

УДК 621.0

## ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕЛИЯ-3 КАК ЭНЕРГОРЕСУРСА

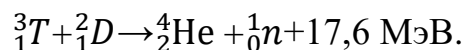
Паначев Б.С., студент гр. Элб-171, III курс

Научный руководитель: Черникова Т.М., д.т.н., профессор  
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

Сегодня, мы стоим на пороге времени, когда нынешние энергоресурсы начнут уходить в прошлое. Разведанных запасов нефти хватит лет на 50-60 [1], угля на 150 лет [2], а ведь именно на них держится две трети мировой энергетики. Что же их заменит? Альтернативные источники, такие как ветер и солнечный свет для локального использования неплохи, но слишком сильно привязаны к местности, что ограничивает их распространённость. Ядерная энергия тоже неплоха, поскольку её топливо высокоэнергетично, нет выбросов в атмосферу и низкая привязанность к местности. Однако, репутация, которую получила ядерная энергетика из-за катастроф на Чернобыльской и Фукусимской АЭС, вынуждает применять повышенные меры к безопасности и квалификации сотрудников. Также немалой проблемой является захоронение отработанного топлива. Эти факторы сильно сказываются на распространённости и доступности ядерной энергии. В принципе, эти проблемы может решить термоядерная энергетика, возможность использования которой в настоящее время очень актуальна. Хотя и там не всё просто.

Целью настоящей работы является анализ и расчет возможности использования гелия-3 в термоядерной энергетике.

Самое простое, в плане запуска и поддержки реакции, это тритиево-дейтериевое топливо. Горит оно при относительно небольшой температуре по схеме



Энергия ( $q_T$ ), получаемая при синтезе 1 м<sup>3</sup> тритиево-дейтериевой смеси, из которых 0,5 м<sup>3</sup> (0,134 кг) тритий и 0,5 м<sup>3</sup> (0,09 кг) дейтерий, может быть рассчитана по формуле:

$$q_T = \nu N_A Q, \quad (1)$$

где  $\nu$  – количество молей;  $N_A$  – число Авогадро;  $Q$  – энергия, получаемая при синтезе одной пары изотопов. Получим:

$$q_T = 22,35 \text{ моль} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль} \cdot 17,6 \text{ МэВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 37,8 \text{ ТДж/м}^3.$$

В сравнении с основными видами топлива для теплоэлектростанций, видно, что термоядерное топливо достаточно энергоёмкое (табл. 1) [3].

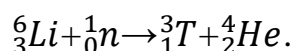
Таблица 1

Теплота сгорания топлива

Топливо	Дейтерий-тритий	Природный газ	Мазут	Каменный уголь
Теплота сгорания	37,8 ТДж/м <sup>3</sup>	33,5 МДж/м <sup>3</sup>	36,5 ГДж/м <sup>3</sup>	35,1 ГДж/м <sup>3</sup>

Правда, 80% этой энергии синтеза уходит с нейтронами, чьё излучение крайне губительно и обладает сильной проникающей способностью. Для этого придётся делать вокруг реактора большую систему защиты из бериллия и тяжёлой воды, которые хорошо поглощают нейтроны. Но любая защита будет защищать внешнюю среду от излучения реактора, тогда как сам реактор будет под мощным нейтронным потоком, что будет вызывать наведённую радиацию и изменение свойств материалов реактора. Это потребует постоянной замены частей реактора, что сильно скажется на стоимости киловатт-часа.

Также запасы трития напрямую зависят от запасов лития, так как ввиду своего двенадцатилетнего периода полураспада, трития очень мало в чистом виде в природе, а также невыгодно его долгое хранение. Поэтому тритий получают облучением нейтронами лития-6:



Запасы лития оцениваются в 28 млн тонн, из которых нужного лития-6: 7,5 %, то есть 2,1 млн тонн, или 35000 60-тонных вагонов [4].

