

СТОИМОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УРАНА ИЗ МОРСКОЙ ВОДЫ СИСТЕМОЙ С АДсорбЕНТОМ В ПОЛИМЕРНОЙ ОПЛЕТКЕ

Эрих Шнайдер и Даршан Сачде

АННОТАЦИЯ

В данной статье представлена независимая оценка стоимости производства урана из морской воды в системе извлечения оплетками из адсорбента, предложенной Японским агентством по атомной энергии (JAEA). Издержки производства были определены стандартными методами оценки затрат по разработке и созданию новой продукции с использованием данных производителя, проекта завода и эксплуатационных данных. Анализ включает дисконтированные потоки денежных средств, экономию от увеличения масштабов производства, и перенос погрешностей. В базовом варианте, основанном на оценке Японского агентства по атомной энергии с поглотительной способностью свежего адсорбента 2 кг урана на тонну адсорбента и 6 циклами рециркуляции, издержки производства составили 1230 долларов США на килограмм урана с 95-процентным доверительным интервалом [1030, 1430] долларов США на килограмм урана при учете только погрешностей стоимости компонентов. Исследования чувствительности подтвердили, что определяющими факторами издержек являются поглотительная способность адсорбента, количество циклов рециркуляции и деградация поглотительной способности. Если поглотительная способность и количество циклов рециркуляции будут увеличены до 6 кг урана на тонну адсорбента и 20 циклов соответственно, без деградации и без изменения стоимости производства адсорбента, издержки производства урана уменьшатся до 299 долларов США на килограмм урана.

Дополнительные материалы к статье приведены в сетевом приложении, помещенном на сайте журнала.

Авторы статьи работают в Программе ядерной и радиационной техники Университета штата Техас в Остине, штат Техас, США.

Почтовый адрес для корреспонденции: Erich Schneider, Nuclear and Radiation Engineering Program, The University of Texas at Austin, 1 University Station, C2200, Austin, TX 78712.

Адрес электронной почты: eschneider@mail.utexas.edu

Статья получена 21 августа 2012 года и принята к публикации 23 января 2013 года.

ВВЕДЕНИЕ

Огромные ресурсы урана, содержащегося в морской воде, могут сыграть решающую роль в уменьшении неопределенности в развитии атомной энергетики. Если можно будет уменьшить издержки производства, то уран в морской воде может послужить «ограничителем» цен на уран из обычных ресурсов. Ограничивающие ресурсы доступны, по существу, в неограниченных количествах и они замещают исчерпываемые ресурсы тогда, когда увеличивающиеся средние издержки производства для ресурса дойдут до уровня «ограничителя»¹. Поэтому издержки производства урана являются важной мерой жизнеспособности технологий извлечения урана из морской воды.

Японское агентство по атомной энергии (JAEA) провело исследование производства и оценки эффективности амидоксимовых адсорбентов для извлечения урана из морской воды²; JAEA провело анализ издержек для такой системы³. Авторы в предыдущей работе рассмотрели и воспроизвели результаты JAEA, идентифицировали критические определяющие факторы издержек, и выделили пункты в производственной цепочке, требующие проведения исследований и разработок для уменьшения системных издержек или рассмотрения неопределенностей параметров эффективности⁴.

Задачи данной статьи состоят в документировании независимой оценки издержек извлечения урана из морской воды с использованием технологии JAEA, и определении целей в эффективности технологии, при достижении которых она станет эффективным ограничителем цены на уран. Поэтому потоки массы в базовом варианте будут совпадать с проектом JAEA. Тем не менее, в данной работе будут разработаны оригинальные

большой поверхностной площадью повышают эффективность процесса пересадки. Группы амидоксима служат селективным лигандом для образования комплексов урана, а гидрофильные функциональные группы улучшают контакт нити с морской водой. Модифицированные полиэтиленовые волокна наматываются вокруг центральной структуры низкой плотности (например, из полипропилена); открытая структура намотанного адсорбента максимизирует площадь контакта с морской водой, а плавучесть оплеток минимизирует конструкцию поддержки для постановки на якорь (смотрите рисунок 2). Диаграммы процесса приводятся в сетевом приложении А. Эффективность поглощения характеризуется поглощательной способностью (килограммов урана на тонну адсорбента), которая, в свою очередь, зависит от длительности погружения и температуры морской воды (подробности приведены в сетевом приложении D).

Материал с намотанным адсорбентом перевозится на площадку разворачивания на рабочих судах и впоследствии ставится на якорь на океанском дне с помощью якорных цепей, как это показано на рисунке 2. В конце периода швартовки суда поднимают адсорбирующий материал и возвращают его на берег для извлечения урана⁵. В другом варианте, не рассматриваемом в данной статье, уран будет извлекаться на море, либо с помощью оборудования для извлечения, размещенном на борту каждого рабочего судна, либо на расположенной в центре участка платформе, либо на плавучей базе.

Процесс извлечения состоит из последовательных этапов кислотного извлечения. На первом этапе для селективного извлечения щелочных и щелочноземельных металлов используется соляная кислота, а на втором этапе для извлечения урана используется азотная кислота. Такие элементы, как свинец, железо, никель, кобальт, алюминий и калий, адсорбируются в количествах, сравнимых с ураном⁶. Некоторые из этих соединений занимают места присоединения урана, так что их извлечение критично для повторного использования адсорбента. Ни один из перечисленных элементов не может рассматриваться как экономически привлекательный побочный продукт. Измерения выхода потенциально экономически важных побочных продуктов, таких, как редкие земли и драгоценные металлы, до сих пор не публиковались.

Намотанный адсорбент может быть регенерирован промывкой в щелочи после этапов кислотного извлечения и возвращен в море для повторного использования. Раствор уранилнитрата из второго этапа кислотного извлечения передается в процессы осаждения и очистки урана, идентичные тем, которые используются в стандартных процессах добычи и восстановления урана. Диаграммы процесса приводятся в сетевом приложении (часть А).

В следующем разделе предлагается обзор используемых методов оценки издержек и подробных оценок компонентов для каждого из трех основных процессов, обозначенных на рисунке 1. Затем приводится обзор методов, используемых для оценки стоимости производства урана для указанных процессов, включая введение погрешности во входные параметры стоимости и эффективности. И, наконец, будут представлены результаты оценки издержек и погрешностей.

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАТРАТ

В этом разделе рассматриваются методы, используемые для получения независимых оценок всех производственных затрат. Производственные затраты включают в себя капитальные затраты и эксплуатационные расходы (например, капитальное оборудование, затраты на рабочую силу, материалы, и т.п.). Чтобы гарантировать, что все затраты учитывались согласованным и систематическим способом, данные были организованы с помощью системы кодов счетов (COA).

Рабочая группа по экономическому моделированию (EMWG) Международного форума «Поколение IV» подготовила подробные руководящие указания по оценке расходов для предприятий ядерного топливного цикла, которые предлагают рамочную структуру для последующего анализа; в частности, эти указания предлагают систему кодов счетов (COA), которая определяет категории расходов и организационную структуру⁷. Обсуждение системы кодов счетов (COA) и структуры, используемых в настоящей работе, можно найти в сетевом приложении (часть В).

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ

Метод оценки расходов следует выбирать на основании уровня доступной информации в отношении процесса, оборудования и связанных с ними затрат. Оценка расходов в данном анализе будет соответствовать проекту японского завода и процессу (таблица 1). Поэтому, хотя процесс с намотанным адсорбентом все еще находится на ранней стадии развития, восходящая (снизу вверх) оценка возможна там, где JAEA предоставила подробную проектную информацию (например, конкретные химические потоки, размеры оборудования, требования к зданиям и земельным участкам, и т.п.). Там, где достаточные подробности недоступны, используется

нисходящая (сверху вниз) оценка. В предыдущую работу авторов включены дополнительные сведения об использованных в этом анализе методах оценки затрат⁸. Далее оценка расходов будет проводиться в трех областях процесса:

- производство адсорбента;
- постановка на якорь и развертывание;
- извлечение и очистка.

Таблица 1. Параметры базового варианта проекта.

Параметр	JAEA	Текущий анализ	Единицы
Годовое производство урана	1200	1200	тонн/год
Температура морской воды	25	25	°C
Поглотительная способность адсорбента	2	2±/0.5	кг U/т адсорбента
Продолжительность нахождения на якоре	60	60	дни
Количество циклов рециркуляции	6	6	–
Скорость деградации адсорбента	0%	5±/2.5%	% на цикл
Учетная ставка	0%	7%	Годовая ставка
Процентная ставка капитала	3%	10%	Годовая ставка
Период амортизации: здания	30	30	лет
Период амортизации: оборудование	15	15	лет
Проценты во время строительства	Нет	Да	–
Расходы на утилизацию	Нет	Да	–

¹ Ожидаемые значения поглотительной способности адсорбента с соответствующей неопределенностью. Неопределенность параметров определяется и обсуждается в тексте.

У каждой области процесса имеется своя система кодов счетов (COA) (счета 1–9). В каждой области процесса будут выполняться следующие этапы:

- 1) Разработать структурную схему блока (BFD) или структурную схему процесса (PFD).
- 2) Составить перечни оборудования и потоков для каждой области процесса.
- 3) Оценить размеры и стоимость основного оборудования по известной информации по производительности.
- 4) Использовать стоимость приобретаемого оборудования для оценки общих затрат на капитальные инвестиции (TCIC).
- 5) Оценить требования по рабочей силе на основании структурной схемы процесса (PFD) и перечня оборудования.
- 6) Определить расходы на химикаты и коммунальные услуги по сводкам потоков и преискурантам.
- 7) Заполнить систему кодов счетов (COA).

ПРОИЗВОДСТВО АДСОРБЕНТА

Производство адсорбента включает три этапа: выдавливание волокна, облучение и пересадку. Адсорбент состоит из 50 000 тонн полиэтилена высокой плотности (HDPE) с пересаженными функциональными группами амидоксима при 100-процентном уровне пересадки (DOG), определяемом как:

$$DOG(\%) = \frac{w_G - w_O}{w_O} \times 100\% \quad (1)$$

где w_G – вес полиэтилена с пересадкой групп (100 000 тонн) и w_O – вес полиэтилена без пересадки групп (50 000 тонн). Цель 100% уровня пересадки, указанная JAEA, предоставляет базис для задания размерности процесса производства адсорбента.

