); \quad T_M = 2\varepsilon^2 / k_0. \quad (12)$$

Вариант Г удобен тогда, когда известно ограничение на величину пика добычи G_M (например, по технико-экономическим причинам, геологическим или по причинам спроса и т.п.), т.е. известна величина $\varepsilon = (\ln(G_M / G_0))^{1/2}$. Остальные расчетные параметры k_0 и T_M , характеризующие прогноз динамики добычи, вычисляются по формулам

$$T_M = M / (G_M \rho(\varepsilon)); \quad k_0 = 2\varepsilon^2 / T_M. \quad (13)$$

Зная отношение ожидаемого пика добычи G_M к последнему фактическому значению годовой добычи $G_0 < G_M$, вычисляем величину ε , затем при известном значении M – сначала время наступления пика добычи T_M , отсчитываемое от начала прогноза, а затем начальный темп прогнозной добычи k_0 .

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ИСЧЕРПАНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПРИРОДНОГО УРАНА И ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ НА АЭС

По данным WNA в 2016 г. было добыто $G_0 = 62$ ктU, что несколько ниже потребности АЭС, составившей 63,4 кт U/год [10]. С 1990 г. добыча урана отставала от потребности АЭС. Дефицит урана компенсировался складскими запасами и другими вторичными источниками, которые к настоящему времени значительно сократились [3, 10, 12, 15]. В 2016 г. известные извлекаемые ресурсы природного урана по себестоимости менее 260 долл./кг U составили около 7,6 Мт (млн. т), что вместе с оставшимися складскими запасами (около 0,2 – 0,54 Мт [3, 15]) дают верхнюю оценку $M \approx 8,1$ Мт. Причем 61% традиционных природных ресурсов урана сосредоточено в четырех странах: Австралии (31%), Казахстане (12%), России (9%) и Канаде (9%) [3, 10, 15 – 17].

Для прогнозирования производства энергии на традиционных АЭС используем выражение (3) при $q = 424$ ГВт/кг, в котором временная зависимость потребности в природном уране определяется выражением (7). Входящие в это выражение параметры G_M

и t_M вычисляются по варианту К (11) и (12) при $G_0 \equiv F_0 = 63,4$ ктУ/год и трендовом темпе развития мировой ядерной энергетики $k_0 \approx 2,5\%$ /год согласно данным WNA (2017). Как следует из табл. 1 и рис. 2, для принятых исходных данных пик производства ядерной энергии $Q_M \approx 42$ ЭДж/год на тепловых реакторах современного дизайна ожидается в середине века ($T_M \approx 35$ лет, т.е. в 2052 г.). Соответственно, пики производства электроэнергии на АЭС и добычи природного урана составят $E_M \approx 3,89 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год и $G_M \approx 99$ ктУ/год, что на 56% превышает аналогичные величины в 2016 г. К концу текущего столетия предложение природного урана из традиционных источников и соответствующее производство энергии на АЭС сократятся почти в полтора раза по сравнению с 2016 г.

Таблица 1

Параметры динамики добычи традиционных энергетических ресурсов в XXI в. по предложенной модели. Источники: исходные данные (M , G_0 , k_0) из WNA [10] и British Petroleum [18,19]; расчеты параметров динамики истощения (ресурсы и годовая добыча в энергетических единицах, ε , G_M , T_M) выполнены авторами

Параметр добычи*	Уголь	Нефть	Газ	Уран**	Всего
Ресурс M , тыс. ЭДж	23,4	10,4	7,3	3,4	44,5
Добыча в 2016 г., G_0 , ЭДж/год	153	206	138	26,9	524
Начальный темп в 2017 г. k_0 , %/год	2,5	1,1	2,4	2,5	
Период истощения $T_0 = \langle R/P \text{-ratio} \rangle$, лет	153	51	53	128	84
Безразмерный параметр ε	0,724	0,193	0,377	0,664	0,38
Пик добычи G_M , ЭДж/год	259	214	159	42	604
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 = $6,12 \cdot 10^9$ Дж; средняя калорийность угля 20,5 МДж/кг; средняя калорийность природного газа 39 МДж/м³; эффективная калорийность природного урана 424 ГДж/кг
 ** Ресурс урана определен с учетом складских запасов 0,5 Мт; вместо годовой добычи использована годовая потребность действующих АЭС в природном уране