Количество энергии  $W_T$ , которое можно добыть из всего лития-6, можно определить по формуле:

$$W_T = \frac{{}^3_7 \cdot m q_T}{\rho_T}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса разведанного лития-6;  $q_T$  – энергия, получаемая при синтезе дейтерия-трития;  $\rho_T$  – плотность трития. Получим

$$W_T = \frac{2,1 \text{ млн тонн} \cdot {}^3_7 \cdot 37,8 \text{ ТДж/м}^3}{0,134 \text{ кг/м}^3} = 2,54 \cdot 10^{23} \text{ Дж}.$$

Для сравнения возьмём мазут. Из одного барреля нефти обычно получают 6,8 литров мазута [5]. Нефтяные запасы равны 1726685 млрд бар[1], тогда масса мазута, которую можно получить:

$$m_M = MV_{oil} \rho_M = 1726685 \text{ млрд бар} \cdot 6,8 \text{ л/бар} \cdot 0,9 \text{ кг/л} = 1,06 \cdot 10^{17} \text{ кг},$$

где  $V_{oil}$  – объём разведанных запасов нефти;  $M$  – количество мазута, получаемого из одного барреля нефти;  $\rho_M$  – плотность мазута.

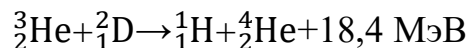
При расчёте, что весь мазут пойдёт на энергетику, получим энергию ( $W_M$ ), равную:

$$W_M = m_M q_M = 1,06 \cdot 10^{17} \text{ кг} \cdot 40,6 \text{ МДж/кг} = 4,29 \cdot 10^{23} \text{ Дж.}$$

где  $q_M$  – теплота сжигания мазута.

Как видно, энергии, которую может дать нефть через мазут, в 1,69 раз больше, чем даст тритий. Счёт не в пользу синтеза, особенно учитывая распространённость лития, саму редкость изотопа лития-6, а также сложности, вызываемые сильным нейтронным излучением. Нужно топливо, у которого этих недостатков нет, или они не так сильно выражены.

Гелий-3 – неплохая альтернатива тритию. Реакция с его участием более калорийная.

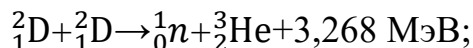
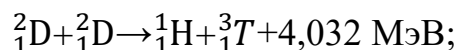


Если опять взять 1 м<sup>3</sup> дейтериево-гелиевой смеси, где  $\frac{1}{3}$  м<sup>3</sup> (0,06 кг) будет отведена дейтерию, а оставшийся объём гелию-3 (0,09 кг), то, используя (1), получим;

$$q_{\text{He}} = 29,76 \text{ моль} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль} \cdot 18,4 \text{ МэВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 52,7 \text{ ТДж/м}^3.$$

На 39,4 % больше, чем с дейтериево-тритиевой смесью.

Конечно, уровень нейтронного излучения не будет равен нулю, так как параллельно с основной реакцией будут проходить побочные реакции, такие как:



но уровень излучения всё равно будет намного меньше, чем при тритиевой реакции.

И у всего этого праздника жизни есть одна большая проблема: распространённость. Гелий-3 невероятно редкий изотоп. На один атом гелия-3, в земной атмосфере приходится семьсот тридцать тысяч атомов гелия-4, или же, если взять воздушный шарик, объёмом в 3 литра, и закачать его гелием, то массу нужного изотопа можно рассчитать:

$$m_{\text{He3}} = \frac{V_{\text{He}} \rho_{\text{He}}}{N},$$

где  $m_{\text{He3}}$  – масса гелия-3 в шарике;  $V_{\text{He}}$  – объём шарика;  $\rho_{\text{He}}$  – плотность гелия;  $N$  – отношение гелия-4 к гелию-3. Получим

$$m_{He3} = \frac{3 \text{ литра} \cdot 0,178 \text{ кг/м}^3}{730000} = 7,3 \cdot 10^{-10} \text{ кг.}$$

Негусто. С такой маленькой долей добыча из атмосферы не то что сложна, невозможна. Есть, конечно, ещё один потенциальный источник гелия-3 – это тритий, вернее его бета-распад:



Конечно, запасы трития, как говорилось ранее, ограничены, но поскольку реакция на гелии-3 более калорийна, то общая энергия термоядерных ресурсов Земли возрастает. Используя (2), получим:

$$W_{He1} = \frac{2,1 \text{ млн тонн} \cdot 3 / 7 \cdot 52,7 \text{ ТДж}}{0,09 \text{ кг}} = 3,54 \cdot 10^{23} \text{ Дж.}$$

Тут уже энергии на 20% меньше, чем может дать мазут. Показатель конечно неплохой, но период полураспада трития составляет 12 лет. Такими темпами добыча будет происходить довольно медленно, и идти вширь термоядерной энергетике будет сложно. Где же его найти ещё?