Рисунки А.1 и А.2 в Приложении А иллюстрируют структурную схему процесса (PFD) для производства адсорбента; в таблицах А.1 и А.2 определяются оборудование и потоки, связанные с этой структурной схемой. Крошка или гранулы из полиэтилена высокой плотности (HDPE) загружаются в винтовой экструдер (обозначенный через А в структурной схеме PFD и таблице оборудования), который однородно расплавляет полимер. Расплав полиэтилена прокачивается (В) через фильтр (С) в фильеру (D) для формования волокна. Волокна, выходящие из фильеры, охлаждаются отфильтрованным воздухом (Е), натягиваются прядильным роликом (F), и наматываются на сматывающее устройство (G) в подготовке для дальнейшей обработки.

Полиэтиленовые волокна подготавливаются для пересадки под действием излучения. Первым этапом этого процесса является облучение электронным пучком из ускорителя (I). В процессе облучения образуются площадки со свободными радикалами для последующего процесса пересадки. Облученные нити на катушках помещаются в баки реакторов с мешалками (L); в реакторы подается следующая последовательность химикатов для пересадки амидоксимовой группы на площадки со свободными радикалами на полиэтиленовой основе:

- 1) 5 процентов (по весу) поверхностно-активного вещества (лаурил-сульфата натрия) и 30 процентов (по весу) акрилонитрила в воде,
- 2) диметилформамида (DMF),
- 3) 3 процентов (по весу) гидроксилamina в водном растворе метанола (1:1).

Нити с пересаженным адсорбентом затем наматываются на центральные поплавки на оплеточной машине (N), что завершает процесс изготовления адсорбента.

Подробные сведения о размерах и стоимости индивидуального оборудования и эксплуатационные расходы производства адсорбента приведены в сетевом приложении (часть В). Сводка стоимости оборудования на участке производства адсорбента приведена в таблице 2. В таблицу включены ссылки на идентификаторы оборудования в соответствующих структурных схемах PFD сетевого приложения (часть А, рисунки А.1 и А.2). Расходы на намоточный станок взяты из работы Tamada³. Размеры оборудования и данные по реакциям также берутся из работы Tamada³, если не указано иное. Размеры резервуаров для хранения определяются из запаса на 30 суток.

Таблица 2. Таблица оборудования с ценами на поставленное оборудование, участок пересадки и намотки (доллары США 2010 года)

ID(s)	Оборудование	Тип	Кол-во	Размер	Единица	Стоимость
A	Экструдер полимера	Одновинтовой	7	250	мм	Входит в *
D	Фильера	Выдавливание из расплава	238	200	отверстий	Входит в *
G	Окончательная намотка	Ролик/моталка	–	3300	м/мин	Входит в *
N/A	Выдавливание из расплава – все оборудование*	Все	–	50 000	тонн/год	8,69 млн.
I	Электронный ускоритель	Постоянный ток	1	0,9 160 145	МэВ мА кВт	2,30 млн.
K,M,O	Конвейер	Ленточный	1	1514	м	2,25 млн.
L	Реакторы пересадки	С кожухом и мешалкой	77	4	м ³	4,49 млн.
N	Оплеточные машины	N/A	1275	N/A	N/A	11,9 млн.
N/A	Хранилище акрилонитрила	Баки (316 SS)	2	2007	м ³	1,03 млн.
N/A	Хранилище поверхностно-активного вещества	Баки (316 SS)	1	312	м ³	150 тыс.
N/A	Хранилище гидроксилamina	Баки (316 SS)	1	2024	м ³	520 тыс.
N/A	Хранилище DMF	Баки (316 SS)	3	2079	м ³	1,59 млн.
N/A	Хранилище водно-метанолового раствора	Баки (316 SS)	3	2027	м ³	1,56 млн.
Общая стоимость доставленного оборудования (= 1,1 * общую стоимость приобретенного оборудования)						38 млн.

Эксплуатационные расходы включают стоимость рабочей силы, коммунальных услуг и материалов. Подробное обсуждение эксплуатационных расходов включено в сетевое приложение (часть В); сводка результатов приведена здесь. Требования к рабочей силе и расходам на нее были оценены для всей области производства адсорбента. В структурных схемах процесса (PFD) для области производства адсорбента (рисунки А.1 и А.2) перечислены основные этапы процесса, используемые для оценки рабочей силы. Сводка требований к рабочей силе для производства адсорбента приведена в таблице 3.

Расходы на единицу и источники данных для химикатов и коммунальных услуг приведены соответственно в таблицах В.7 и В.8 приложения В. Общее годовое потребление и расходы на химикаты и коммунальные услуги приведены в таблице 4 и таблице 5. Коды счетов для области производства адсорбента можно найти в таблице С.1.

Таблица 3. Сводка годовых требований к рабочей силе и расходов на нее – участок производства адсорбента с проектной мощностью 50 000 тонн нити из полиэтилена высокого давления HDPE (в долларах США 2010 года).

	Человеко-часы	Операторы	Заработная плата оператора в год	Общие расходы
Выдавливание из расплава и облучение	103 000	53	83 тыс.	4,39 млн.
Пересадка и намотка	51 600	27	83 тыс.	2,24 млн.
Всего для производства адсорбента				6,63 млн.

Таблица 4. Сводка расходов на сырьевые материалы и годовые потребности в химикатах для участка производства адсорбента. Проектная производительность – 50 000 тонн волокна в год (в долларах США 2010 года).

Химикат	Годовое потребление	Стоимость единицы (в долларах США на тонну)	Общие расходы (млн. долларов США)
Полиэтилен высокой плотности	50 000 тонн	1470	73,4
100% гидроксилламин и соляная кислота	56 400 тонн	3080	174
100% акрилонитрил	35 400 тонн	1330	47,2
100% додецилсульфат натрия (ПАВ)	3 450 тонн	2100	7,24
Метанол	52 900 тонн	284	15
Диметилформамид	64 800 тонн	1250	80,7
Всего для производства адсорбента			397

Таблица 5. Сводка годового потребления коммунальных услуг и расходов на них для участка производства адсорбента. Проектная производительность – 50 000 тонн волокна в год (в долларах США 2010 года).

Коммунальная услуга	Годовое потребление	Стоимость единицы (в долларах США)	Общие расходы
Электричество	620 000 000 кВт·ч	0,069/кВт·ч	42,9 млн.
Вода для процесса	1 070 000 тонн	0,07/тонну	77,9 тыс.
Деионизованная вода	444 000 тонн	1,08/тонну	48 тыс.
Всего для производства адсорбента			43,4 млн.

ПОСТАНОВКА НА ЯКОРЬ И РАЗВЕРТЫВАНИЕ

Для постановки на якорь, развертывания и возврата намотанного адсорбента на выбранной прибрежной площадке потребуется оборудование для транспортировки по морю и постановки на якорь, такое, чтобы намотанный адсорбент можно было возвращать и повторно развертывать со скоростью, соответствующей целевому годовому производству урана. В этом разделе приводится сводка параметров системы постановки на якорь и развертывания, и соответствующих расходов.

Была проведена оценка схемы поля адсорбента, процессов и оборудования для возврата и развертывания, и выбора площадки, необходимая для заполнения таблицы кодов счетов. Сводка параметров проекта и значений из базового варианта японского анализа приведена в таблице 6.

Цепи для постановки на якорь (якорные цепи, скрепленные шпильками) играют ведущую роль в схеме проекта. Цепи используются как якоря намотанных адсорбентов, находящихся на плаву благодаря поплавкам, встроенным в основной стержень каждого блока адсорбента. Цепь также определяет метод и аппаратуру для возврата адсорбента с поля. Якорный брашпиль (специализированный класс которых был разработан специально для возврата скрепленных шпильками якорных цепей) необходим для вытаскивания цепи со дна океана для извлечения и замены насыщенных адсорбентов. Скорость, с которой брашпиль может извлекать цепь, определяет, как много адсорбента может вытащить каждый корабль в заданный период времени, и, в конечном счете, сколько кораблей понадобится для этой цели. И, наконец, корабли перевозят адсорбент на береговые предприятия, и из них, перемещают рабочую команду, необходимую для выполнения операций возврата, и на кораблях размещаются якорные брашпили для извлечения цепей. Корабли определяются по их грузоподъемности в тоннах дедвейта (определяющем количество адсорбента, который может перевезти каждый корабль) и мощности тормозного механизма.

Агентство JAEA разработало показанную на рисунке 2 схему поля на основании требования к цепи для постановки на якорь 100 000 тонн адсорбента. Предыдущий анализ авторов показал, что размеры цепи ограничиваются динамическими силами, действующими на цепь во время возврата (в отличие от статических сил

по время разворачивания); расчеты рабочей нагрузки на цепочки подтвердило требования JAEA к якорной цепи в 44 мм⁹.

Требования к рабочему кораблю определяются размерами поля адсорбента и скоростью, с которой каждый корабль может извлекать якорную цепь. Результаты определения размеров оборудования для постановки на якорь показаны в таблицах 7 и 8, а поддерживающие вычисления приведены в Приложении В.

Таблица 6. Параметры поля постановки адсорбента на якорь³.

Параметр	Значение	Единицы	Примечания
Размещение адсорбента	100 000	т/год	На основании производства урана 1200 тонн в год, поглотительной способности адсорбента 2 г урана на кг адсорбента, длительности цикла в 60 суток, и шестикратного повторного использования адсорбента.
Линейная плотность адсорбента	1	кг/м	
Длина оплетки	60	м	
Требуемое количество оплеток	1,67 млн.	оплетки	
Расстояние между оплетками	8	М	Для предотвращения запутывания.
Длина индивидуальных цепей	2120	М	
Длина концов цепей	100	М	Свободные концы цепей для операций.
Количество оплеток в цепи	240	Оплетки	На основании требований к расстоянию и свободным концам.
Требуемое количество цепей	6976	Цепи	Для постановки на якорь 100 000 тонн адсорбента.

Таблица 7. Требования к кораблям для постановки на якорь и к размерам.