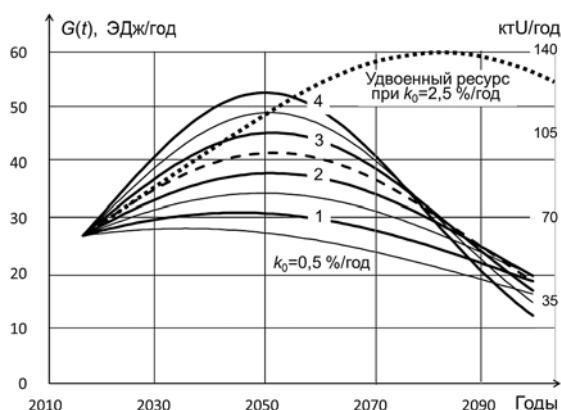


Рис. 2. Прогноз динамики годового производства ядерной энергии (ЭДж/год = 10^{18} Дж/год) и предложения природного урана (ктУ/год) при различных сценариях (начальных темпах) развития мировой ядерной энергетики и при ресурсах урана 8,1 Мт (себестоимость добычи урана до 260 долл./кг). Расчет по формулам (3), (7), (11), (12) при исходных параметрах на 2016 г. из табл.1. Штриховая линия соответствует $k_0 = 2,5\%$ /год; пунктирная линия — удвоенному ресурсу природного урана $M = 16,2$ Мт и $k_0 = 2,5\%$ /год

Чем выше темп развития ядерной энергетики в начале прогнозного периода, тем выше пик производства ядерной энергии (и предложения \approx добычи урана) и тем круче пос-

ледующий спад производства (см. рис. 2), т.е. тем быстрее наступает истощение ресурса. Если будет реализован «низкий сценарий» развития ядерной энергетики в мире с начальным темпом $k_0 = 0,5\%/год$, то в конце века производство традиционной ядерной энергии будет меньше на 39% по сравнению с 2016 г. Если будут задействованы нетрадиционные ресурсы урана (с большей себестоимостью добычи), вдвое превышающие современные, то можно ожидать удвоения и производства ядерной энергии к концу века (см. рис. 2). В этом случае ресурсов природного урана хватит для работы реакторов на тепловых нейтронах действующего типа в течение более, чем столетия. Однако и тогда вклад ядерной энергетики в обеспечение возрастающих потребностей в первичной энергии будет сокращаться (с нынешнего и без того малого вклада – около 5,1%).

На рисунке 3 для сравнения приведены кривые истощения традиционных ресурсов угля, нефти и газа, рассчитанные по формулам (7), (11) и (12) в энергетических единицах, характеризующих количество тепловой энергии, выделяемой при полном сгорании добытых углеводородов. Здесь не учитывается взаимовлияние добычи различных энергоресурсов.

Как следует из табл. 1, содержащей исходные данные (M , G_0 и k_0) и результаты расчета параметров динамики добычи ε , G_M , T_M), а также из рис. 3, ресурсы традиционных источников энергии будут в значительной мере истощены до конца текущего века при существующих технологических и экономических возможностях добычи. Причем пики добычи традиционных энергетических источников ожидаются до середины века.