Проходящий внутри Солнца синтез, основанный на тройном протонном цикле, порождает гелий-3, который, в небольшом количестве, улетает вместе с солнечным ветром. Земная атмосфера и магнитосфера не дают попасть ветру на Землю, и, как следствие, запасы гелия-3 в земной атмосфере не пополняются. Но на Луне, где нет ни атмосферы, ни магнитосферы, верхний слой лунного грунта пропитан солнечным ветром. В нём содержание гелия-3 куда больше, чем на Земле. На один атом гелия-3 приходится две тысячи восьмисот атомов гелия-4, что в 260 раз больше, чем в земной атмосфере. Для получения одного грамма гелия придётся переработать 100 тонн лунного реголита. Чтобы перерабатывать такие объёмы грунта нужно будет создать настоящую промышленность на Луне, поскольку такой объём грунта будет экономически невыгодно возить на Землю, поэтому, добычу гелия лучше организовать на месте. Конечно, лунная база будет недешёвой, учитывая, что самым большим рукотворным объектом в космосе, и одновременно самым дорогим (157 млрд долларов) является МКС, а стоимость программы «Аполлон», при пересчёте на современный курс, составляет 152 млрд долларов. Если дело настолько затратное, стоит ли игра свеч? По оценкам специалистов, на Луне может находиться до 2,5 млн тонн гелия-3 [6]. То есть, энергетический потенциал Луны равен:

$$W_{He2} = \frac{M_{He3} \rho_{He}}{\rho_{He3}} = \frac{2,5 \text{ млн тонн} \cdot 52,7 \text{ ТДж/м}^3}{0,09 \text{ кг/м}^3} = 1,46 \cdot 10^{24} \text{ Дж,}$$

где  $M_{He3}$  – масса гелия-3 на Луне;  $\rho_{He3}$  – плотность гелия-3.

Это в 3,4 раза больше, чем может дать мазут. Игра, в целом, стоит свеч.

Что в итоге? Мы вряд ли станем свидетелями расцвета гелиевой энергетики, хотя бы потому, что реакцию гелия-третия сложнее поддерживать, чем реакцию дейтерия-третия. А ведь сейчас даже не зажжена вторая. Так что, только наши потомки смогут погреться у термоядерного огня.

Таким образом, проведя соответствующие расчеты, можно сделать вывод. Если человечество начнет крупномасштабное освоение космоса, то это может сильно снизить стоимость космических перевозок, а, следовательно, снизит стоимость кубометра гелия-3 и сделает его более доступным топливом. Вариант с  $\beta$ -распадом трития интересен, но весьма сложен технологически и всё равно не решает проблему с доступностью и ценой. Так что, только при крупномасштабном освоении космоса гелий-3 станет топливом будущего.

### Список литературы:

1. Запасы, производство и потребление нефти по странам мира. Экономический портал «EREPORT.RU» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ereport.ru/articles/commod/oilcount.htm>.

2. BP Statistical Review of World Energy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.europeangashub.com/wp-content/uploads/2019/06/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.

3. Теплота сгорания топлива. Портал по физическим данным веществ «Thermalinfo.ru» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/eto-interesno/udelnaya-teplota-sgoraniya-topliva-i-goryuchih-materialov>.

4. Мировые запасы литиевых ресурсов. Электровелосипед мотор-колесо [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electra.com.ua/akkumulyator/420-mirovye-zapasy-litievyykh-resursov.html>.

5. Сколько бензина и нефтепродуктов выходит из одного барреля нефти? Портал о нефти «Oil» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asuneft.ru/oborudovanie/skolko-benzina-i-nefteproduktov-vyvodit-iz-odnogo-barrel-nefti.html>.

6. The estimation of helium-3 probable reserves in lunar regolith. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2007/pdf/2175.pdf>.