

УДК 621.59

Ю.М. Симоненко

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, 65039, Одеса

КРИОГЕННІ МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ГЕЛІЮ З АТМОСФЕРИ

Багато науково ємних технологій немислимі без використання гелію. До кінця поточного століття в родовищах природного газу зміст Не впаде до тисячних часток відсотка. Людству доведеться знаходити альтернативні методи отримання цієї безцінної речовини. Одним з джерел гелію може стати земна атмосфера, в одному кубічному метрі якої міститься 0,00052 % гелію.

Ключові слова: гелій, родовище, термоядерний синтез, установка розділення повітря.

Ю.М. Симоненко

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, 65039, Одесса

КРИОГЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ АТМОСФЕРЫ

Многие наукоемкие технологии немислимы без использования гелия. К концу текущего века в месторождениях природного газа содержание Не упадет до тысячных долей процента. Человечеству придется находить альтернативные методы получения этого бесценного вещества. Одним из источников гелия может служить земная атмосфера, одном кубометре которой содержится 0,00052 % гелия.

Ключевые слова: гелий, месторождение, термоядерный синтез, воздухоразделительная установка.

1. ВВЕДЕНИЕ

В Украине отсутствуют богатые гелием месторождения, и мы вынуждены импортировать этот уникальный продукт из стран, располагающих гелиеносными запасами природного газа. Между тем, в нашей стране освоено в промышленных масштабах производство «солнечного газа», которое имеет неограниченный ресурсный потенциал [1, 2]. На предприятиях компании «Айсблнк» перерабатывается концентрат неона и гелия, выделяемый из атмосферного воздуха. Из него получают неон высокой чистоты и извлекают спектрально-чистый гелий с качеством $\eta_{\text{He}} = 99,9999\%$. Такой метод получения Не будет востребован в будущем после обеднения подземных запасов. Этот источник гелия никогда не иссякнет, так как он питается самой атмосферой.

2. НАБРОСКИ СЦЕНАРИЯ ХХІІ-го ВЕКА

Уникальные физические свойства гелия предопределили его использование во многих современных технологиях. Ближайшие десятилетия основными источниками гелия будут оставаться природные, попутные и нефтяные газы, добываемые из недр США, Алжира и Катара [3]. Ключевая роль в числе поставщиков гелия на восточном рынке перейдет к России, активно разрабатывающей новые гелиеносные месторождения в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия) [4]. В них сосредоточены более 10 млрд.м³ гелия (рис. 1). При нынешней динамике потреблении гелия в мире их хватило бы на полвека.

К сожалению, природные запасы гелия не безграничны и в доступных земных залежах к концу 21-го века они практически иссякнут [3]. Ситуация с гелием усугубляется тем, что его изъятие из недр диктуется исключительно спросом на энергоносители. Разработка новых месторождений, прокладка ниток газопроводов может опережать строительство гелиевых заводов для очистки и оживания гелия. В таких условиях часть вынужденно извлекаемого гелия оказывается невостребованной и может быть потеряна. Эта ситуация не нова. Задача согласования расходов извлекаемых гелия и природного газа решалась в 60 – 70-тых годах прошлого столетия путем накопления гелия в подземных хранилищах США (рис. 2). К такому шагу человечество вынуждено будет прибегнуть снова, чтобы сбалансировать расходы добываемого газового топлива и потребляемого гелия.

Сейчас ряд обеспокоенных ученых предлагает создать «всемирный банк» гелия [3]. Для этих целей в районах новых газогелиевых месторождений необходимо будет развернуть хранилища сырого гелия объемом несколько кубических километров! Такой дальновидный подход позволит избежать необратимых потерь «солнечного газа» и оставить его в виде запасов будущим поколениям.

Как и все ископаемые ресурсы, земной гелий – продукт многовековой эволюции. К концу текущего века в потоках природного газа его содержание упадет до тысячных долей процента. Не с
© Ю.М. Симоненко, 2014
21-го века. Правда, сеть хранилищ гелия сможет несколько смягчить неотвратимый кризис. Но

принципіально вирішити проблему дефіциту He таким путем неможливо. В 22-м веку глобальний накопитель гелия уже нечем будет «подзаряжать»...