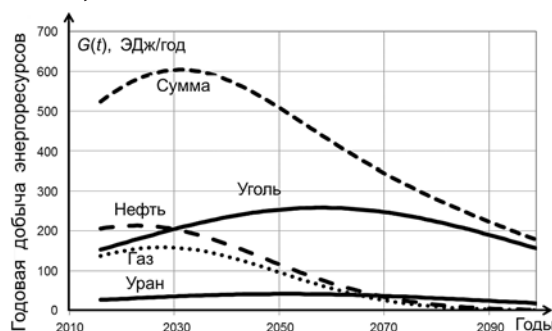


Рис. 3. Прогноз динамики годовой добычи традиционных энергоресурсов (угля, нефти, газа и урана) в мире в энергетических единицах (ЭДж/год = 10^{18} Дж/год)

Отметим, что пики добычи наступят раньше так называемого периода истощения $T_0 = M/G_0$ ресурса M при нынешнем уровне его добычи G_0 , именуемого в зарубежной литературе «R/P-ratio» (Reserves-to-Production ratio).

Из сравнения кривых на рис. 3 следует, что в настоящее время вклад ядерной энергии в топливообеспечение человечества едва превышает 5%. Тем не менее, к 2100 г. вклад ядерной энергии (на тепловых нейтронах) в первичные источники может увеличиться до 10% потому, что традиционные углеводороды будут выбывать быстрее, чем уран.

ПРОГНОЗ ДЕФИЦИТА ТРАДИЦИОННЫХ НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Благодаря политике энергосбережения за последние десятилетия темп потребления энергии в мире снизился практически вдвое, примерно до 1,5%/год [19]. Если такие темпы роста энергопотребления сохранятся до конца века, то к 2100 г. годовое энергопотребление увеличится в 3,5 раза по сравнению с 2016 г. (рис. 4). Эти потребности будут существенно превышать добычу традиционных энергоресурсов начиная с 30-х годов текущего века, а в конце века дефицит будет в три раза превышать потребление первичной энергии в настоящее время.

Дефицита традиционных ресурсов не будет ощущаться до 2040-х гг. при росте по-

требностей на уровне 1 %/год, а во второй половине XXI в. дефицит будет быстро увеличиваться. В условиях роста потребностей в первичной энергии с темпом 2%/год и выше дефицит традиционных энергоресурсов будет нарастать катастрофически уже в ближайшее десятилетие (рис. 4).

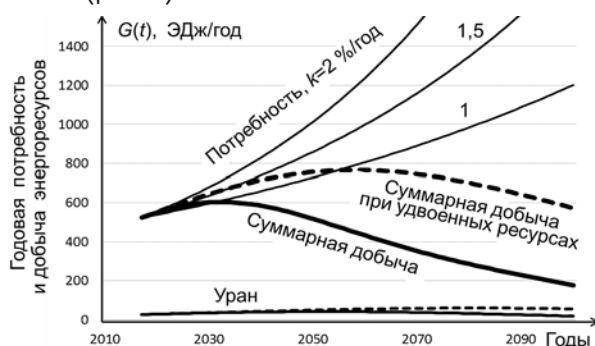


Рис. 4. Прогнозы мировой потребности в первичной энергии при различных темпах ежегодного прироста (1, 1,5 и 2%/год), а также суммарной добычи традиционных энергоресурсов и производства ядерной энергии при существующих ресурсах (табл. 1) и удвоенных ресурсах (штриховые линии).

Чем можно заполнить прогнозируемый дефицит первичных традиционных энергоресурсов (углеводородов и урана)?

Во-первых, разработкой нетрадиционных ресурсов, требующих и новых технологий, и повышенных инвестиций (сланцевые нефть и газ, газогидраты, растворенные в океанской воде соли урана и др. [7]). Предположим, что за счет нетрадиционных ресурсов углеводородов и урана можно удвоить суммарные ресурсы ископаемого топлива. Как следует из рис. 4, и в этом маловероятном случае удвоения извлекаемых энергоресурсов их дефицит также неизбежен, но он начнет заметно сказываться несколько позднее – в 50-х годах текущего века (при низких темпах роста потребности около 1%/год). Вклад ядерной энергии (с удвоенными ресурсами урана) в первичные невозобновляемые источники и в этом случае не превзойдет 10%.