Параметр	Значение	Единицы	Примечания
Длительность кампании	60	дней	Длительность кампании корабля и продолжительность впитывания адсорбентом принимаются равными.
Требуемое извлечение цепей за день	116	цепей/день	На основании замены всего адсорбента в течение кампании.
Скорость извлечения цепи	4	м/минуту	Предположение JAEA.
Работа корабля за день	9	часов	Предположение.
Время извлечения одной цепи	9	часов	Рассчитано (1 корабль).
Количество требуемых кораблей	116	N/A	Рассчитано.
Загружаемый вес адсорбента	107 000	тонн	Вес адсорбента + удвоенный вес известных адсорбируемых металлов.
Водоизмещение корабля	1000	тонн (дедвейт)	Рассчитано по массе адсорбента, транспортируемого одним кораблем.
Тормозная мощность корабля	861	л.с.	Рассчитано из эмпирического соотношения ¹ . Смотрите приложение В.

¹ Из Kevin Cullinane, and Mahim Khanna (ссылка 10).

Таблица 8. Таблица оборудования и стоимостей доставленного оборудования для области постановки на якорь (в долларах США 2010 года).

Оборудование	Тип	Кол-во	Размер	Единицы	Стоимость
Якорные цепи	Крепление шпильками	6976	44	мм	1,43 млрд.
Брашпиль	N/A	116	36	кВт	Учтено в кораблях
Корабли	Грузовой	116	1000 861	т (дедвейт) кВт	510 млн.
Общая стоимость доставленного оборудования (= 1,1 * общую стоимость приобретенного оборудования)					2,113 млрд.

Экономический анализ перевозок Куллиана и Ханна (смотрите Приложение В) использовался для определения требований к персоналу и топливу¹⁰; сводка результатов приведена в таблицах 9 и 10.

Был проведен предварительный анализ влияния расположения площадки для установки на якорь вдоль побережья континентальной части Соединенных Штатов на стоимость и эксплуатационные качества. Помимо расходов, связанных с приобретением пространства в открытом море для эксплуатации поля адсорбента, условия на конкретных площадках могут повлиять на характеристики адсорбента или на пригодность системы

постановки на якорь из-за температуры, глубины, или других факторов окружающей среды. Поэтому, как отмечалось в предыдущих анализах, была проведена оценка потенциального влияния стоимости аренды, глубины воды вблизи побережья, и зависимости температуры от глубины для пяти прибрежных районов Соединенных Штатов¹¹. Результаты анализа выбора площадки показали, что для различных площадок усредненная по глубине температура меняется от 17 до 25 °С, а стоимость аренды лежит в пределах от 1800 до 2200 долларов США (2010 года) за квадратный километр. Как обсуждается в сетевом приложении (часть D), температура является важным фактором для поглотительной способности адсорбента.

Таблица 9. Сводка годового потребления коммунальных услуг и расходов на них для области постановки на якорь. Проектная производительность поля адсорбента – 100 000 тонн адсорбента в год (в долларах США 2010 года).

Коммунальная услуга	Годовое потребление	Стоимость единицы (в долларах США)	Общие расходы
Нефтяное топливо № 2	12 млн. галлонов	2,12 за галлон	25,4 млн.
Всего для постановки на якорь и возврата			25,4 млн.

Таблица 10. Сводка годовых требований к рабочей силе и расходов на нее для области постановки на якорь. Проектная производительность поля адсорбента – 100 000 тонн адсорбента в год (в долларах США 2010 года).

	Общие требования флота	Накладные расходы на одного человека	Общие расходы
Капитаны кораблей	116	108 000	12,6 млн.
Матросы/рабочие	1856	58 500	109 млн.
Всего для постановки на якорь и возврата			121 млн.

И, наконец, в нескольких предыдущих исследованиях в качестве оценки для всех прочих эксплуатационных расходов (включая обслуживание, налоги и страхование, административные издержки, и т.п.)¹² использовалось от 3 до 5 процентов первоначальных капитальных расходов. Здесь использовалось номинальное значение в 4 процента, а диапазон использовался в анализе неопределенности расходов. Коды счетов для области постановки на якорь и развертывания суммируют все компоненты расходов и их можно найти в таблице С.2.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИЗ АДОРБЕНТА, ОЧИСТКА И УТИЛИЗАЦИЯ

Восстановление урана из адсорбента включает в себя два процесса: извлечение металлов из адсорбента и очистку урана для производства очищенного диураната аммония (ADU). Здесь рассматривается также обработка и утилизация использованного полимера.

Процессы извлечения из адсорбента и очистки подразделяются на три отдельных структурные схемы процесса (PFD); связанные с ними таблицы оборудования представлены в сетевом приложении А (рисунок А.3 с таблицей А.3, рисунок А.4 с таблицей А.4 и рисунок А.5 с таблицей А.5). Несколько вспомогательных процессов не отражены в потоке главного процесса (то есть, обработка рафината, отделение ила, и извлечение кислоты). Однако, эти дополнительные участки процесса включены в область действия оценки расходов. Структурная схема процесса (PFD) на рисунке А.3 для процесса извлечения из адсорбента была разработана на базе описания процесса, представленного JAEA; размеры оборудования были взяты из японской оценки расходов, но расходы на оборудование были определены независимо.

Загруженный адсорбент перемещается в первый резервуар извлечения (А); в этом резервуаре реактора с мешалкой присутствующие в адсорбенте щелочные и щелочноземельные металлы извлекаются соляной кислотой с концентрацией 0,01 моля. После начальной промывки адсорбент перемещается во второй резервуар извлечения; уран в адсорбенте извлекается азотной кислотой с концентрацией 0,1 моля. Процесс фракционного извлечения был разработан японскими исследователями для отделения урана от других составляющих, адсорбированных из морской воды¹³. Десорбированный адсорбент направляется на щелочную промывку для удаления остаточной кислоты и регенерации адсорбента перед повторным использованием в море (F).

После извлечения из адсорбента уран в форме раствора уранилнитрата подвергается процессу очистки в соответствии с практикой, принятой на обычных карьерах. А именно, раствор уранилнитрата закачивается в буферный резервуар для хранения (G), а затем в отстойник (H); в этот резервуар добавляется аммиак для осаждения урана из раствора в форме неочищенного диураната аммония (ADU), которому потребуются дополнительная очистка. Сначала диуранат аммония (ADU) направляется в концентратор (I) и на центрифугу (J) для удаления любой избыточной жидкости и примесей перед дальнейшей очисткой. И, наконец, диуранат аммония

(ADU) высушивается (L) и подготавливается к очистке.

Неочищенный диуранат аммония (ADU) повторно растворяется в концентрированной азотной кислоте в резервуаре с мешалкой (N), еще раз образуя уранилнитрат – начальный продукт в цепочке очистки. Процесс очистки аналогичен процессам рафинирования урана, используемым для руд, добытых обычным способом; в частности, процесс, используемый в данном проекте – это процесс экстракции с углеводородным разбавителем, трибутилфосфатом (ТБФ) и растворителем, азотной кислотой, основанный на проекте обычного рафинирования урана¹⁴.

Подробности расчета размеров и расходов для процесса извлечения из адсорбента и очистки рассматриваются в сетевом приложении В; сводка результатов показана в таблице 11.

Требования к рабочей силе и расходам на нее были оценены для конечной части процесса. Структурные схемы процесса (PFD) (рисунок А.3, рисунок А.4 и рисунок А.5) представляют количество основных этапов процесса, использованных для расчета рабочей силы; подробности методологии расчета представлена в приложении В. Сводка требований по рабочей силе для области извлечения из адсорбента и очистки показана в таблице 12.

Таблица 11. Таблица оборудования с ценами на доставленное оборудование, область извлечения из адсорбента и очистки (доллары США 2010 года)

ID(s)	Оборудование	Тип	Кол-во	Размер	Единица	Стоимость
A,C,E,K	Конвейер	Ленточный	1	3000	м	4,45 млн.
B,D	Резервуары извлечения	Резервуар, сооруженный в полевых условиях, с мешалкой 3 кВт	2	642	м ³	454 тыс.
N/A	Хранилище азотной кислоты	Резервуар, сооруженный в полевых условиях	3	1752	м ³	1,38 млн.
N/A	Хранилище соляной кислоты	Резервуар, сооруженный в полевых условиях	12	2467	м ³	7,38 млн.
См. А.5	Участок очистки	Разное	–	1200	т урана/год	4,52 млн.
См. А.4	Участок осаждения	Разное	–	1200	т урана/год	4,57 млн.
Общая стоимость доставленного оборудования (= 1,1 * общую стоимость приобретенного оборудования)						24,7 млн.

Таблица 12. Сводка годовых требований к рабочей силе и расходов на нее – область извлечения из адсорбента и очистки. Проектная мощность 1200 тонн урана в год (в долларах США 2010 года).

	Человеко-часы	Операторы	Заработная плата оператора в год	Общие расходы
Извлечение из адсорбента	31 600	17	83 тыс.	1,4 млн.
Очистка	101 000	52	83 тыс.	4,3
Осаждение	62 400	32	83 тыс.	2,7 млн.
Всего для извлечения из адсорбента и очистки				8,37 млн.

Данные о потреблении сырьевых материалов и коммунальных услуг были взяты из оценки процесса извлечения из адсорбента JAEA; в качестве базиса для оценки эксплуатационных расходов по очистке был взят отчет по проекту очистительного завода «Fernald»¹⁵, включающий стоимости потребления сырьевых материалов и коммунальных услуг.

Для участка осаждения подробные оценки стоимости коммунальных услуг недоступны; в качестве предварительной оценки было принято, что стоимость коммунальных услуг для участка осаждения равнялась 4 процентам от стоимости поставляемого оборудования. Это соответствует отношению стоимости коммунальных услуг к стоимости оборудования для участка очистки. Потребление сырьевых материалов (аммиака) было взято из оценки JAEA. Оценки стоимости единиц коммунальных услуг и сырьевых материалов были использованы для оценки общих расходов на сырьевые материалы (таблица 13) и на коммунальные услуги (таблица 14) для процессов конечной стадии.

Оставшиеся эксплуатационные расходы (например, на управление рабочей силой, обслуживание, запасы, и т.п.) оценивались методами, представленными в приложении В. Значения расходов приведены в части кодов счетов (СОА) для области извлечения из адсорбента и очистки в Приложении С (таблица С.3).