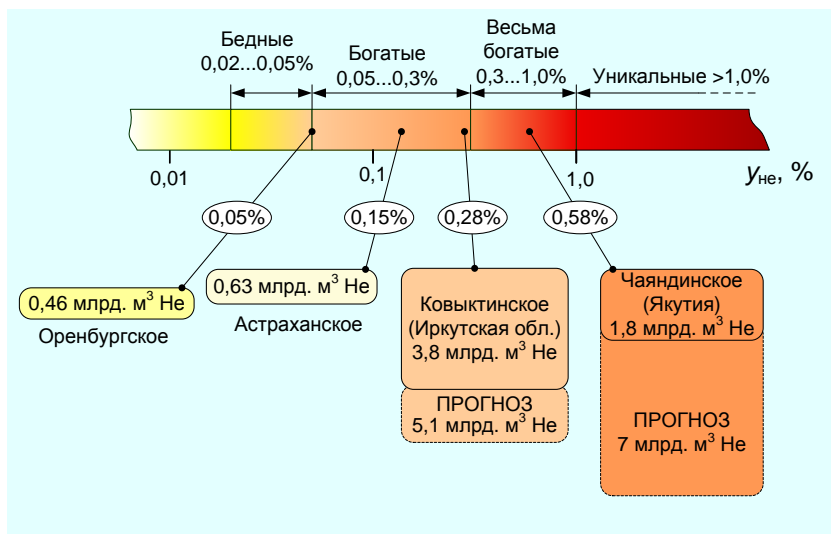


Рисунок 1. Градація месторождений природного газа по содержанию гелия. (Для наглядности показаны объемы и средние концентрации He в некоторых газогелиевых провинциях России)

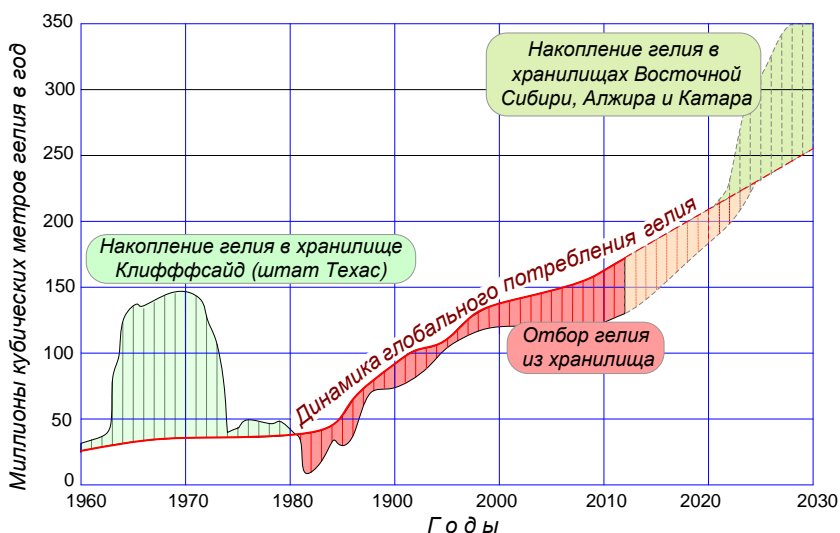


Рисунок 2. Объемы резервирования и отбора гелия из подземных хранилищ и прогноз гелиевых потоков на ближайшее будущее

Одним из альтернативных вариантов пополнения запасов гелия в будущем видятся реакции термоядерного синтеза. Известно, что при соединении изотопов водорода (дейтерия и трития) образуется энергия в количестве 17,6 МэВ, нейтрон и атом гелия. Точнее, его «тяжелого» изотопа – ^4He (рис. 4-а). Опираясь на более наглядными объемами термоядерного топлива, представим результат работы «реактора будущего» за один час (рис. 4-б). На нынешнем этапе суммарная мощность электростанций на Земле приближается к $2 \cdot 10^9$ кВт. В среднем – около 300 Ватт на одного

жителя Земли. Если бы управляемый ядерный синтез человечество освоило уже сегодня и с его помощью вырабатывало бы всю потребляемую электроэнергию, то попутно можно было генерировать всего 1,5...2 миллиона кубических метров гелия в год. Таким образом, даже обладая новейшими энергетическими технологиями, мы получим в реакторах около процента от мирового потребления гелия на нынешнем этапе. Этот весьма скромный результат свидетельствует о сомнительности перспективы чисто ядерного источника гелия.