Во-вторых, освоением возобновляемых ресурсов – солнечной и ветровой энергии [20 – 23]. По данным [20, 21] установленная электрическая мощность ветроустановок в мире достигла в 2015 г. 416 ГВт, а солнечных электростанций – 219 ГВт, что в сумме уже превышает почти вдвое мощность всех АЭС мира (около 391 ГВт). Однако трудно обосновать возможность развития возобновляемой энергетики в масштабах, превышающих в несколько раз современный уровень углеводородной энергетики в мире, обеспечивающей 90% потребностей человечества.

В-третьих, развитием ядерно-энергетических систем на основе реакторов-бридеров, способных к расширенному воспроизводству искусственного ядерного топлива (^{239}Pu из ^{238}U и, возможно, ^{233}U из ^{232}Th), не позднее 30-х годов текущего века. Энергетический потенциал ^{238}U и ^{232}Th в несколько десятков раз превышает потенциал углеводородов. Однако требуется обоснование технически и экономически возможных темпов развития бридерной ядерной энергетики, нуждающейся в замкнутом топливном цикле, приемлемых технологиях обращения с радиоактивными отходами, а также в обогащенном уране (и плутонии) для первичной загрузки бридеров [2, 24 – 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе приведены количественные результаты прогнозирования до конца текущего века динамики производства ядерной энергии (и предложения природного урана) на основе традиционных реакторов на тепловых нейтронах и источников природного урана. Приведены прогнозы истощения традиционных углеводородов (угля, нефти, природного газа), обеспечивающих 90% потребности в энергии в настоящее вре-

мя. Прогнозы базируются на современных геологических данных о традиционных энергетических ресурсах и балансовой аналитической модели исчерпания невозобновляемых ископаемых, разработанной авторами.

2. Показано, что ограниченность традиционных ресурсов природного урана (оцениваемых в 8,1 Мт при себестоимости добычи до 260 долл./кгU с учетом складских запасов) лимитирует вклад ядерной энергии в обеспечение человечества топливом в текущем веке на уровне менее 5 – 10%. Ресурсы всех традиционных невозобновляемых источников энергии будут в значительной мере исчерпаны до конца текущего века при существующих технологических и экономических возможностях добычи. Причем пики добычи традиционных энергетических источников ожидаются до середины века.

3. Сравнение растущих потребностей в первичных источниках энергии (при темпах роста 1 – 2 %/год) с уровнем добычи и исчерпания традиционных энергоресурсов показало, что потребности будут существенно превышать добычу традиционных энергоресурсов, начиная с 30-х годов текущего века, а во второй половине века дефицит энергоресурсов будет быстро увеличиваться, многократно превышая их предложение. Если предположить, что за счет нетрадиционных ресурсов углеводородов и урана можно удвоить суммарные ресурсы ископаемого топлива, то и в этом случае их дефицит неизбежен, но он начнет заметно сказываться несколько позднее – в 50-х годах текущего века (при низких темпах роста потребности около 1%/год). Вклад традиционной ядерной энергии (с удвоенными ресурсами урана) в первичные невозобновляемые источники и в этом случае не превзойдет 10%.

4. Снижение дефицита первичной энергии и увеличение вклада ядерной энергии в удовлетворение энергетических потребностей человечества возможны благодаря развитию ядерно-энергетических систем на основе реакторов-бридеров, способных к расширенному воспроизводству искусственного ядерного топлива (^{239}Pu из ^{238}U и, возможно, ^{233}U из ^{232}Th), не позднее 30-х годов текущего века. Энергетический потенциал ^{238}U и ^{232}Th в несколько десятков раз превышает потенциал углеводородов. Однако требуется обоснование технически возможных темпов развития бридерной ядерной энергетики, нуждающейся в замкнутом топливном цикле и приемлемых технологиях обращения с радиоактивными отходами, а также в обогащенном уране для первичной загрузки бридеров, что может стать проблематичным в связи с исчерпанием традиционных ресурсов природного урана.