В анализе JAEA предполагается, что стоимость утилизации использованного адсорбента будет пренебрежимо малой. В качестве мероприятия по уменьшению объема JAEA предполагало сжигание полимера, оставляющее отходы, пригодные для дешевого закапывания мусора. Другим вариантом, который потенциально может привести к частичному возврату стоимости материала, может быть повторное использование намотанного

материала как сырья для изготовления полиэтилена высокой плотности (HDPE). Имеется значительный промышленный опыт повторной переработки и восстановления HDPE после его первичного использования; даже если предположить, что восстановленный HDPE не пригоден для использования в первоначальных изделиях, он может найти применение в строительных материалах или дорожных покрытиях¹⁶. В наилучшем случае восстановленный HDPE может быть непосредственно переработан в процессе изготовления адсорбента, устранив необходимость в приобретении свежего полиэтилена HDPE.

Таблица 13. Сводка расходов на сырьевые материалы и годовые потребности в химикатах для участка извлечения из адсорбента и очистки. Проектная производительность – 1 200 тонн урана в год (в долларах США 2010 года).

Химикат	Годовое потребление	Стоимость единицы (в долларах США на тонну)	Общие расходы (в долларах США)
67% азотная кислота	5 180 тонн	284	1,47 млн.
36% соляная кислота	383 тонны	148	56,6 тыс.
Серная кислота 66°Be	73 тонны	63	4,6 тыс.
Карбонат натрия	7 тонн	149	1,04 тыс.
Трибутилфосфат	4 тонны	6420	25,1 тыс.
Керосин	11 тонн	553	6 тыс.
Фильтрующая присадка	0,07 тонны	325	22
Оксид магния	61 тонна	598	36,5 тыс.
Аммиак	0,45 тонны	341	153
Оксид кальция (известняк)	27 тонн	107	2,9 тыс.
Всего для извлечения из адсорбента и очистки			1,61 млн.

Таблица 14. Сводка годового потребления коммунальных услуг и расходов на них для участка извлечения из адсорбента и очистки. Проектная производительность – 1 200 тонн урана в год (в долларах США 2010 года).

Коммунальная услуга	Годовое потребление	Стоимость единицы (в долларах США)	Общие расходы
Электроэнергия	2 840 000 кВт·ч	0,069/кВт·ч	196 тыс.
Вода для процесса	304 000 тонн	0,07/тонну	22 тыс.
Деионизованная вода	184 000 тонн	1,08/тонну	199 тыс.
Пар	1 630 тонн	32/тонну	52,2 тыс.
Вода для охлаждения	741 000 м ³	16,01/1000 м ³	11,9 тыс.
Очистка (все = 4% от стоимости поставленного оборудования)	N/A	N/A	188 тыс.
Всего для извлечения из адсорбента и очистки			669 тыс.

Здесь консервативно предполагается, что адсорбент должен быть утилизирован, и что факторы, уникальные для процесса возврата урана могут налагать ограничения на метод утилизации. В частности, в использованном адсорбенте может оставаться как уран, так и многочисленные другие элементы, адсорбированные во время кампаний погружения в морскую воду. Консервативный подход может трактовать использованный адсорбент как так называемые отходы 11.е(2) по классификации Ядерной регуляторной комиссии США. В Приложении В представлены подробные сведения о стоимости утилизации отходов 11.е(2), определенные по предыдущим работам, относящимся к утилизации отработавших ионно-обменных смол. Анализ привел к стоимости утилизации в 0,360 доллара США на килограмм адсорбента, которая применяется в данном анализе как твердая неизменная ставка за стоимость утрат.

СТОИМОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА УРАНА И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ: МЕТОДОЛОГИЯ

В этом разделе обсуждается методология дисконтированных денежных потоков жизненного цикла (), используемая для расчета стоимости производства урана по входным параметрам стоимости, описанных в предыдущем разделе. Обсуждение включает внедрение структурированных в кодах счетов (COA) входных данных для расчета стоимости в метод LCDCF. Кроме того, количественный расчет неопределенности до сих пор не проводился в оценке стоимости урана из морской воды. Поэтому в данном разделе также представлен краткий обзор методов распространения неопределенностей, применяемых для определения доверительных интервалов стоимости производства.

Методология дисконтированных денежных потоков жизненного цикла

Подход LCDCF используется для отслеживания денежных потоков на протяжении жизненного цикла произвольно выбранной массы в одну тонну адсорбента. Затраты и выгода (то есть производство урана) отслеживаются на протяжении времени жизни адсорбента. Поэтому рассмотренные в предыдущем разделе расходы должны быть нормированы на одну тонну адсорбента. Время (времена), в которые были понесены расходы, записываются как события в течение времени жизни адсорбента. Точно также извлечение урана из одной тонны адсорбента становится последовательностью событий в течение времени жизни адсорбента. Широко используемая методология анализа денежных потоков описана в руководящих указаниях по оценке стоимости Gen-IV EMWG¹⁷.

В дисконтированном анализе денежного потока следует выбрать время начала отсчета. В данном исследовании «нулевой момент времени» определяется как время, в которое впервые была погружена единичная масса адсорбента. Расходы на производство адсорбента были понесены до «нулевого момента». Время этого изготовления по отношению к первому погружению в морскую воду в дисконтированном анализе денежного потока важно, потому что все эксплуатационные расходы, расходы на обслуживание и на приобретение материалов для производства адсорбента были понесены до получения прибыли. В данном анализе предполагается, что расходы на производство адсорбента были понесены на 0,5 года до первоначального погружения. Более длительные времена опережения приведут к большим текущим значениям расходов на производство адсорбента.

Расходы и выгода от системы производства адсорбента распределены по времени и зависят от продолжительности повторяющихся периодов погружения и возврата. В таблице 15 приводится временная последовательность для времени жизни единичной массы адсорбента, выделяющая события, связанные с затратами и выгодой.

Таблица 15. Время жизни единичной массы адсорбента.

Время (годы)	-0,5	0	0,16	0,27
Событие (события)	Изготовление адсорбента	Первоначальное размещение	Возврат на корабль	Возврат на берег Извлечение урана 2-ое размещение
Время (годы)	***	1,33	1,43	1,59
Событие (события)		Возврат на берег Извлечение урана 6-ое размещение	Возврат на корабль	Возврат на берег Извлечение урана Утилизация

Ежегодные эксплуатационные расходы и производство урана дисконтируются для отражения временного значения денег; производство урана является заместителем потока доходов, которые могут быть ассоциированы с продажей продукции. Денежные потоки дисконтируются с использованием фактора текущей стоимости следующим образом:

$$DiscountedCashFlow = CashFlow * PVF \quad (2)$$

где PVF – фактор текущей стоимости = $(1+i)^{-n}$; i – ставка дисконтирования; базовое значение 7% за 1 год¹⁸; n – время возникновения денежного потока по отношению к нулевому моменту времени (в годах).

Капитальные затраты амортизируются по отдельной процентной ставке (например, по 10-процентной ставке на капитал в течение 15 лет для оборудования в базовом варианте). Процентная ставка на капитал и ставка дисконтирования дифференцируются для того, чтобы отразить дополнительную рисковую премию, связанную с большими первоначальными денежными затратами и неопределенным возвратом инвестиций. Амортизированные ежегодные денежные потоки отражают стоимость капитала, финансируемого заемным или акционерным капиталом, так же как и капиталовложениями во время строительства (смотрите обсуждение капиталовложений во время строительства в Приложении В).

Коды счетов предоставляют полные затраты на проект по специфическим категориям. Для того, чтобы связать ежегодные расходы из кодов счетов (COA) с одиночной тонной адсорбента в подходе LCDCF, делаются три шага:

- 1) Амортизированные ежегодные капитальные затраты пропорционально распределяются в части, которая оплачивается единицей массы адсорбента. Ежегодные эксплуатационные расходы пропорционально распределяются в соответствии с производительностью или пропускной способностью, поглощенной этой

- единицей массы. Весь амортизированный капитал и дисконтированные эксплуатационные расходы, понесенные в течение времени жизни адсорбента, прибавляются к сумме расходов в долларах за время жизни.
- 2) Производство урана в течение времени жизни единицы массы дисконтируется и суммируется. Производство урана проявляется в конце каждого этапа очистки; в референтном варианте единица массы адсорбента производит уран в шести конкретных моментах времени. Естественно, следует дисконтировать производство урана так, чтобы это отражало дисконтирование потока доходов, который будет ассоциироваться с продажей урана. Этот этап связывает дисконтированное производство урана в течение времени жизни адсорбента в килограммах урана.
 - 3) Расходы по жизненному циклу из пункта 1) делятся на дисконтированное производство урана из 2) для получения стоимости единицы производства урана в долларах на килограмм урана.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Разработанная до сих пор методология для оценки расходов использует детерминистский подход; однако, многие эвристические правила, предположения о масштабировании, и входные данные процесса, используемые для разработки оценок расходов, остаются неопределенными. Многие данные сопровождаются диапазоном правдоподобных значений, или принимают форму средних, или ожидаемых значений, определяемых из лежащих в основе наборов данных. Эти неопределенности во входных переменных должны распространяться сквозь анализ, чтобы изображать неопределенность, связанную с расходами на производство урана. Оценки неопределенности были разработаны для всех входных параметров расходов и для двух входных значений эксплуатационных параметров (поглотительной способности адсорбента и скорости деградации).

В таблице В.10 в Приложении В приведена сводка всех соответствующих входных параметров и средних значений и стандартного отклонения каждого распределения. Предполагалось, что все параметры распределены по нормальному закону. Кроме того, в последнем столбце таблицы были приведены характеристики источников данных для каждого параметра (набор данных, диапазон, или точечная оценка); это определяло метод, использованный для оценки неопределенности. Для набора данных стандартное отклонение данных непосредственно использовалось в качестве меры неопределенности. Для параметров, представленных как диапазон, середина диапазона трактовалась как среднее значение, а конечные точки диапазона представляли два стандартных отклонения от среднего значения (95-процентный доверительный интервал). В случае точечной оценки границы двух стандартных отклонений определялись как ± 30 процентов от точечной оценки; это согласуется с неопределенностью, ожидаемой в инженерных оценках по порядку величины (смотрите таблицу В.4 в Приложении В). Для распространения неопределенности использовался подход статистических оценок по методу Монте-Карло.