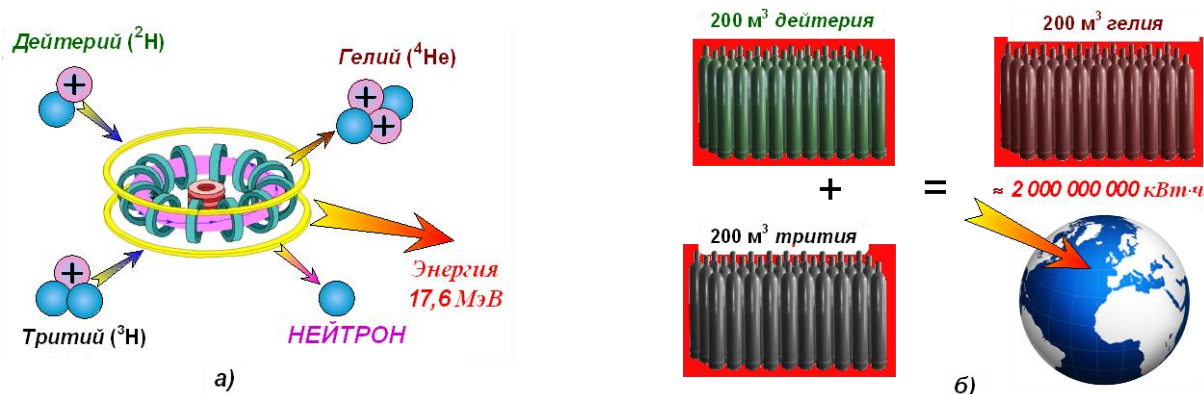


Рисунок 4. Один из типов термоядерной реакции, сопровождаемой получением изотопа ^4He ; а) - на уровне элементарных частиц; б) – на макроуровне (1 час работы электростанции с кпд 50%, обеспечивающей глобальные потребности человечества)

3. ЕСТЬ ЛИ У ГЕЛИЯ КРИОГЕННОЕ БУДУЩЕЕ?

До середины прошлого века каждый год из земных недр в атмосферу поступало в среднем 35 миллионов кубических метров гелия. В последние десятилетия в воздух добавляется гелия на порядок больше. Это – следствие целенаправленного извлечения человеком гелия и его использования в объеме около 190 миллионов кубических метров в год. Еще большее количество гелия (по некоторым данным до 600 миллионов кубов!) «вливается» в атмосферу при сжигании природного и попутного нефтяного газов, из которых гелий не извлекался. Это – невосполнимая потеря. По существу, за нашей Землей тянется размытый

«кометный» шлейф из уникального по свойствам газа, который составляет 23% массы вселенной.

Между поступлением гелия в атмосферу и потерями его в окружающее пространство установилось равновесие. Это соотношение формировалось миллионы лет, и деятельность человека пока не успела на нем отразиться. Как следует из рисунка 5-б, в одном кубометре воздуха гелия содержится чуть больше пяти кубических сантиметров или 0,00052 %. Для наглядности рядом (рис. 5-а) представлен состав одного кубического метра природного газа с концентрацией ГЕЛИЯ 0,58%, характерный для Чаяндинского месторождения в России [4].

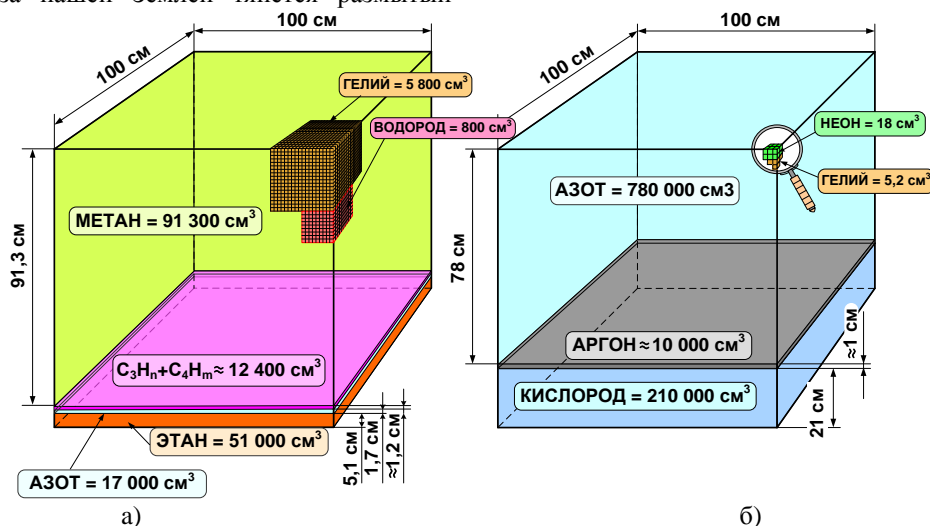


Рисунок 5. Сравнение концентрации гелия в 1 м^3 природного газа и атмосферного воздуха