Литература

1. Белая книга ядерной энергетики / Под общ. ред. проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во ГУП НИКИ-ЭТ, 2001. – 270 с.
2. Аврорин Е.Н., Адамов Е.О., Алексахин Р.М. и др. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в XXI веке. – М.: ОАО «НИКИЭТ», 2012. – 62 с.
3. Харитонов В.В. Динамика развития ядерной энергетики. Экономико-аналитические модели. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 328 с.
4. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics. INPRO Manual. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.4. IAEA, Vienna, 2014. – 103 p.
5. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. Энергетика в экономике XXI века. – М.: ИздАт, 2010. – 176 с.
6. Конторович А.Э., Эпов М.И., Эдер Л.В. Долгосрочные и среднесрочные факторы и сценарии развития глобальной энергетической системы в XXI веке. // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5-6. – С. 689-700.
7. Лаверов Н.П. Топливо-энергетические ресурсы: состояние, динамика освоения, обеспеченность. Часть 1. Мир. Лекция в РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2011. Электронный ресурс <http://borgolova.ampei.ru/sustainable/tek/reserves/lavrov>.
8. Синев М.Н. Экономика ядерной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат,

1987. – 480 с.

9. *Борисевич В.Д., Борман В.Д., Сулаберидзе Г.А.* Физические основы разделения изотопов в газовой центрифуге. / Под ред. В.Д. Бормана: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2005. – 320 с.

10. World Nuclear Association. Information Library. Электронный ресурс <http://www.world-nuclear.org/information-library.aspx>

11. *Hubbert M. King.* Nuclear Energy and the Fossil Fuels. American Petroleum Institute. Publication No. 95. Shell Development Company. June, 1956. P.1-40. Электронный ресурс <http://www.hubbertpeak.com/hubbert/1956/1956.pdf>

12. *Харитонов В.В., Кабашев К.В., Маликов Р.Р.* Долгосрочные тренды истощения традиционных энергетических ресурсов и перспективы ядерной энергетики: Монография. – М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – 96 с.

13. *Sverdrup H.U., Koca1 D. and Ragnarsdottir K.V.* Peak Metals, Minerals, Energy, Wealth, Food and Population; Urgent Policy Considerations for A Sustainable Society. // Journal of Environmental Science and Engineering B 1. – 2012. – No. 5. – PP. 499-533.

14. *Харитонов В.В., Кабашев К.В.* Аналитическая модель динамики добычи металлов. // Цветные металлы. – 2012. – № 10. – С. 20-24.

15. Uranium 2016: Resources, Production and Demand. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. OECD 2016. – 550 p.

16. *Живов В.Л., Бойцов А.В., Шумилин М.В.* Уран: геология, добыча, экономика. – М.: РИС «ВИМС», 2012. – 304 с.

17. *Тарханов А.В.* Современные тенденции развития мировой и российской урановой промышленности (2007 – 2012 гг.). «Минеральное сырье». Серия геолого-экономическая, №33. – М.: РИС «ВИМС», 2012. – 53 с.

18. BP Statistical Review of World Energy. June 2017. Электронный ресурс <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

19. BP Energy Outlook. 2017 edition. Электронный ресурс <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf>

20. RETHinking Energy 2017. Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi, 2017. – 130 p.

21. World Energy. Issues Monitor 2017. World Energy Council, 2017. – 156 p.

22. Energy [R]Evolution. A Sustainable USA Energy Outlook. Greenpeace International; European Renewable Energy Council (EREC); Global Wind Energy Council (GWEC). Report 3rd edition, 2014 USA energy scenario. – 87 p.

23. *Да Роза А.* Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: учебное пособие / Пер. с англ. под ред. С.П. Малышенко, О.С. Попеля. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект»; – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.

24. *Адамов Е.О., Ганев И.Х.* Экологически безупречная ядерная энергетика. – М.: НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала. 2007. – 147 с.