Неопределенности входных значений эксплуатационных параметров (два последних ряда в таблице В.10) отражают вариации в действительных характеристиках поля. В случае поглотительной способности адсорбента для приближения неопределенности, связанной с эксплуатационными качествами технологии, использовался статистический анализ данных полевых испытаний JAЕА¹⁹. Анализ привел к нормально распределенной оценке поглотительной способности адсорбента, которая показала, что при температуре воды 25 °С и погружении на 60 дней среднее значение равно 2,0 кг урана на тонну адсорбента, и стандартному отклонению 0,5 кг урана на тонну адсорбента (Приложение D). Для деградации адсорбента японские данные представили точечную оценку из одиночной наблюдавшейся точки данных с приблизительно 20 процентами потери поглотительной способности адсорбента после 5 циклов повторного использования (потеря 5 процентов после 1 цикла)²⁰. Неопределенность деградации не может быть количественно определена по одной точке данных; вместо этого она была принята равной $\pm 2,5$ процентов на повторный цикл для того, чтобы 95-процентные доверительные интервалы деградации включали возможность отсутствия деградации (предположение в предыдущем анализе JAЕА).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Базовый вариант

Базовый вариант для текущего анализа (таблица 1) представляет эксплуатационные качества японской системы, наблюдавшиеся в полевых испытаниях²¹. Финансовые и эксплуатационные параметры соответствуют японскому источнику данных, если только в таблице 1 не указано иное.

Специфика, представляющая интерес в период строительства, рассматривается в Приложении В. В таблице 16 представлена сводка суммарных капитальных инвестиций и ежегодные эксплуатационных расходов

для базового варианта. В Приложении В приведены расчеты, требуемые для определения суммарных расходов в таблице 16 из расходов на компоненты, представленные в разделе оценки входных параметров расходов; в таблицах кодов СОА в Приложении С приводятся подробные расходы на компоненты для каждой категории. Как это описано в приложениях, представленные в таблице единичные компоненты расходов на производство урана (в долларах США на килограмм урана) включают амортизацию и временное значение монетарных эффектов, так же, как и деградацию поглотительной способности адсорбента.

Таблица 16. Общие расходы на капитальные инвестиции и сводка эксплуатационных расходов для базового варианта (доллары США 2010 года).

	Расходы на капитальные инвестиции ¹		Ежегодные эксплуатационные расходы	
	Всего (млн. USD)	Вклад в цену (USD/кг U)	Всего (млн. USD)	Вклад в цену (USD/кг U)
Производство адсорбента	187	23,60	512	531,00
Постановка на якорь и возврат	2350	309,00	257	247,00
Извлечение из адсорбента и очистка	122	15,40	25,7	24,20
Проценты во время строительства	474	50,30		
Затраты на утилизацию адсорбента ²			36	32,40
ИТОГО³	3133	399,00	831	834,00

¹ Расходы на капитальные инвестиции для каждого участка процесса оценивались с использованием методов, намеченных в Приложении В, и с применением расходов на оборудование, представленных в этой работе в качестве базиса для оценки.

² Затраты на утилизацию адсорбента – это плата за услуги по утилизации, возникающие тогда, когда адсорбент достигает конца своего жизненного цикла.

³ Для определения расходов на производство единицы продукции из приведенных в этой таблице общих капитальных и ежегодных эксплуатационных расходов, метод денежных потоков на протяжении жизненного цикла описывает обсуждение того, как методология денежного потока должна быть применена к совокупным расходам в таблице 16. Эта методология примет во внимание временную стоимость денег (для понесенных расходов и произведенного урана) и деградацию адсорбента со временем.

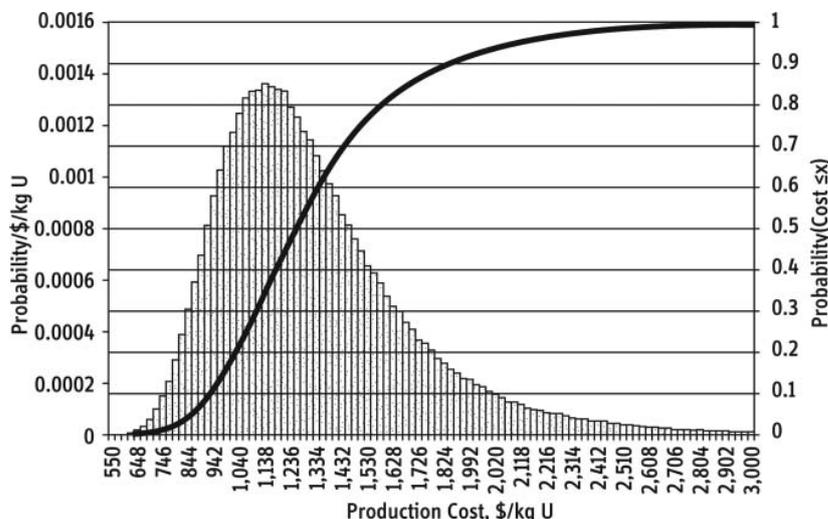


Рисунок 3. Гистограмма базового варианта оценки расходов; включены неопределенности расходов и эксплуатационных характеристик. На горизонтальной оси показаны расходы на производство в долларах США на килограмм урана. На левой вертикальной оси показана относительная вероятность того, что «история» события Монте Карло попадает в каждый интервал расходов на производство урана. На правой вертикальной оси показана доля историй с расходами на производство урана, попадающих ниже заданного уровня.

Результаты оценки стоимости производства урана в базовом варианте показаны на рисунке 3. Оценка включает неопределенности в расходах, реальных эксплуатационных характеристик, и продолжительности; она была получена анализом по методу Монте Карло, где расходы и эксплуатационные характеристики выбирались из независимых нормальных распределений, как это представлено в разделе по методологии расчета расходов и неопределенностей. Высота столбцов гистограммы (отсчитываемых на левой вертикальной оси)

показывает относительную вероятность того, что «история» события Монте Карло попадает в каждый интервал расходов на производство урана (показанный на горизонтальной оси). Сплошная линия (считываемая относительно правой вертикальной оси) показывает долю историй с расходами на производство урана, попадающих ниже заданного уровня.

Если все параметры расходов и эксплуатационных характеристик примут свои ожидаемые значения, то номинальная стоимость производства урана будет равна 1230 долларов США на килограмм урана; однако, неопределенность, связанная с этим результатом, будет значительной. Если определить 95-процентный доверительный интервал как диапазон расходов, в который попадают 95 процентов историй, то такой доверительный интервал для базового варианта будет равен [806, 2430] долларов США на килограмм урана; ширина этого интервала в основном определяется неопределенностями в поглотительной способности и скорости деградации.

Если эксплуатационные характеристики современной технологии адсорбента могут быть определены более точно, так что можно будет сказать, что поглотительная способность определено равна 2 кг урана на тонну адсорбента, то тогда 95-процентный доверительный интервал сузится до [997, 1500] долларов США на килограмм урана. Если скорость деградации при повторном использовании будет равна 5 процентам при нулевой неопределенности, то останутся только неопределенности расходов, и интервал сузится еще больше, до [1040, 1440] долларов США на килограмм урана.

На рисунке 4 показана диаграмма дисконтированного потока денежных средств для базового варианта. Доходы, связанные с продажей урана, показаны как положительные величины; расходы детализированы по категориям и по времени, в которое они были понесены, по отношению к времени первого погружения адсорбента. Уменьшающийся с каждым повторным циклом поток доходов отражает как влияние деградации поглотительной способности, так и зависимость стоимости денежных средств от времени, проявляющуюся в 7-процентной дисконтной ставке. Диаграмма подчеркивает также влияние основного фактора возникновения затрат, производства адсорбента, на которое приходится основная доля затрат до начала эксплуатации.

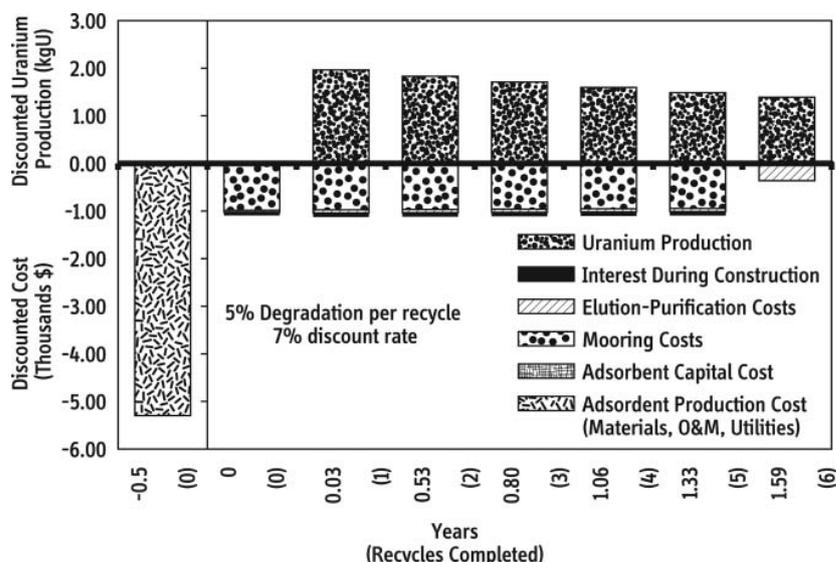


Рисунок 4. Диаграмма дисконтированного потока денежных средств во время жизненного цикла для анализа базового варианта с 6 циклами повторного использования. На горизонтальной оси отложено время в годах (в скобках показано количество законченных циклов). В верхней (положительной) части вертикальной оси показано дисконтированное производство урана, в нижней (отрицательной) части вертикальной оси – дисконтированные расходы. В левой части рисунка показаны параметры деградации за один цикл (5%) и дисконтной ставки (7%). В правой части рисунка перечислены названия категорий (сверху вниз): 1 – производство урана; 2 – проценты во время строительства; 3 – расходы на извлечение из адсорбента и очистку; 4 – расходы на постановку на якорь; 5 – капитальные затраты на адсорбент; 6 – расходы на производства адсорбента (материалы, коммунальные услуги и т.п.).

На рисунке 5 показаны компоненты расходов на производства урана для условий базового варианта. Затраты на адсорбент, в основном приходящиеся на потребление химикатов для пересадки, составляют значительную часть расходов на проект, и поэтому их сокращение представляет важную область разработок для

волокон адсорбента с амидоксимом²². Второй важной областью для потенциального сокращения расходов, на которую приходится до 45 процентов расходов на производство урана, являются затраты на постановку на якорь. Расходы на компоненты будут более подробно рассмотрены в последующем анализе чувствительности.