Очевидно (рис. 5), что содержание гелия в современных газовых месторождениях на порядки выше, чем в атмосфере. Поэтому в качестве источника Не природный газ пока имеет неоспоримые преимущества. На данном этапе принято считать рентабельным извлечение гелия из сырья с содержанием $u_{\text{He}} > 0,1 \%$. Но со временем эта граница неуклонно смещается в сторону уменьшения

концентраций (рис. 6). Верхняя шкала представляет один из возможных сценариев падения концентрации гелия в располагаемых запасах газового сырья. Из графика следует, что примерно через столетие расходы на извлечение гелия из природного газа возрастут в сотни раз и приблизятся к уровню затрат на получение гелия из атмосферы.

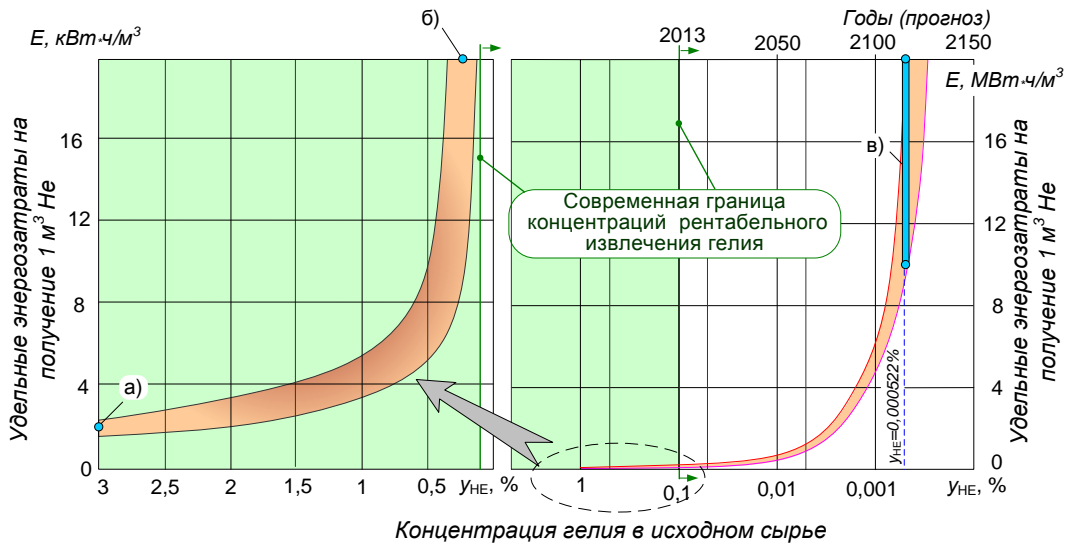


Рисунок 6. Расход энергии на извлечение гелия криогенными методами в зависимости от состава исходного сырья. Уровни затрат, обозначенные а), б) и в), соответствуют вариантам технологий, показанным на рис. 8 (а-в)

Извлекать чистый гелий из воздуха, в котором его содержится всего 0,00052 % весьма трудно. Ведь концентрацию целевого продукта потребуется увеличить в 200 тысяч раз! Очевидно, что за один прием такой результат не может быть достигнут. По этой причине потребуется осуществить ряд последовательных процессов [5]. Начальные стадии концентрирования осуществляются в нижней колонне ВРУ и встроенных сепараторах азота, которыми оборудованы большин-

ство высокорасходных установок (рис. 7, этап I). Схема контура для получения инертных газов представлена в статье [6]. Уже на выходе из нижней колонны ВРУ количество гелия в потоке поднимается до уровня, характерного для существующих газогелиевых месторождений (рис.1 и 5-а). А после дополнительного сепаратора его концентрация возрастает до 10% (остальное азот, неон и, частично, водород). Таким образом, в результате первого шага гелий обогащается в 20 000 раз.