25. The Generation IV International Forum. Электронный ресурс https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public

26. Poplavysky Vladimir, Chebeskov Alexander. State of the Art and Trends of Development of Fast Reactor Technology. Proceedings of GLOBAL 2011 International Conference, Makuhari, Japan, December 11-16, 2011, Paper No. 357127.

Поступила в редакцию 21.01.2017 г.

Авторы

Ульянин Юрий Александрович, аспирант

E-mail: UljaninJ@tenex.ru

Харитонов Владимир Витальевич, профессор, заслуженный работник высшей школы, д. ф.-м. н.

E-mail: vvkharitonov@mephi.ru

Юршина Дарья Юрьевна, магистр

E-mail: yurshinadaria@gmail.com

UDC 621.039, 553.495 (063, 470)

NUCLEAR PERSPECTIVES AT EXHAUSTING TRENDS OF TRADITIONAL ENERGY RESOURCES

Uliyanin Y.A., Kharitonov V.V., Yurshina D.Yu.

National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physical Institute)
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

For the first time analytical relationships have been obtained between the production of energy at nuclear power plants in the world and their supply with natural uranium in conditions of the exhaustion of traditional resources until the end of the current century. The article represents the results of forecasting the dynamics of a possible shortage of traditional energy resources – hydrocarbons (coal, oil, natural gas) and natural uranium, increasing over time due to the growth of energy requirements (at a rate of 1-2% per year), on the one hand, and exhaustion non-renewable resources, on the other hand. The forecast is based on modern geological data on recoverable hydrocarbon and uranium reserves, as well as on a mathematical model of dynamics of non-renewable resource extraction, developed by the authors. All variants of calculations show that within the framework of the current paradigm of dealing with the traditional sources of energy, their reserves will be largely exhausted before the end of this century, and peaks of their production are expected until the middle of the century. The dynamics of the installed capacity of modern nuclear power plants will repeat the dynamics of the exhaustion of natural uranium, and the contribution of nuclear power plants to the energy provision of humankind will decrease, increasing the total deficit of traditional energy sources. Nevertheless, by 2100 year, the contribution of nuclear energy (on thermal neutrons) to primary sources can increase to 10%, because hydrocarbons will run out even faster than uranium. However, this amount of nuclear energy will be negligible compared to the demand for primary energy after the 1940s, even at the lowest growth rate of demand (at a rate of 1% per year). The growing difference between the increasing energy needs and the declining supply of exhaustible traditional energy resources makes it necessary to develop nuclear breeding – the expanded reproduction of artificial nuclear fuel (^{239}Pu from ^{238}U and, possibly, ^{233}U from ^{232}Th) no later than the 30s of the current century.

Key words: nuclear energy, fuel burnup fraction, natural uranium, non-renewable traditional energy resources, hydrocarbons, production dynamics, production rate, production peak, nuclear reactor breeders.

REFERENCES

1. White Book of Nuclear Energy. Ed. by Adamov E.O. Moscow. NIKIET Publ., 2001. 270 p. (in Russian).
2. Avrorin E.N., Adamov E.O., Aleksakhin R.M., Dgalavyan A.V., Dragunov Y.G., Ivanov V.B., Kalyakin S.G., Lopatkin A.V., Molokanov N.A., Muravyev E.V., Orlov V.V., Rachkov V.I., Smirnov V.P., Troyanov V.M. Strategy Concepts of Nuclear Energy Development in Russia at 21st Century. Moscow. NIKIET Publ., 2012. 62 p. (in Russian).
3. Kharitonov V.V. Dynamic of nuclear energy development. Economic models. Moscow. MEPhI Publ., 2014. 328 p. (in Russian).
4. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics. INPRO Manual. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.4. IAEA, Vienna, 2014. – 103 p.
5. Velikhov E.P., Gagarinskiy A.Y., Subbotin S.A., Tsubulskiy V.F. Energy in Economics of the XXI century. Moscow. IzdAT Publ., 2010. 176 p. (in Russian).
6. Kontorovich A.E., Epov M.I., Eder L.V. Long-term and medium-term factors and scenarios of global energy system in the XXI century. *Geologiya i Geofizika*, 2014, v. 55, no. 5-6, pp. 689-700. (in Russian).