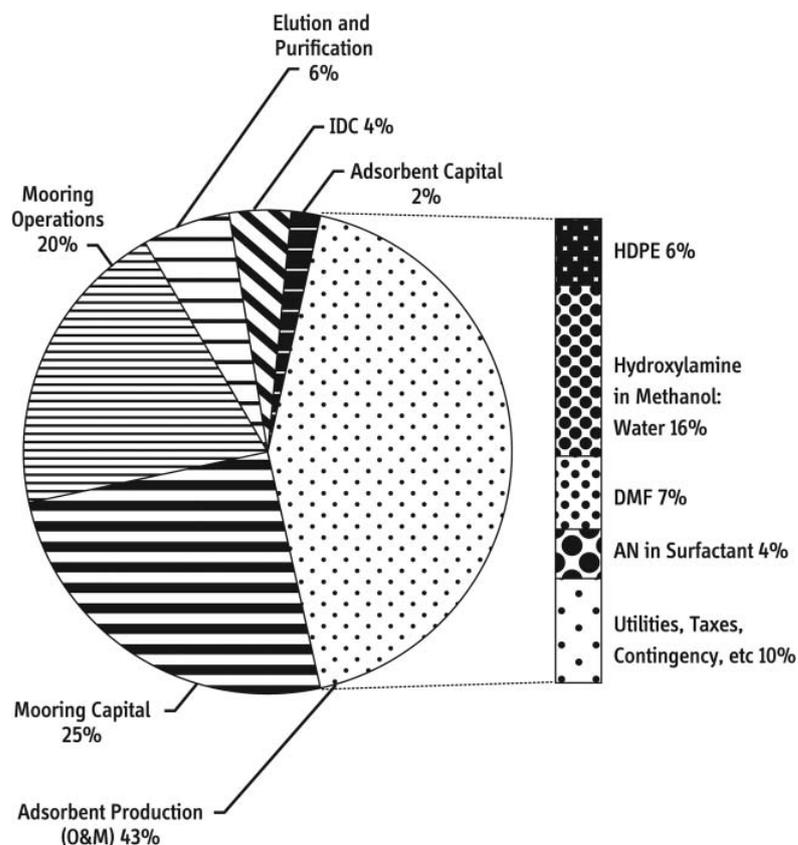


Рисунок 5. Расходы на производство урана по основным категориям расходов с особым вниманием к производству адсорбента. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – извлечение из адсорбента и очистка (6%); 2 – проценты в период строительства (4%); 3 – капитальные затраты на адсорбент (2%); 4 – операции постановки на якорь (20%); 5 – полиэтилен высокой плотности (6%); 6 – гидроксилламин в растворе метанола в воде (16%); 7 – диметилформаид (7%); 8 – акрилонитрил в поверхностно-активном веществе (4%); 9 – коммунальные услуги, налоги, непредвиденные обстоятельства, и т.п. (10%); 10 – капитальные затраты на постановку на якорь (25%); 11 – производство адсорбента (операции и обслуживание) (43%).

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

В таблице 17 изменяются два основных фактора возникновения расходов производстве урана, поглощительная способность и количество циклов погружения. Все прочие входные параметры не отличаются от тех, которые определены в таблице 1. Определенный ранее базовый вариант представлен в первой строке таблицы. В таблице 17 увеличение поглощительной способности накладывается без изменения длительности цикла погружения в 60 суток. Поэтому они отражают гипотетические достижения в подразумеваемой технологии адсорбента. Следует ожидать, что такие достижения повлияют на диаграммы потоков процесса и на связанные с ними расходы. Поэтому результаты можно будет интерпретировать как отражающие стоимость производства только тогда, когда изменения, требующиеся для достижения большей поглощительной способности, будут оказывать минимальное влияние на входные параметры расходов. Изменения длительности периода погружения, которые изменяют поглощительную способность базового адсорбента от номинальных 2 килограммов урана на тонну адсорбента, наблюдаемую при длительности периода погружения в 60 дней, рассматриваются отдельно.

Для каждого случая сообщается ожидаемое значение расходов на производство вместе с 95-процентными доверительными интервалами. Первый из этих доверительных интервалов отражает общую неопределенность при изменении, если изменяются все ее составляющие (поглощительная способность, деградация, входные

параметры расходов). Для облегчения понимания вклада каждого компонента неопределенности в трех последних столбцах приводятся 95-процентные доверительные интервалы, в которых допускается изменение только лишь одного компонента неопределенности.

Таблица 17. Сводка результатов оценок стоимости производства для базового варианта и для альтернативных вариантов, включая численные параметры неопределенности (в долларах США 2010 года).

Поглотительная способность ¹	Число повторных циклов	Ожидаемое значение расходов ²	95% доверительные интервалы ²			
			Все компоненты	Поглотит. способность ³	Число циклов ⁴	Расходы ⁵
2	6	1230	2430	2370	1290	1430
			806	853	1200	1030
2	18	1180	2440	2220	1470	1400
			681	820	1000	956
4	6	659	1240	1220	691	765
			430	451	644	553
4	18	642	1280	1180	803	761
			371	441	543	523
6	6	450	848	819	477	522
			303	327	439	378
6	18	440	886	818	553	523
			262	329	373	358
20	1	408	759	741	N/A	477
			275	290	N/A	339

¹ Поглощительная способность измеряется в килограммах урана на тонну адсорбента.

² Ожидаемое значение расходов измеряется в долларах США на килограмм урана.

³ Поглощительная способность относится к неопределенности в эксплуатационных характеристиках адсорбента; сморите обсуждение в распространении неопределенностей и в Приложении В.

⁴ Скорости деградации характеризовались только точечными оценками. Предполагалось нормальное распределение вокруг базовой величины в 5 процентов деградации на один цикл (стандартное отклонение в 2,5 процента деградации за цикл).

⁵ Неопределенность в расходах включала изменение цен на оборудование, химикаты; методы оценки обсуждаются вместе с результатами.

В таблицу включены несколько альтернативных вариантов. JAEA предлагало 4 кг урана на тонну адсорбента как осуществимую поглощительную способность и рассматривало 6 кг урана на тонну адсорбента как оптимистический вариант; 18 повторных циклов также считалось оптимистической оценкой²³. Отметим, что когда деградация поглощительной способности принимается в расчет на текущем экспериментально подтвержденном уровне, выигрыш в расходах, связанный с увеличением количества повторных циклов с 6 до 18, незначителен. Неограниченное количество повторных циклов оптимально только в предельном отсутствии деградации поглощительной способности при повторном использовании. В дополнение, последний сценарий в таблице представляет альтернативную проектную цель: материал адсорбента с высокой поглощительной способностью при однократном использовании.

Как и ожидалось, значимость компонента скорости деградации в неопределенности увеличивается по мере возрастания количества повторных циклов. Многим входным параметрам расходов присваивается стандартное отклонение в 30 процентов (при отсутствии данных для статистического расчета неопределенности). Другим параметрам придаются значения, отображающие историческую переменность. Тем не менее, неопределенности входных параметров расходов при распространении дают вклад в неопределенность стоимости производства урана, значительно меньший 30 процентов, поскольку все неопределенности считаются некоррелированными и их выборки производятся независимо. В противном (и нереалистичном) экстремальном случае, когда все неопределенности расходов считаются идеально коррелированными, неопределенность входных параметров расходов будет существенно возрастать.

Изменения других проектных параметров системы представлены в таблице 18. Все записи в таблице отражают изменения единственного параметра от значений базового варианта, приведенных в таблице 1, или в других местах. Для каждого изменения проценты показывают изменение стоимости производства урана во отношении к величине стоимости базового варианта, равной 1230 долларов США за килограмм урана.

Если оба финансовых параметра будут возвращены к значениям, использованным в исследовании JAEA (то есть нулевая дисконтная ставка и трехпроцентный ссудный процент на капитал), то стоимость производства урана понизится на 18 процентов до 1013 долларов США на килограмм урана, что близко к оценке стоимости JAEA, равной 995 долларов США на килограмм урана.

В анализе возмущения от изменения температуры морской воды используется кинетическая модель, представленная в Приложении D. Результаты анализа чувствительности показывают, что эксплуатация при темпе-

ратуре около 15 °С может никогда не стать привлекательной. Отметим, что экспериментальные данные, используемые в кинетической модели, ограничены, и дальнейшие исследования кинетики адсорбции продолжаются в Ок-Риджской национальной лаборатории.

Таблица 18. Сводка результатов анализа чувствительности к изменению параметров.

Переменная	Нижняя точка	Изменение в процентах	Базовые значения ¹	Изменение в процентах	Высшая точка
Дисконтная ставка (%)	0	-5,9	7	6,8	15
Ссудный процент (%)	3	-13	10	10	15
Количество циклов	18	-4,4	6	33	3
Температура морской воды (°С)	30	-10	25	42	15
Потеря эффективности адсорбента (% за цикл)	0	-12	5	13	10
Поглотит. способность (г U/kg адсорбента)	6	-63	2	93	1
Годовое потребление гидроксилamina (тыс. т)	28	-8,1	56	15	110
Годовое потребление акрилонитрила (тыс. т)	17	-2,3	35	4,3	70
Потребление диметилформамида (тыс. т)	32	-3,8	65	7,5	130
Размер погружаемой цепочки (мм)	38	-3,4	44	5,6	50
Ежегодное производство урана (т)	4800	-3,5	1200	22	300

¹ Условия базового варианта включают поглотительную способность в 2 кг урана на тонну адсорбента, 6 повторных циклов, деградацию в 5% за цикл. Все проценты являются отклонениями от ожидаемых расходов на производство урана в условиях базового варианта, то есть 1230 долларов США на килограмм урана.

Самым большим компонентом стоимости для базового варианта являются химикаты, используемые в процессе пересадки. Если их ежегодное потребление можно будет сократить до половины от их уровней в базовом варианте, то стоимость производства урана может быть уменьшена на 14 процентов (более 170 долларов США за килограмм).

Экономия от увеличения масштаба оказывает минимальное влияние на стоимость производства при большой годовой производительности: увеличение годового производства урана на поле адсорбента с 1200 тонн урана в год до 4800 тонн урана в год уменьшит расходы менее, чем на 4 процента.

Многие из основных компонентов расходов, например, погружаемые цепочки, корабли возврата и химикаты, не получают выгоды от экономии от увеличения масштаба. Однако, текущая область действия анализа не включает влияния масштаба в процессах химического производства исходных материалов.