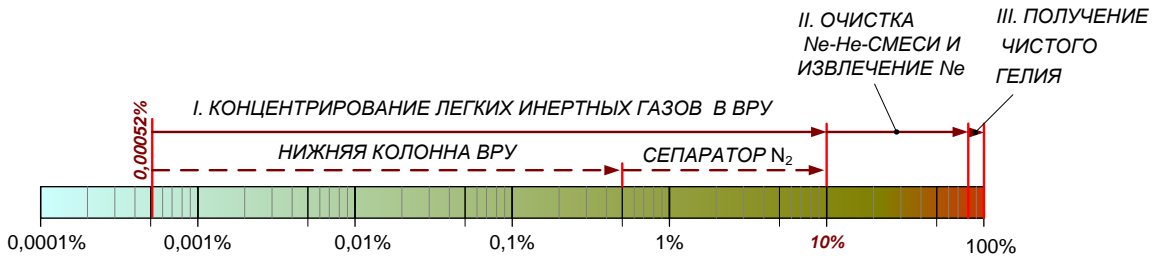
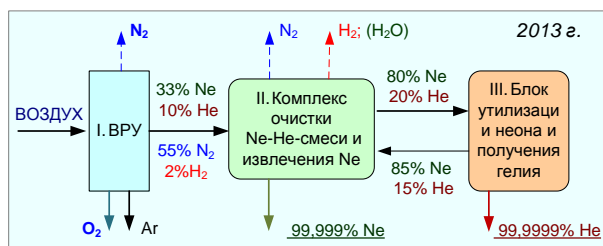


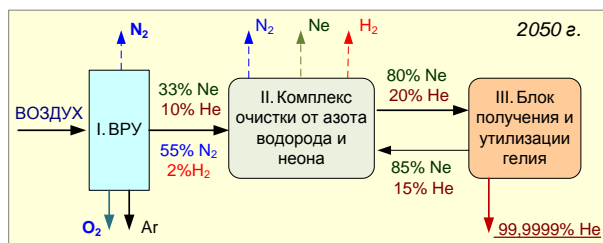
Рисунок 7. Изменение концентрации гелия в ходе последовательных процессов обогащения и очистки

В результате дальнейшего концентрирования и очистки (рис. 7, этап II) получают неонгелиевую смесь с содержанием гелия 20...25 %, в которой объем побочных примесей не превышает нескольких миллионных долей. Такая чистота обязательна, поскольку последующая ректификация неонгелиевой смеси происходит при температуре порядка 30 К, а в этих условиях большинство веществ существуют в твердом состоянии. Замерзая,

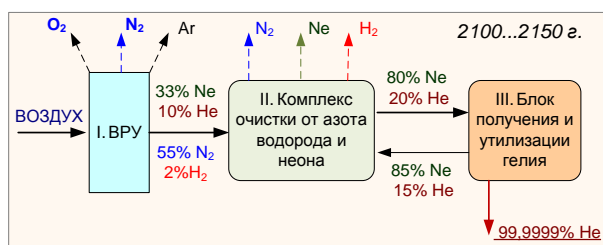
они могут стать причиной закупорки трубопроводов и арматуры. Очищенную смесь, состоящую из 75% неона и 25% гелия, разделяют конденсационным методом. В результате получают два потока: чистый неон и 80%-й гелий в смеси с неоном. Наконец, на этапе III методом адсорбции из гелиевого потока выделяют чистый гелий. При этом понятие «чистый», означает качество 99,999% - 99,9999%.



а)



б)



в)

Рисунок 8. Варианты технологий извлечения атмосферного гелия (обозначение контуров I...III соответствует рис. 7)

а) - получение гелия в качестве побочного продукта неоновой промышленности

б) - получение гелия (без неона) при одновременном использовании основных продуктов разделения воздуха (O_2 , Ar или N_2)

в) - получение гелия в качестве единственного продукта переработки воздуха

Обозначения:

ВРУ – воздухоразделительная установка.

Направление стрелок:

↑ – побочные (теряемые) продукты;

↓ – извлекаемые газы

Как отмечено выше, все процессы получения гелия из атмосферы в нашей стране освоены и реализуются в промышленных масштабах. Но эти объемы, все же, достаточно далеки от потребностей человечества. При освоении глобального производства гелия из атмосферы продуктивность аппаратов потребуется увеличить в тысячи раз. На пути такого повышения нет никаких физических или конструктивных препятствий. Однако это не означает, что для увеличения производительности достаточно будет адекватно нарастить геометрические размеры отдельных аппаратов. Масштабирование и тиражирование гелиевых установок потребует разработки экономичных методов сепарации и новых материалов. Есть основания полагать, что в течение располагаемых десятилетий инженеры и ученые с этой задачей справятся.