7. Laverov N.P. Fuel-energy resources: condition, dynamics of development, security. Part 1. The World. Lecture in MUCTR D. Mendeleev, 2011. Available at <http://borgolova.ampei.ru/sustainable/tek/reserves/laverov> (in Russian).
8. Sinev M.N. Economics of Nuclear Energy. Fundamentals of Technology and Economics of Nuclear Fuel Production. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987. 320 p. (in Russian).
9. Borisevitch V.D., Borman V.D., Sulaberidze G.A. Basic Physics of Isotopes Separation in Gas Centrifuge. Moscow. MEPhI Publ., 2005. 320 p. (in Russian).
10. World Nuclear Association. Information Library. Available at <http://www.world-nuclear.org/information-library.aspx>
11. Hubbert M. King. Nuclear Energy and the Fossil Fuels. American Petroleum Institute. Publication No. 95. Shell Development Company. June, 1956, pp. 1-40. Available at <http://www.hubbertpeak.com/hubbert/1956/1956.pdf>
12. Kharitonov V.V., Kabashev K.V., Malikov R.R. Long-term Exhausting Trends of Traditional Energy Resources and Nuclear Energy Perspectives. Moscow. MEPhI Publ., 2016. 96 p. (in Russian).
13. Harald Ulrik Sverdrup, Deniz Koca1 and Kristin Vala Ragnarsdottir. Peak Metals, Minerals, Energy, Wealth, Food and Population; Urgent Policy Considerations for A Sustainable Society. *Journal of Environmental Science and Engineering B* 1. 2012, no. 5, pp. 499-533.
14. Kharitonov V.V., Kabashev K.V. Analytical Model of Metals Mining Dynamics. *Tsvetnye Metally*. 2012, no. 10, pp. 20-24 (in Russian).
15. Uranium 2016: Resources, Production and Demand. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. OECD 2016. 550 p.
16. Zhivov V. L., Boytsov A. V., Shumilin M. V. Uranium : Geology, Extraction, Economics. Moscow. All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Raw Materials n.a. N. M. Fedorovskiy Publ., 2012. 304 p. (in Russian).
17. Tarkhanov A.V. Modern Trends of World and Russian Uranium Industry (2007 – 2012). Minerals. Economic-geological series, No. 33. Moscow. All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Raw Materials n.a. N. M. Fedorovskiy Publ., 2012. 53 p. (in Russian).
18. BP Statistical Review of World Energy. June 2017. Available at <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
19. BP Energy Outlook. 2017 edition. Available at <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf>
20. REthinking Energy 2017. Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi, 2017. 130 p.
21. World Energy. Issues Monitor 2017. World Energy Council, 2017. 156 p.
22. Energy [R]evolution. A Sustainable USA Energy Outlook. Greenpeace International; European Renewable Energy Council (EREC); Global Wind Energy Council (GWEC). Report 3rd edition, 2014 USA energy scenario. 87 p.
23. Aldo Vieira da Rosa. Fundamentals of Renewable Energy Processes. Elsevier Inc. 2005. 704 p.
24. Adamov E.O., Ganey I.K. Ecologically Pure Nuclear Energy. Moscow. NIKIET Publ., 2007. 147 p. (in Russian).
25. The Generation IV International Forum. Available at https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
26. Poplavsky Vladimir, Chebeskov Alexander. State of the Art and Trends of Development of Fast Reactor Technology. Proceedings of GLOBAL 2011 International Conference, Makuhari, Japan, December 11-16, 2011, Paper No. 357127.

Authors

Uliyanin Yury Aleksandrovich, PhD Student

E-mail: UliyaninJ@tenex.ru

Kharitonov Vladimir Vitalievich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: vvkharitonov@mephi.ru

Yurshina Daria Yurievna, Master Student

E-mail: yurshinadaria@gmail.com