Рисунок 6 был построен с помощью статистической модели временной и температурной зависимости поглотительной способности, представленной в сетевом приложении (часть D) для оценки корреляции между длительностью погружения, температурой воды и стоимостью производства урана. Как и раньше, все условия, кроме этих (и уровня адсорбции в килограммах урана на тонну адсорбента), были взяты в предположении равенства их значениям в базовом варианте. Поскольку скорость адсорбции уменьшается по мере увеличения погружения, преимущество погружений с большей длительностью (увеличение выхода урана за одну операцию развертывания и возврата) будет компенсироваться сопутствующим увеличением общего размера поля для достижения желаемого ежегодного производства урана. Кроме того, уменьшенная текущая стоимость задержанного и растянутого потока доходов, связанных с каждой единицей адсорбента, также будет увеличивать расходы на производство урана. Очевидно, что с учетом текущего понимания кинетики адсорбента 60 дней остаются обоснованной целью для продолжительности кампаний погружения.

Оптимальное количество повторных циклов в присутствии деградации поглотительной способности далее рассматривалось на рисунке 7. Этот рисунок иллюстрирует также сильную зависимость расходов на производство урана от поглотительной способности свежего адсорбента. При деградации в пять процентов оптимальное количество повторных циклов должно быть близко к 11 на всех уровнях поглотительной способности, и соответствующее ему минимизированное количество стоимости урана лежит в пределах от 1120 долларов США за килограмм урана при 2 кг урана на тонну адсорбента до 340 долларов США за килограмм урана при 8 кг урана на тонну адсорбента.

И, наконец, на рисунках 8a–d показаны вклады в стоимость при изменении количества повторных циклов и скорости деградации. На рисунке 8a сравниваются расходы на производство урана при разных степенях деградации (0%, 5% и 10%) от количества повторных циклов. На рисунках 8b–d каждая из этих кривых разбивается на ее компоненты. Во всех случаях при малом количестве повторных циклов доминируют расходы на производство адсорбента, а при большом количестве повторных циклов доминируют эксплуатационные расходы на постановку на якорь. Хотя эти эксплуатационные расходы сами по себе не меняются от одного цикла до следующего, но, если поглотительная способность адсорбента деградирует, то их вклад в расходы на производство урана растет из-за того, что эти фиксированные расходы на цикл будут относиться к уменьшающимся доходам от меньшего количества урана, извлекаемого при каждом проходе.

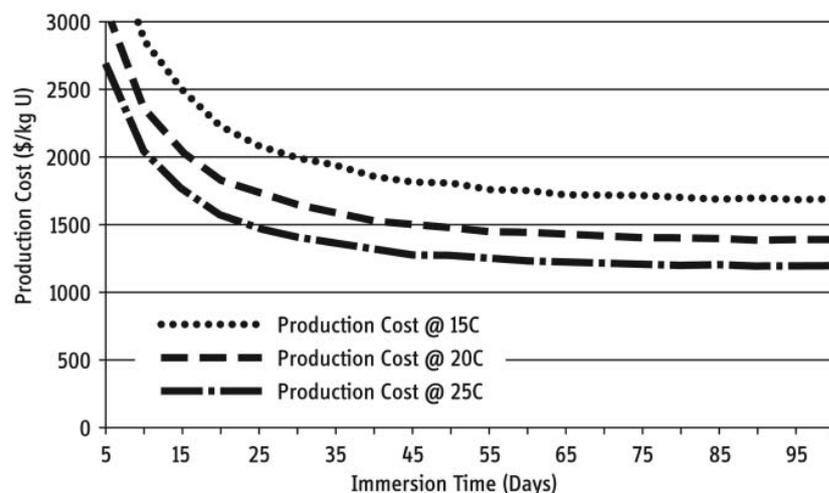


Рисунок 6. Затраты на производство (по вертикальной оси, в долларах США за килограмм урана) в зависимости от длительности погружения (по горизонтальной оси, в сутках) и температуры морской воды (пунктирная линия – 15 °С; штриховая линия – 20 °С; штрих-пунктирная линия – 25 °С).

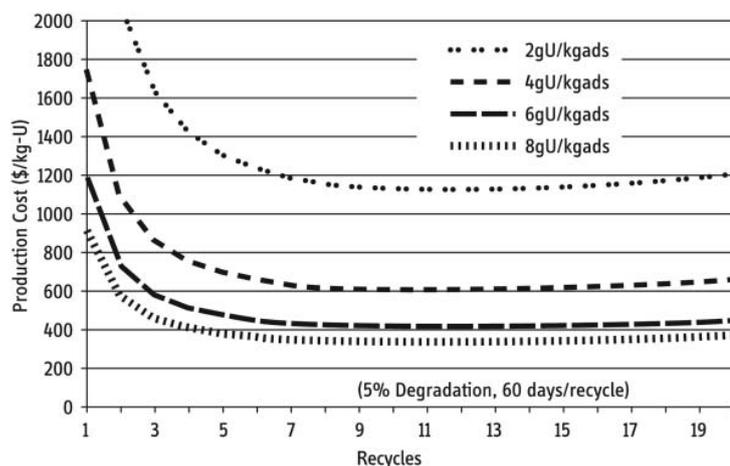


Рисунок 7. Затраты на производство (по вертикальной оси, в долларах США за килограмм урана) при различных количествах повторных циклов (по горизонтальной оси) и поглотительной способности адсорбента (от 2 до 8 граммов урана на килограмм адсорбента); остальные параметры – как в базовом варианте.

Анализ чувствительности подтверждает важность количественных оценок эксплуатационных характеристик адсорбента и длительности погружения; эти параметры в конечном счете определяют ключевые факторы расходов, такие, как потребление химикатов, и непосредственно влияют на оптимизацию других участков процесса (то есть, постановки на якорь и извлечения из адсорбента).

ВЫВОДЫ

Независимая оценка стоимости на уровне компонентов волоконного амидоксимого адсорбента в этой статье предназначена для направления будущих исследований и решений по инвестициям в отношении технологии экстракции урана из морской воды. В этом отношении могут быть сделаны некоторые ключевые выводы.

Используя те же самые исходные условия по поглотительной способности и количеству повторных циклов, что и JAEA (2 кг урана на тонну адсорбента) в качестве базового варианта, данное исследование прогнозирует, что стоимость производства урана будет равна 1230 долларов США на килограмм урана. Поэтому, несмотря на некоторые различия в предположениях эксплуатационных характеристик от базового варианта JAEA и независимое определение входных параметров стоимости, этот результат в целом подтверждает порядок величины японской оценки в 995 долларов США на килограмм урана²⁴.

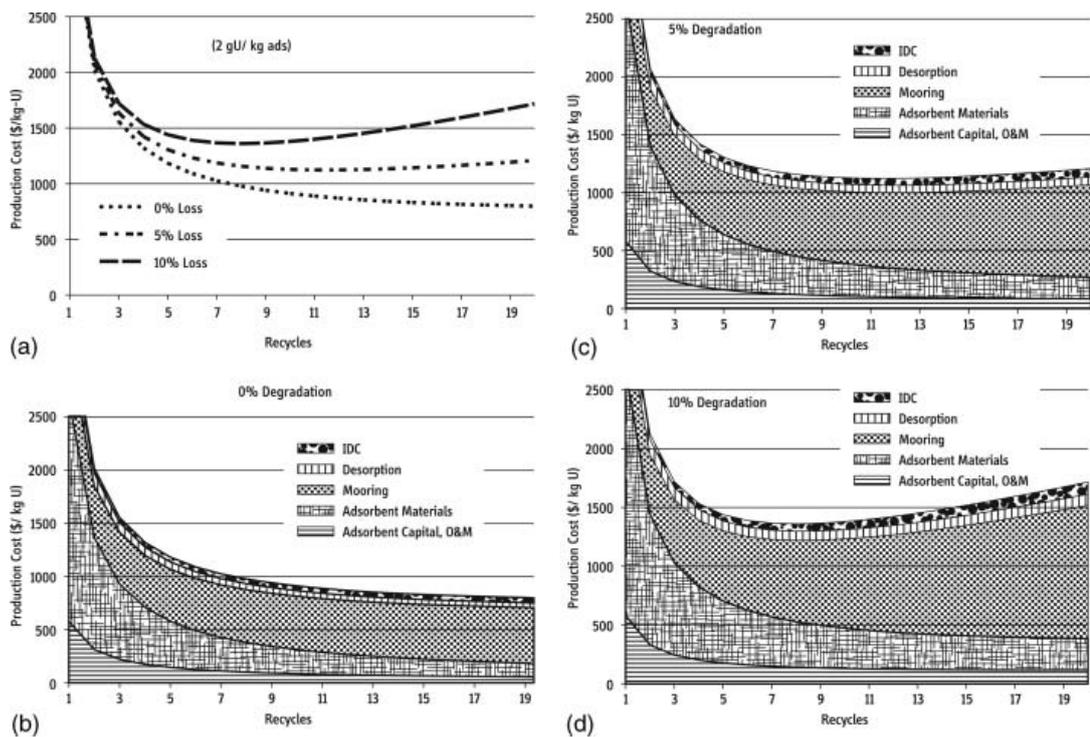


Рисунок 8. Оптимальное количество повторных циклов адсорбента при изменяющихся скоростях деградации. На рисунке 8а сравниваются расходы на производство урана (по вертикальной оси, в долларах США за килограмм урана) при разных степенях деградации (0% – пунктирная линия, 5% – штрих-пунктирная линия и 10% – штриховая линия) от количества повторных циклов (по горизонтальной оси). На рисунках 8b-d каждая из этих кривых разбивается на ее компоненты (сверху вниз): проценты в период строительства; десорбция; постройка на якорь; материалы адсорбента; адсорбент (капитальные затраты, операции и обслуживание).