Можно ли сегодня прогнозировать уровень энергетических затрат на получение атмосферного гелия из воздуха? На этот вопрос существует несколько вариантов ответа, так как при разделении воздуха получают несколько продуктов с неодинаковой стоимостью и в разных агрегатных состояниях. По этой причине затраты энергии на атмосферный гелий будут зависеть от объемов производимых и реализуемых наряду с гелием веществ. Для современных условий характерен вариант (а), когда, как минимум, один из основных компонентов воздуха, получаемых ВРУ на стадии I, полностью востребован. При этом в виде побочного продукта извлекают неонгелиевый концентрат, разделяют его и без остатка ре-

лизуют и неон, и гелий (рис. 8–а). В этом случае значительную часть энергетических затрат на макроэтапе № I (рис. 7, 8) справедливо будет отнести к стоимости основных продуктов разделения воздуха (кислорода, азота и аргона), а на макроэтапе № II – к стоимости неона.

Для варианта (а) в случае, когда будут востребованы неон и один или несколько основных продуктов разделения воздуха, затраты энергии составят порядка $2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3 \text{ Ne}$. Это – достаточно скромный расход энергии, характерный для современного периода производства атмосферного Ne. Затраты сопоставимы с процессом получением гелия из природного газа с концентрацией 3% (точка «а» на рис. рис. 6). На таких условиях, при бережном отношении к неонгелиевому концентрату, мы сможем в обозримом будущем обеспечить максимум 10 миллионов кубометров гелия в год. Напомним, что одновременно с гелием могут быть получены и реализованы свыше 30 миллионов кубометров неона. Могут... Но такие массы неона современной промышленности не требуются.

При наращивании выпуска воздушного гелия наступит момент (вариант б, рис. 8), когда значительная часть Ne не будет востребована. В этом случае из концентрата легких инертных газов станут получать преимущественно гелий, а основная масса неона будет квалифицирована как побочная примесь. Вынужденное исключение неона из числа реализуемых продуктов приведет к увеличению расхода энергии на порядок и может до-

стигнуть 20 кВт·ч/м³ He. Этот расход энергии, сопоставим с получением гелия из природного газа с концентрацией 0,2...0,3 % (точка «б» на левом фрагменте рис. б). При этом, потенциальные возможности гелиевого производства будут такими же, как и в первом случае, т.е. в год не более 10 миллионов кубометров гелия. Или всего 5% от его мирового потребления.

Прогнозировать отдаленное будущее – занятие неблагодарное. Но можно предположить, что рост производства атмосферного гелия превысят динамику развития сталелитейной и химической промышленности. Тогда возможен вариант, при котором воздухоразделительные установки – источники гелиевого концентрата, будут эксплуатироваться в значительной мере для производства гелия (вариант в на рисунке 8). В этом случае их продуктивность не будет привязана ни к спросу на кислород (металл), ни к потребностям неона. Единственное, что будет сдерживать при тиражировании гигантских «гелиевых» ВРУ – это осязаемое по нынешним меркам энергопотребление – 10 000... 20 000 кВт·ч/м³He. Сегодня эти масштабные проекты кажутся утопией. Ведь для обеспечения нынешних запросов человечества по гелию потребуются отбирать из атмосферы каждый час более пяти кубических километров ВОЗДУХА! [3]. Это в тысячи раз превышает продуктивность самых мощных современных блоков разделения воздуха. На обеспечение человечества гелием, получаемым в ВРУ, потребуются затратить не менее десяти процентов всей вырабатываемой энергии. Но нужно помнить, что мы собираемся «штурмовать атмосферу» не сейчас, а в XXII - м веке. Представляется, что тогда эти цифры, да и сама идея, не будут выглядеть столь недоступными. Во всяком случае, они намного реальней, чем проект доставки изотопа ³He с Лунной поверхности на Землю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные данные отражают контуры будущего весьма приближенно. Сегодня трудно

оценить реальную эффективность энергообъектов и криогенных установок на стыке XXI и XXII-го веков. Но отдельные элементы технологий извлечения гелия из воздуха мы обрабатываем уже сегодня. В результате безотходного процесса в промышленных масштабах в ООО «Айсблик» получают спектрально-чистый гелий с качеством $\eta_{He} = 99,9999\%$. В процессе его ожижения также извлекается концентрат, обогащенный изотопом He³. Объемы выпуска атмосферного гелия возрастают с каждым годом. На фоне потока гелия, пока добываемого из природного газа, это очень малый ручеек. Но надо учитывать, что этот источник никогда не иссякнет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавренченко Г.К., Уткин В.Н. Как предотвратить «Гелиевую недостаточность?» // Технические газы. – 2013. – № 3. – С. 2-11.
2. Симоненко Ю.М., Гелий небесный (наброски сценария XXII-го века нашей эры). Gasword. – 2013, Вып. № 26 – С.18-19.
3. The Future of Helium as a Natural Resource/ W.J. Nuttall, R.H. Clarke (Editors), B.A. Glowacki – London and New York: Routledge, 2012. 330с.
4. Якуцени В.П., Проблемы освоения ресурсов восточносибирского гелия: www.yakutseni.ru/nauchnietrud/statyi/120-problemy-osvoenija-resursov-vostochno-sibirskogo-gelija/default.htm.
5. Бондаренко В.Л., Симоненко Ю.М. Криогенные технологии извлечения редких газов. // Одесса: ПО «Изд. центр». – 2013. – 332 с.
6. Бондаренко В. Л., Лущик А. А., Андреев А. Г., Дьяченко Т. В. Конденсационные системы обогащения Ne-He смеси и опыт их внедрения на Нижнетагильском металлургическом комбинате // Технические газы. – 2009. – № 6. – С. 66-70.
7. Бондаренко В. Л., Графов А. П., Куприянов М.Ю. и др. Оптимизация процессов извлечения изотопа ³He из природного гелия / Технические газы – 2012. – №6. – С. 47-53.

Yu.M. Symonenko

Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatnaya str., 65039, Odessa, Ukraine

CRYOGENIC METHODS OF ATMOSPHERIC HELIUM PRODUCTION

If there was a "Red List" of endangered chemical elements of the world, helium would definitely go in the top ten of critical substances. Along with silver, zinc and germanium helium is going to practically run out by the end of the twenty-first century. Moreover, the solar gas is the only gaseous element on this list. At the same time, a lot of modern and perspective technologies are impossible without helium. Unique physical and chemical features make it irreplaceable in scientific research, medicine, power engineering, aerospace and defense industries. Helium can be truly considered as an indicator of high technology.

Keywords: helium, helium field, thermonuclear reaction, gas field.

REFERENCES

1. **Lavrenchenko G. K., Utkin V. N.** Kak predotvratit "Helievuyu nedostatochnost? // *Technicheskie gazi.* – 2013. – № 3. – pp. 2-11.
2. **Symonenko Yu. M.,** Heliy nebesniy (nabroski scenariya XXII-go veka nashey ery). *Gasword.* – 2013, № 26 – pp.18-19.
3. *The Future of Helium as a Natural Resource/* W.J. Nuttall, R.H. Clarke (Editors), B.A. Glowacki – London and New York: Routledge, 2012. 330c.
4. **Yakuceni V. P.,** Problemi osvoeniya resursov vostochnosibirskogo heliya: www.yakutseni.ru/nauchnietrudystaty/120-problemy-osvoeniya-resursov-vostochno-sibirskogo-gelija/default.htm.
5. **Bondarenko V. L., Symonenko Yu. M.** Kriogenne tehnologii izvlecheniya redkih gazov. // Odessa: PO «Izd. center». – 2013. – 332 p.
6. **Bondarenko V. L., Lyschik A. A., Andreev A. G., Dyachenko T. V.** Kondensacionne metodi obogascheniya Ne-He smesi i opit ih vnedreniya na Nijnetagilskom metallurgicheskom kombinatе // *Technicheskie gazi.* – 2009. – № 6. – pp. 66-70.
7. **Bondarenko V. L., Grafov A. P., Kupriyanov M. U. i dr.** Optimizaciya processiv izvlecheniya izotopov ^3He iz prirodnogo geliya / *Technicheskie gazi.* – 2012. – №6. – pp. 47-53.

Отримана в редакції 06.02.2014, прийнята до друку 04.03.2014