Необходимы исследования и разработки для уменьшения неопределенности в стоимости производства урана. Как отмечалось ранее, когда включается неопределенность и в стоимости, и в эксплуатационных характеристиках, 95-процентный доверительный интервал в базовом варианте (поглотительная способность 2 кг урана на тонну адсорбента, 6 повторных циклов) будет равен [806, 2430] долларов США на килограмм урана; когда исключается неопределенность в эксплуатационных характеристиках и рассматривается только неопределенность в расходах, то 95-процентный доверительный интервал сужается до [1030, 1430] долларов США на килограмм урана. В то время как неопределенности в расходах включают многие факторы, не подчиняющиеся контролю инвестора (например, изменчивость цен на химикаты, заработная плата, и т.п.), неопределенность в эксплуатационных характеристиках может быть количественно выражена и сокращена. В настоящей работе доступны лишь ограниченные данные полевых испытаний, относящиеся к эксплуатационным характеристикам адсорбента (поглотительная способность и деградация), так что определяющая роль неопределенности эксплуатационных характеристик как компонента общей неопределенности непосредственно связана с недостатком данных. Поэтому начальной задачей разработки технологии должно стать расширение базы знаний эксплуатационных характеристик с дополнительными полевыми испытаниями. Уменьшение неопределенности имеет экономическое значение, связанное с уменьшением риска в будущих инвестициях и решениях по финансированию.

В анализе также выделены ключевые факторы, определяющие стоимость системы волоконного адсорбента. Поглотительная способность адсорбента и деградация при повторном использовании – это основные показатели эксплуатационных характеристик, влияющие на стоимость производства; преобладающими компонентами стоимости являются материал адсорбента и эксплуатационные и капитальные затраты на постройку на якорь.

Параметры эксплуатационных характеристик, которые представляют собой основную цель исследований и разработок, не должны оптимизироваться по отдельности; напротив, оптимизация должна быть результатом рассмотрения всех соответствующих проектных параметров системы и расходов.

В этой работе при рассмотрении полной стоимости системы были просчитаны два широких проектных

направления. Один подход был основан на сценарии многократного использования или многократной рециркуляции адсорбента. Этот сценарий покрывает начальные инвестиции в производство адсорбента повторным размещением адсорбента. Однако, повторное использование адсорбента ограничивается повторением затрат на постановку на якорь и возможной деградацией выхода урана с течением времени. Как показано, эти ограничения приводят к оптимальному для минимизации расходов на производство урана количеству повторных циклов. При отсутствии деградации увеличение количества повторных циклов асимптотически понижает затраты на производство до минимальной величины. Эти минимальная стоимость определяется компонентом поставки на якорь.

В статье представлены цели эксплуатационных характеристик для обеих маршрутов оптимизации для достижения аналогично агрессивного уменьшения стоимости. В альтернативном проектном маршруте может быть использован материал однократного использования с высокой поглотительной способностью. В этом случае первоначальные затраты на производство должны быть скомпенсированы высокой поглотительной способностью (то есть, высоким возвратом урана). В предположении неизменных расходов на производство адсорбента и поставки на якорь ожидаемая стоимость производства при поглотительной способности в 20 кг урана на тонну адсорбента будет равна 408 долларов США на килограмм урана по сравнению с 440 долларов США на килограмм урана для адсорбента с поглотительной способностью 6 кг урана на тонну адсорбента с 18 повторными циклами и 5% деградацией на повторный цикл.

Для реализации любого из сценариев разработки адсорбента могут потребоваться новые поглощающие материалы и производственные процессы. Стоимость любого нового поглощающего материала должна быть сравнима с рассчитанной в данной работе базовой стоимостью производства единицы адсорбента с амидоксимовым волокном, равной 5,36 доллара США на килограмм адсорбента. Расходы на производство адсорбента являются важным фактором в окончательной стоимости производства урана, и новые материалы с непомерно высокой стоимостью производства адсорбента вряд ли будут конкурентоспособными с технологией на базе амидоксимового полимера.

Возможности для оптимизации имеются и у расходов на постановку на якорь. Такие альтернативы, как извлечение из адсорбента на море (например, на борту корабля) исключают необходимость перемещения адсорбента во время операции на берег и с берега, уменьшают размеры возвращающего корабля, минимизируя хранение на борту, и предотвращают задержки в извлечении урана при возврате корабля на берег после кампании. Кроме того, выбор площадки для поставки на якорь может повлиять на эксплуатационные характеристики адсорбента (из-за температуры океана на конкретных площадках), а также на расходы по извлечению (расстояния до берега, глубины размещения, и т.п.).

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. P. S. Dasgupta, and G. M. Heal, *Economic Theory and Exhaustible Resources*, (Cambridge: Cambridge University Press, 1979).
2. Sugo, Takanobu, et al., "Recovery System for Uranium from Seawater with Fibrous Adsorbent and Its Preliminary Cost Estimation," *Journal of the Atomic Energy Society of Japan*, 2001: 1010–1016.
3. Tamada, Masao, Noriaki Seko, Noburu Kasai, and Takao Shimizu, "Cost Estimation of Uranium Recovery from Seawater with System of Braid Type Adsorbent," *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, 2006: 358–363.
4. Schneider, Erich A., and Darshan J. Sachde, "Review of JAEA Cost Analysis of Braid Adsorbent System for Recovery of Uranium from Seawater," Austin: The University of Texas at Austin; United States Department of Energy, 2011.
5. Два механизма могут ограничивать перенос урана из морской воды в адсорбент. Диффузия анионов урана в полимер через его пористую сеть делает доступными дополнительные площадки на поверхности и позволяет поглощать больше урана. Химически пересаженные на полимер гидрофильные функциональные группы помогают этой диффузии между частицами. Второй потенциальный ограничивающий механизм – это перенос массы из жидкой фазы в сам адсорбент. Если адсорбция окончательно ограничивается переносом массы урана из основной массы морской воды, то можно будет обоснованно ожидать, что интенсивность адсорбции будет показывать сильную корреляцию с локальной скоростью воды. Быстро протекающая вода увеличит локальный коэффициент переноса массы и будет поддерживать локальный градиент концентрации урана между объемом воды и поверхностной пленкой. Смотрите J. Kim, C. Tsouris, R.T. Mayes, Y. Oyola, T. Saito et al. "Recovery of Uranium from Seawater: A Review of Current Status and Future Research Needs," *Separation Science and Technology* 48 (2013): 3, 367–387. Измерения, проведенные для намотанных адсорбентов с контролируемым потоком морской воды, показывают, что диффузия является

- ограничивающим механизмом. В этих экспериментах не наблюдалось никакой корреляции между потоком жидкости и адсорбцией урана при скоростях потока выше 0,3 см/сек. Безразмерное число массового переноса Био, Bi , измеряет относительную силу диффузного и пленочного механизмов переноса массы. Для цилиндрических волокон перенос массы считается ограничивающим, если Bi меньше единицы, и диффузия будет ограничивающей, если Bi больше 200. Согласно измерениям, эмпирическая оценка числа Bi по порядку величины составляет 10^5 – 10^6 . С. Tsouris, J. Kim, Y. Oyola, R. Mayes, C. Janke, and S. Dai, "Laboratory and Field Testing of Uranium Uptake from Seawater: Progress Report on First Year's Experiments," FCRD-RES-2012-00175, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2012. Поэтому, даже если эффекты торможения, связанные с большим полем адсорбента, могут понизить скорость морской воды внутри поля, это не повлияет на эффективность извлечения в поле.
6. Tamada, Masao, Noriaki Seko, Noburu Kasai, and Takao Shimizu (ссылка 3).
 7. EMWG-GIF, "Cost Estimating Guidelines for Generation IV Nuclear Energy Systems," The Economic Modeling Working Group of the Generation IV International Forum, OECD, 2007.
 8. Erich Schneider and Darshan Sachde, "Cost and Uncertainty Analysis of an Adsorbent Braid System for Uranium Recovery from Seawater," Technical Report, DOE sub-contract 00114954, Austin: The University of Texas at Austin; United States Department of Energy, 2011.
 9. Erich Schneider, and Darshan Sachde, "Cost and Uncertainty Analysis of an Adsorbent Braid System for Uranium Recovery from Seawater." (ссылка 8)
 10. Kevin Cullinane, and Mahim Khanna, "Economies of Scale in Container Ships," *Journal of Transport Economics and Policy*, 1999: 185–207.
 11. Erich Schneider, and Darshan Sachde, "Cost and Uncertainty Analysis of an Adsorbent Braid System for Uranium Recovery from Seawater." (ссылка 8)
 12. Для определения среднего значения использовались следующие отчеты: S.C. Ryder, and D. Chappel, "Optimal Speed and Ship Size for Liner Trades," Liverpool: Marine Transport Centre, University of Liverpool, 1979; S. Gilman, "The Competitive Dynamics of Container Shipping," Aldershot: Gower, 1983; and R. Pearson, "Container Ships and Shipping," London: Fairplay Publications, 1988.
 13. Suzuki, Toshihiro, Kyoichi Saito, Takanobu Sugo, Hisako Ogura, and Koichi Oguma, "Fractional Elution and Determination of Uranium and Vanadium Adsorbed on Amidoxime Fiber from Seawater," *Analytical Sciences*, 2000: 429–432.
 14. Catalytic Construction Company, "Integrated Process Design Report on Feed Materials Production Center," Fernald, Ohio: Refinery and Green Salt Plant, Oak Ridge, TN: United States Atomic Energy Commission, 1952.
 15. Catalytic Construction Company (ссылка 14).
 16. R. S. Stein, "Polymer Recycling: Opportunities and Limitations," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 1992: 835–838.
 17. EMWG-GIF (ссылка 7).
 18. Дисконтные ставки отражают текущую величину денежных средств, так же, как и воспринимаемый риск варианта инвестиции. В циркуляре А-94 Административно-бюджетное управление США рекомендует для оценки инвестиционных решений использовать дисконтную ставку в 7 годовых процентов. Смотрите <http://www.whitehouse.gov/omb/circulars/a094>.
 19. Linfeng Rao, "Recent International R&D Activities in the Extraction of Uranium from Seawater," Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
 20. Sugo, Takanobu, et al. (ссылка 2)
 21. Tamada, Masao, Noriaki Seko, Noburu Kasai, and Takao Shimizu (ссылка 3).
 22. Расчетная стоимость производства единицы адсорбента (включая стоимость материала, операций и обслуживания, и капитала) равна 5,36 доллара США на килограмм адсорбента. Экзотические материалы адсорбента с существенно большей стоимостью будут конкурентоспособными, только если их поглотительная способность будет столь же драматично превышать поглотительную способность амидоксимого адсорбента.
 23. Tamada, Masao, Noriaki Seko, Noburu Kasai, and Takao Shimizu (ссылка 3).
 24. Tamada, Masao, Noriaki Seko, Noburu Kasai, and Takao Shimizu (ссылка 3).